



UNIVERSIDAD DE CUENCA

UNIVERSIDAD DE CUENCA

**FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE CIVIL**

**EVALUACIÓN DE LA LIXIVIACIÓN DE NUTRIENTES EN LA
CUENCA DE PARÁMO ANDINO DEL RIO ZHURUCAY**

Tesis previa a la obtención del
título de Ingeniero Civil

AUTOR

JOSÉ FERNANDO CHAPA ZUMBA

DIRECTOR

ING. PATRICIO JAVIER CRESPO SANCHEZ, PhD

TUTOR

ING. PATRICIO JAVIER LAZO JARA

CUENCA - ECUADOR

ABRIL – 2014



RESUMEN

Debido a, la importancia de los ciclos de los nutrientes para la integridad de los ecosistemas en general, al escaso conocimiento sobre su relación con la hidrología en el páramo y a la importancia de éste ecosistema en la Región Andina, se realizó el análisis de la lixiviación de carbono orgánico total (TOC), nitritos ($\text{NO}_2\text{-N}$), nitratos ($\text{NO}_3\text{-N}$), amonio (NH_4) y fósforo (P) en la precipitación, caudal, y en los horizontes orgánicos y minerales de Andosoles e Histosoles. El estudio se llevó a cabo en la cuenca de páramo húmedo del Río Zhurucay (7.53 km^2), ubicada al sur del Ecuador sobre los 3000 m s.n.m. Las muestras de agua se tomaron quincenalmente, desde octubre del 2012 hasta octubre del 2013. Los resultados sugieren que para todos los elementos existe una independencia estacional de la precipitación, descartando un efecto de dilución. Se identificó que la lixiviación de TOC y NH_4 entre suelos es diferente, mientras que entre sus horizontes solo el TOC presenta variación debido a su variabilidad estacional y al alto contenido de materia orgánica. La lixiviación de TOC y P en el caudal se puede asociar a los porcentajes del tipo de suelo presentes en las microcuencas. Los resultados del estudio permiten una mejor estimación del proceso de lixiviación de los nutrientes en el páramo y de sus concentraciones y coeficientes medios.

Palabras clave: Ecuador, páramo, nutrientes, Andosoles, Histosoles.



ABSTRACT

Due to the importance of nutrient cycle for the integrity of ecosystems in general, the lack of knowledge about their relation in hydrology in the paramo and the importance of this ecosystem in the Andean Region, leaching evaluation of total organic carbon (TOC), nitrite (NO₂-N), nitrate (NO₃-N), ammonium (NH₄), and total phosphorus (P) was conducted in rainfall, runoff, and organic and mineral soil layers of Andosols and Histosols. The study was carried out in the basin of the Zhurucay River (7.53 km²) in southern Ecuador above 3000 m.a.s.l. The water samples were taken fortnightly from October of 2012 until October of 2013. Results suggest seasonal independence in precipitation for all the elements studied, discarding effects of dilution. Different leaching of TOC and NH₄ leaching between soils was identified, whereas only TOC showed in their layers a variation of the concentration due to the seasonal variation and the high content of organic matter. Leaching of P and TOC in discharge could be associated with the soil distribution in the basin. The results of this study allow a better understanding of the leaching process of nutrients in the paramo and of their average concentrations.

Keywords: Ecuador, paramo, nutrients, Andosol, Histosol.



INDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
AGRADECIMIENTO	8
CAPITULO 1.INTRODUCCIÓN	9
CAPITULO 2.MATERIALES Y MÉTODOS	12
2.1. Descripción del área de estudio	12
2.2. Sitios de muestreo	15
2.3. Instrumentos y equipos	16
2.4. Análisis de laboratorio	18
2.5. Análisis de la información.	19
2.6. Análisis de la variabilidad temporal estacional de la concentración de nutrientes en la precipitación, suelos y caudal.	19
2.7. Análisis de la relación entre el caudal y la concentración de nutrientes en el mismo.....	20
2.7.1. Análisis de la relación entre el caudal y su concentración de nutrientes mediante regresiones.....	20
2.7.2. Análisis de la relación entre el caudal y su concentración de nutrientes mediante agrupación por tipos de flujo.	21
2.8. Coeficientes de ingreso, exportación y valores promedio.	22
CAPITULO 3.RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
3.1. Análisis de la variación estacional de la concentración de nutrientes	24
3.1.1. Variación estacional de los nutrientes en la precipitación.	25



3.1.2. Variación estacional de los nutrientes en los suelos.	28
3.1.3. Variación estacional de los nutrientes en el caudal.....	29
3.2. Variación de la concentración de nutrientes entre Andosoles e Histosoles.....	30
3.3. Relación entre el caudal y la concentración de nutrientes.	32
3.4. Coeficientes de ingreso y de exportación de nutrientes.....	36
3.5. Procesos de lixiviación	37
3.5.1. Lixiviación de TOC	37
3.5.2. Lixiviación de P	41
3.5.3. Lixiviación de NH_4	42
3.5.4. Lixiviación de $\text{NO}_2\text{-N}$ y $\text{NO}_3\text{-N}$	43
 CAPITULO 4.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	 44
 CAPITULO 5.BIBLIOGRAFIA.....	 44
 ANEXOS	
ANEXO 1: Diagramas de caja estándar para el análisis de valores extremos y outliers.	53



Yo, José Fernando Chapa Zumba, autor de la tesis “Evaluación de la lixiviación de nutrientes en la cuenca de páramo andino del Río Zhuruca y”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 4 de abril del 2014.

José Fernando Chapa Zumba
0104965710



Yo, José Fernando Chapa Zumba, autor de la tesis “Evaluación de la lixiviación de nutrientes en la cuenca de páramo andino del Río Zhuruca”, 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 Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 4 de abril del 2014.

José Fernando Chapa Zumba
0104965710



AGRADECIMIENTO

Agradezco a los proyectos “Identificación de los impactos del cambio de uso de la tierra en la hidrogeoquímica de cuencas Andinas” e “Interpretación de los procesos hidroecológicos como base para la valoración del caudal ecológico en las cuencas del Paute y del Jubones” financiados por la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT). Al personal del Centro de Hidrología y Clima de la Universidad de Cuenca, de manera especial a todas las personas que colaboraron en la obtención de muestras en campo y a Diana Brazales por el análisis en laboratorio. Al Ing. Vicente Jaramillo por la logística y colaboración brindada en campo. Finalmente y de manera especial, mi agradecimiento a los Ingenieros Patricio Crespo y Patricio Lazo por su continua motivación y apoyo en la realización de esta tesis.

José Fernando Chapa Zumba,

Cuenca, abril 2014



CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

Los páramos son ecosistemas ubicados en zonas montañosas de los Andes conformados en su mayoría por valles y planicies de origen glaciar (Buytaert y col., 2006a). El rol ambiental, social y económico del páramo es fundamental en la región andina. A más de su importante valor ecológico, científico y genético (Díaz-Granados y col., 2005), el páramo brinda servicios ambientales directos a la población como el almacenamiento de carbono o el abastecimiento de agua para consumo humano, agricultura, industria o hidroelectricidad (De Bièvre y col., 2012; Hofstede y col., 2003).

Significativos avances científicos se han realizado en el estudio del páramo permitiendo mejorar la comprensión del ciclo hidrológico y su interrelación con los servicios ambientales que ofrece. Por ejemplo, el impacto del uso del suelo en la respuesta hidrológica del páramo ha sido abordado por Crespo y col., (2010) y por Buytaert y col., (2007). Sin embargo, aún existe mucha incertidumbre en varios de los procesos que ocurren en éste ecosistema, principalmente en aquellos que involucran indicadores biogeoquímicos.

El conocimiento del proceso de transporte de nutrientes a través del agua, asociado a los procesos hidrológicos, es todavía nulo en el páramo húmedo. De hecho, estudios que involucren el proceso de lixiviación de nutrientes no se han realizado aún en zonas de alturas similares a éste ecosistema, por lo que todavía existe un vacío científico en el conocimiento de este proceso en esta región. En zonas andinas solamente se ha podido identificar investigaciones en bosques tropicales (Borbor-Cordova y col., 2006; Wilcke y col., 2001; Bucker y col., 2011; Goller, 2004; Boy y col., 2008). Estos estudios determinan correlaciones positivas entre el caudal y la concentración de carbono orgánico total (Wilcke y col., 2001) o de nitrógeno orgánico disuelto, carbono orgánico disuelto, nitratos o amonio (Goller y col., 2006). Mientras tanto, Boy y col.,



(2008) relaciona mayores concentraciones de fósforo total en los caudales base que en caudales altos.

Evaluar el proceso de lixiviación de nutrientes tiene una importancia fundamental debido a la influencia de los mismos en el ecosistema. El estudio del régimen hidrológico con el ciclo de los nutrientes, a nivel de pequeñas cuencas, es esencial para la administración de los recursos hídricos debido a su rol en el abastecimiento de nutrientes hacia los ríos aguas abajo (Alexander y col., 2007) y contribuye por lo tanto a mantener la integridad ecológica a escala regional (Freeman y col., 2007). Específicamente en el estudio de una cuenca, los nutrientes son indicadores del nivel de alteración antropogénica que afectan a la misma (Heatwaite, 1995). Cuando las fuentes de nutrientes son difusas, los principales medios para el control del estado del agua en una cuenca son las concentraciones de nitrógeno y fósforo (Heatwaite, 1995).

El análisis del comportamiento de los nutrientes en una cuenca mediante los procesos hidrológicos ha sido históricamente una herramienta importante de evaluación, tanto de las concentraciones promedio de nutrientes en el ecosistema como de los procesos que influyen en su concentración (Heatwaite, 1995). Para Bormann & Likens, (1967), la evaluación de la lixiviación de nutrientes en interacción con el ciclo hidrológico provee considerables ventajas para establecer los principales procesos internos que pueden ocurrir en una cuenca. Los estudios que abordan éstos temas se dirigen principalmente hacia la identificación de las fuentes y mecanismos de control en la entrada y salida de nutrientes de una cuenca (Salmon y col., 2001) o en la cuantificación de su influencia sobre los servicios ambientales que los ecosistemas ofrecen (Watanabe & Ortega, 2011).



El objetivo de la presente investigación es identificar la influencia de la variabilidad hidrológica y estacional en el proceso de lixiviación de los nutrientes: Carbono Orgánico Total (TOC), Nitratos (NO_3), Nitritos (NO_2), Amonio (NH_4) y Fósforo Total (P). Para lograr el objetivo principal, los objetivos específicos son: (i) Evaluar la variabilidad temporal estacional de los nutrientes en la precipitación, suelo y caudal. (ii) Determinar la relación existente entre la concentración de cada nutriente en el caudal, suelo y precipitación y los procesos hidrológicos como la precipitación y caudal, y (iii) Estimar los coeficientes de exportación de los nutrientes en la precipitación, caudal y en los horizontes orgánicos y minerales de Andosoles e Histosoles.

Las hipótesis son: (i) No existe variabilidad temporal estacional significativa de los nutrientes en la precipitación, suelos y caudales; (ii) El proceso de lixiviación para del P, TOC, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ en los caudales sigue una correlación con el tipo de suelo presente en las microcuencas; (iii) La concentración de los nutrientes en los cauces puede relacionarse al caudal; (iv) Las concentraciones de nutrientes en Andosoles e Histosoles son distintas y presentan diferentes procesos de lixiviación.

CAPITULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción del área de estudio

La microcuenca del Río Zhurucay tiene una superficie de 7.53 km² y se encuentra en un rango altitudinal entre los 3500 y 3900 m s.n.m. (Figura 2.1). El Río Zhurucay es afluente del Río Rircay, formando parte de la cuenca hidrográfica del Río Jubones que desemboca en el Océano Pacífico.

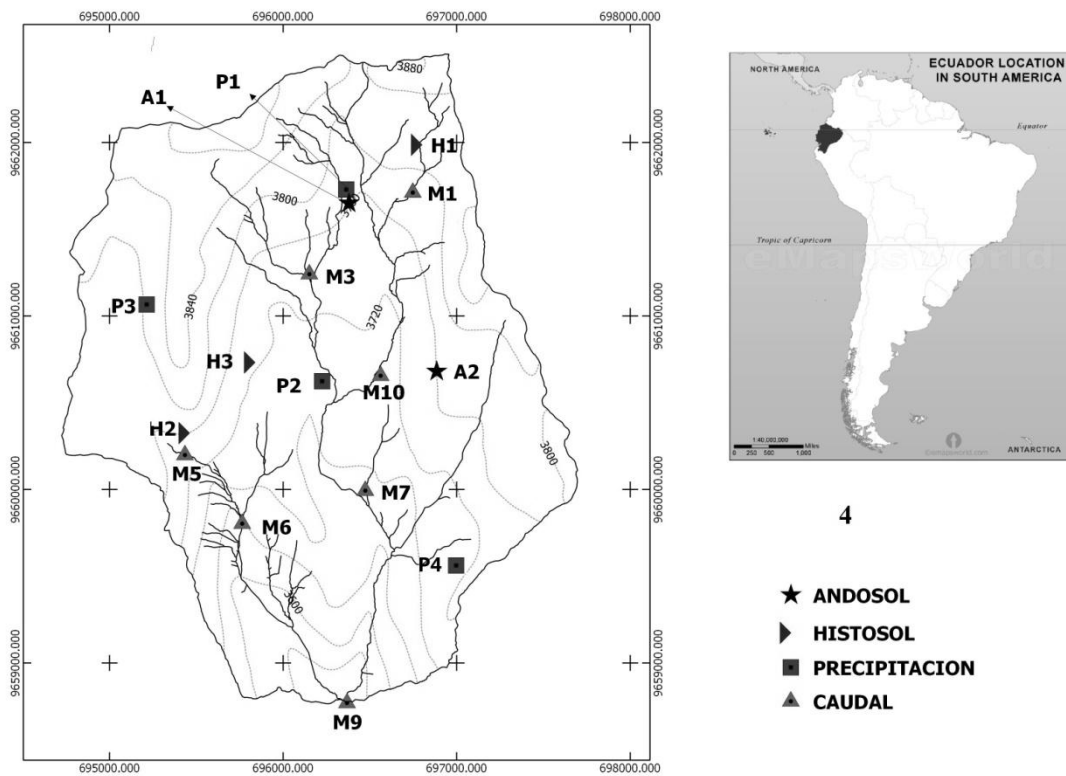


Figura 2.1: Ubicación en de los sitios de muestreo para precipitación (P), Histosoles (H), Andosoles (A) y caudal (M).



La geología del lugar se encuentra caracterizada por las formaciones: Turi, conformada de brechas tobáceas primarias de composición andesítica; y Quimsacocha, conformada por lavas y tobas; y por la formación Santa Isabel, conformada por lavas y tobas andesíticas.

Las características del suelo y clima en el páramo permiten una alta capacidad para almacenar y regular el agua (Podwojewski & Poulenard, 2000). A pesar de la compleja geología y topografía de los páramos, los suelos comúnmente son homogéneos (Buytaert y col., 2006a). Los suelos comunes en estas zonas, según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), son los Andosoles, Histosoles, Regosoles y Umbrisoles (FAO/ISRIC/ISSS, 1998).

Los suelos más comunes en la zona de estudio son los Andosoles e Histosoles. La microcuenca del Río Zhurucay se encuentra conformada por un 72% de Andosoles y un 28% de Histosoles. El uso del suelo se distribuye en un 56% por bosque pristino, 37% por pastoreo extensivo, 5% por siembra de pino y 2% por pastoreo intensivo. La vegetación se encuentra distribuida en un 71% por pajonales, 25% por humedales, 2% por bosque de polylepis y 2% por bosque de pino. Un detalle más particular de cada microcuenca de la zona de estudio se puede encontrar en la Tabla 1.

Estudios realizados en el año 2011 y 2012 (Padrón, 2013; Mosquera y col., 2012) muestran que la precipitación en el lugar es de baja intensidad, comúnmente menor a 10 mm/h. La precipitación anual varía entre 1144 mm y 1600 mm con una estacionalidad unimodal y una distribución espacial homogénea, siendo los meses de enero y febrero los más lluviosos mientras que agosto y septiembre los que menor precipitación registran.

Microcuenca	Área (km ²)	Altitud (m.s.n.m)	Pendiente (%)	Distribucion suelos (%)		Cobertura vegetal (%)				Uso de suelo			
				HIS	AND	TG	CP	BPO	BPI	NAT	GEX	GIN	BPI
M1	0.2	3777-3900	14	15	85	85	15	0	0	84	16	0	0
M3	0.38	3723-3850	19	20	80	78	18	4	0	92	8	0	0
M5	1.22	3771-3830	12	63	37	35	65	0	0	100	0	0	0
M6	1.72	3645-3830	15	50	50	53	47	0	0	82	18	0	0
M7	3.28	3680-3900	18	26	74	73	24	1	2	57	41	2	0
M9	7.53	3676-3900	17	28	72	71	24	2	2	56	36	2	5
M10	1.4	3505-3900	20	22	78	78	17	0	4	74	22	4	0

Leyenda: AND, Andosoles; HIS, Histosoles; ALM, plantas en cojines; BPO, bosque de polylepis; BPI, bosque de pino; NAT, natural; GEX, pastoreo extensiva; GIN, pastoreo intensivo;

Tabla 1. Características biofísicas de las microcuencas monitoreadas



El principal factor para la producción de agua en los cauces del páramo es la precipitación (Buytaert y col., 2006a). La respuesta del caudal a la precipitación es rápida debido a que el flujo cerca de la superficie es el principal proceso en la generación de escorrentía (Mosquera y col., 2012). La zona de estudio no evidencia aporte de aguas subterráneas significativas, siendo los Histosoles la principal fuente de aporte para el caudal, mientras que los Andosoles tienen como función principal regular el caudal y recargan los Histosoles (Mosquera y col., 2012).

2.2. Sitios de muestreo

Para la ubicación de los sitios de muestreo se consideraron los tipos de suelos, la ubicación de las diferentes microcuencas y la precipitación. La Figura 2.1 presenta la ubicación de los lugares seleccionados para la toma de muestras de agua en Andosoles (A), Histosoles (H), caudales (M) y precipitación (P).

El muestreo de nutrientes en los suelos se realizó en tres sitios de Andosoles y dos sitios de Histosoles (Figura 2.1). En cada punto de monitoreo de suelo se tomaron muestras en tres profundidades; dos horizontes orgánicos y uno mineral. Los horizontes orgánicos para los Andosoles se encontraron a 25 cm y 35 cm mientras que para los Histosoles se encontraron a 25 cm y 45 cm de profundidad. El horizonte mineral se encontró a 65 cm en los Andosoles y a 75 cm en los Histosoles.

El muestreo se realizó de manera quincenal desde el 26 de octubre del 2012 hasta el 23 de octubre del 2013 en caudal, suelo y precipitación. En algunas ocasiones no se pudo tomar muestras en éstos puntos debido a que no existió suficiente agua recolectada en las botellas para su análisis. Las muestras para el análisis de nutrientes en la precipitación se recolectaron en los puntos P1 y P2 (Figura 2.1), obteniendo una muestra ponderada. De manera similar a la



precipitación, las muestras de agua pertenecientes a los suelos de igual tipo y profundidad se mezclaron en una sola muestra ponderada. Las botellas de vidrio colocadas en los suelos para la recolección semanal de agua se vaciaron y limpiaron después de cada muestreo a fin de evitar la contaminación con partículas de suelo.

El procedimiento de muestreo se realizó siguiendo las recomendaciones planteadas por The American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation (APHA, AWWA, WEF, 1999). Las muestras se tomaron utilizando botellas de vidrio ámbar de 250 ml. Previo a cada campaña de monitoreo, las botellas de ámbar fueron lavadas con jabón libre de fosfato (Extran MA3) diluido en agua en una proporción 1:100, enjuagadas con agua potable, luego con ácido clorhídrico diluido en agua destilada 1:1, y finalmente lavadas con agua destilada.

En los sitios de muestreo, las botellas de ámbar se enjuagaron con agua del mismo punto antes de tomar la muestra. Las muestras en los caudales se tomaron en las inmediaciones de los vertederos y en contracorriente. Las muestras obtenidas de todos los puntos de monitoreo se transportaron hacia el laboratorio manteniendo la cadena de frío y se almacenaron a 4°C hasta su posterior análisis.

2.3. Instrumentos y equipos

Para el muestreo de nutrientes en la precipitación se utilizó recolectores ubicados a una altura de 1.5 m en la parte alta (P1) y media (P2) de la cuenca (Figura 2.1). Los recolectores para las muestras se conformaron de un embudo receptor provisto de una pelota plástica y un recolector de polipropileno. El recolector fue recubierto con papel aluminio para evitar la evaporación.



Para el muestreo de nutrientes en los suelos se utilizó platos de succión ubicados a las profundidades descritas anteriormente. Los platos de succión constan de platos de polietileno de 50 x 50 cm, conectados mediante tubos de plástico (mangueras) de 13mm de diámetro (Boll y col., 1991) a botellas de vidrio con capacidad de un litro donde se almacena el agua hasta su recolección. Dentro de los tubos de plástico se colocaron cuerdas de fibra de vidrio de 9.5mm de diámetro (Boll y col., 1992), la cual fue previamente calentada a 400°C para remover cualquier impureza debido al proceso de fabricación (Knutson y col., 1993). Así, los tubos de plástico evitaron la evaporación y contaminación de las cuerdas. Se utilizó una succión promedio de 1m (Brown y col., 1986) obteniendo una tensión baja constante que garantiza la recolección de la fracción de agua móvil del suelo (Landon y col., 1999).

Para la medición de la cantidad de precipitación se utilizó 4 pluviógrafos tipo balancín, marca Onset, con una resolución de 0.2 mm. Los pluviógrafos se ubicaron de manera distribuida en la cuenca (Figura 2.1). La cuantificación de la precipitación media total en la microcuenca se realizó mediante polígonos de Thiessen.

La medición del caudal se realizó en vertederos ubicados mediante un sistema anidado “nested approach”. Se utilizó vertederos triangulares de pared delgada “90° V-notch weirs” en M1, M3, M5, M6, M7 y M10 mientras que en la salida de la microcuenca (M9) se utilizó un vertedero rectangular de pared delgada.

Cada vertedero contó con un sensor de nivel Baro-Diver tipo transductor de presión, marca Schlumberger, con una precisión de +/-5 mm. Los niveles obtenidos cada cinco minutos se transformaron a caudal mediante las ecuaciones de Kindsvater-Shen, las mismas que fueron corregidas y validadas continuamente mediante el método de dilución con sal (Gualpa, 2013).



Debido a la existencia de vacíos de datos en algunos vertederos, ocasionados por fallas en los equipos de medición de nivel, los valores de caudal faltantes se rellenaron mediante regresiones lineales. Las regresiones se realizaron mediante el ajuste por mínimos cuadrados. Este procedimiento utilizó los registros de años anteriores correspondientes al periodo de pérdida de información. Los datos de caudal utilizados fueron los obtenidos mediante el promedio horario. Se seleccionó la mejor correlación entre vertederos para el relleno de datos del periodo faltante.

2.4. Análisis de laboratorio

El análisis de las concentraciones de TOC, P, NO₂-N, NO₃-N y NH₄ se realizó en base al procedimiento planteado por The Hach Company (2009). La concentración de los nutrientes se determinó utilizando un colorímetro marca Hach DR/890 y para el P y TOC se utilizó también un reactor DRB 200.

Los reactivos utilizados en el NH₄ fueron Vial AmVer®, Salicilato de Amonio y Cianuro de Amonio; para el P se utilizó ampollas hidrolizables de rango ácido, Persulfato de potasio y PhosVer® 3; para el nitrato se utilizó NitraVer® 5; para nitritos NitriVer® 3 y para el TOC se utilizó ampollas hidrolizables de digestión de rango ácido. Para los nitratos se contó además con datos complementarios a partir del 08 de mayo de 2013, obtenidos mediante el método del espectrofotómetro (APHA, AWWA, WPCF, 1989). Debido a que la concentración del ion amonio (NH₄⁺) es por lo general mayor al amoniaco (NH₃), el amonio total se describió como NH₄ (Ji, 2008).

Los límites máximos de detección fueron 2.5, 3.5, 20, 30 y 0.300 mg/l para NH₄, P, TOC, NO₃-N y NO₂-N, respectivamente. Los valores menores a los



límites de detección: 0.1 para NO₃-N y TOC, 0.01 para NH₄ y P, y 0.001 para NO₂-N, se consideraron igual al 25% de los respectivos límites.

2.5. Análisis de la información.

El análisis estadístico de los datos se realizó utilizando el programa Statistica 7.0, (StatSoft, 2004). Todos los análisis se realizaron con un nivel de significancia (α) de 0.05. Previamente se contrastó la normalidad de los datos utilizando el test de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965), donde la hipótesis nula (H_0) planteó que la muestra provenía de una población normalmente distribuida.

Debido a la no normalidad de los datos, los valores atípicos de las concentraciones se evaluaron mediante aproximaciones gráficas empleando diagramas de caja (boxplots). De los diferentes tipos de diagramas, se graficaron los denominados “Boxplot Estándar” definidos por John Tukey (Helsel & Hirsch, 2002), los cuales permiten visualizar y analizar los valores extremos y outliers. Sin embargo, los datos que fueron definidos como valores extremos pero que se encontraron similares a los rangos en otras estaciones no se eliminaron, como se observa en el Anexo 1.

2.6. Análisis de la variabilidad temporal estacional de la concentración de nutrientes en la precipitación, suelos y caudal.

En el análisis de la estacionalidad de nutrientes, se utilizó la precipitación como la variable para definir los periodos de estudio. Se estableció cuatro grupos durante el año de monitoreo. Los periodos de mayor y menor precipitación tuvieron periodos intermedios para identificar de mejor manera las diferencias significativas entre los mismos asociadas a la precipitación. Esta agrupación



procuró además mantener la misma cantidad de datos de concentración de nutrientes en cada periodo.

Los periodos establecidos fueron: (i) desde el 19 de octubre de 2012 hasta el 18 de enero de 2013 (periodo 1), (ii) desde el 19 de enero hasta el 24 de abril de 2013 (periodo 2), (iii) desde el 25 de abril hasta el 31 de julio de 2013 (periodo 3) y (iv) desde el 1 de agosto hasta el 23 de octubre de 2013 (periodo 4). Para definir si existió variación significativa entre los periodos se realizó la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon (Montgomery & Runger, 2002). La hipótesis nula en esa prueba planteó que las medias entre los periodos fueron iguales.

2.7. Análisis de la relación entre el caudal y la concentración de nutrientes en el mismo.

2.7.1. Análisis de la relación entre el caudal y su concentración de nutrientes mediante regresiones.

El análisis de regresión lineal simple para la obtención de un modelo predictivo se basó en definir como variable independiente al caudal mientras que la concentración medida en cada nutriente se definió como la variable dependiente. La recta de regresión estimada de mejor ajuste se determinó mediante la teoría de mínimos cuadrados. El índice de bondad de ajuste de la recta se verificó mediante el coeficiente de determinación (r^2). El análisis de regresión lineal involucró los supuestos de normalidad, homoscedasticidad, linealidad e independencia (Helsel & Hirsch, 2002).

Se evaluó cuatro posibles líneas de tendencia: regresión lineal con y sin transformación logarítmica, potencial e hiperbólica (Ec. 1 - 4), éste último método fue propuesto por Johnson y col. (1969) como un método eficaz para el



presente análisis. En las ecuaciones, los coeficientes a , b y c son los determinados en el ajuste, mientras que Q representa el caudal y C representa la concentración del nutriente en Q . Las regresiones en las ecuaciones (3) y (4) se realizaron mediante transformaciones lineales.

$$C = a * Q + b \quad (1)$$

$$C = a * \ln(Q) + b \quad (2)$$

$$C = a * b^Q \quad (3)$$

$$C = \frac{a}{1+b*Q} + c \quad (4)$$

Para definir que la recta de mejor ajuste (de los cuatro modelos analizados) representó significativamente la relación entre el caudal y su concentración, se realizó la prueba t-Student (Montgomery & Runger, 2002). Esta prueba determinó que la pendiente de la regresión (coeficiente de regresión) y el coeficiente de determinación difirieron significativamente de cero, es decir, estadísticamente existió una relación entre C y Q .

2.7.2. Análisis de la relación entre el caudal y su concentración de nutrientes mediante agrupación por tipos de flujo.

Un segundo análisis se realizó agrupando las concentraciones de cada nutriente con el tipo de caudal en el momento del muestreo. Se utilizó éste método ya que provee precisas estimaciones cuando el caudal varía significativamente en el tiempo y cuando las concentraciones en cada grupo están asociadas (Dann y col., 1986). Se definió tres tipos de flujo: bajo, medio y alto. El 30 % de los registros con menor caudal se consideraron como caudales bajos (Smakhtin, 2001) mientras que los caudales que excedieron el rango entre el 95% de registros se consideraron caudales altos o picos (Brown y col.,



2005). Los caudales entre el 30% y 95% de los registros se denominaron caudales medios.

El análisis estadístico entre las concentraciones en cada tipo de flujo se realizó de manera similar a la evaluación de la variabilidad temporal estacional, es decir; mediante un análisis discriminante. El objetivo de éste análisis fue evaluar la diferencia significativa entre las variables medias de cada grupo utilizando la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon (Montgomery & Runger, 2002). Los valores medios de los grupos bajos y altos se utilizaron para contrastar la diferencia estadística con las concentraciones en caudales medios.

2.8. Coeficientes de ingreso, exportación y valores promedio.

Los valores anuales medios de ingreso para las concentraciones de TOC, NO₂-N, NO₃-N, NH₄ y P se calcularon mediante la media ponderada respecto a la precipitación. Para tal objetivo se utilizó el método Volume-Weighted Mean Concentration (VWMC, por sus siglas en inglés), presentado en la ecuación 5, donde P_i representa la precipitación medida en el muestreo i y C_i corresponde a la concentración del nutriente respectivo en P_i . El coeficiente anual de ingreso de cada nutriente se obtuvo multiplicando el respectivo valor de del VWMC de cada nutriente con la cantidad anual medida en la precipitación durante el periodo de estudio.

$$VWMC = \frac{\sum_{i=1}^n C_i * P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (5)$$

Debido a que no se contó con registros de la cantidad de agua en movimiento a través de los diferentes horizontes de suelos, no se pudo determinar los



coeficientes anuales en éstos puntos. Los valores medios de la concentración de cada nutriente, tanto en los horizontes orgánicos como minerales, se calcularon a partir de la mediana de los mismos. La variación entre suelos y horizontes se determinaron mediante la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon.

Los valores promedio anuales en los caudales se obtuvieron mediante la media ponderada entre la concentración de los nutrientes (C_i) y el caudal instantáneo al momento del muestreo (Q_i), Éste método, denominado Flow-Weighted Mean Concentration (FWMC, por sus siglas en inglés), se describe en la Ecuación 6. El coeficiente anual de exportación se obtuvo multiplicando el respectivo FWMC por el volumen de agua total registrado durante el periodo de monitoreo en los respectivos vertederos de cada microcuenca.

$$FWMC = \frac{\sum_{i=1}^n C_i * Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (6)$$

CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis de la variación estacional de la concentración de nutrientes

La precipitación anual en la cuenca, ocurrida desde el 19 de octubre del 2012 hasta el 23 de octubre del 2013 fue de 1135 mm. El índice de estacionalidad se determinó en 0.29, lo que caracteriza a la precipitación en un régimen distribuido a lo largo del año pero con un periodo húmedo definido (Walsh & Lawler, 1981).

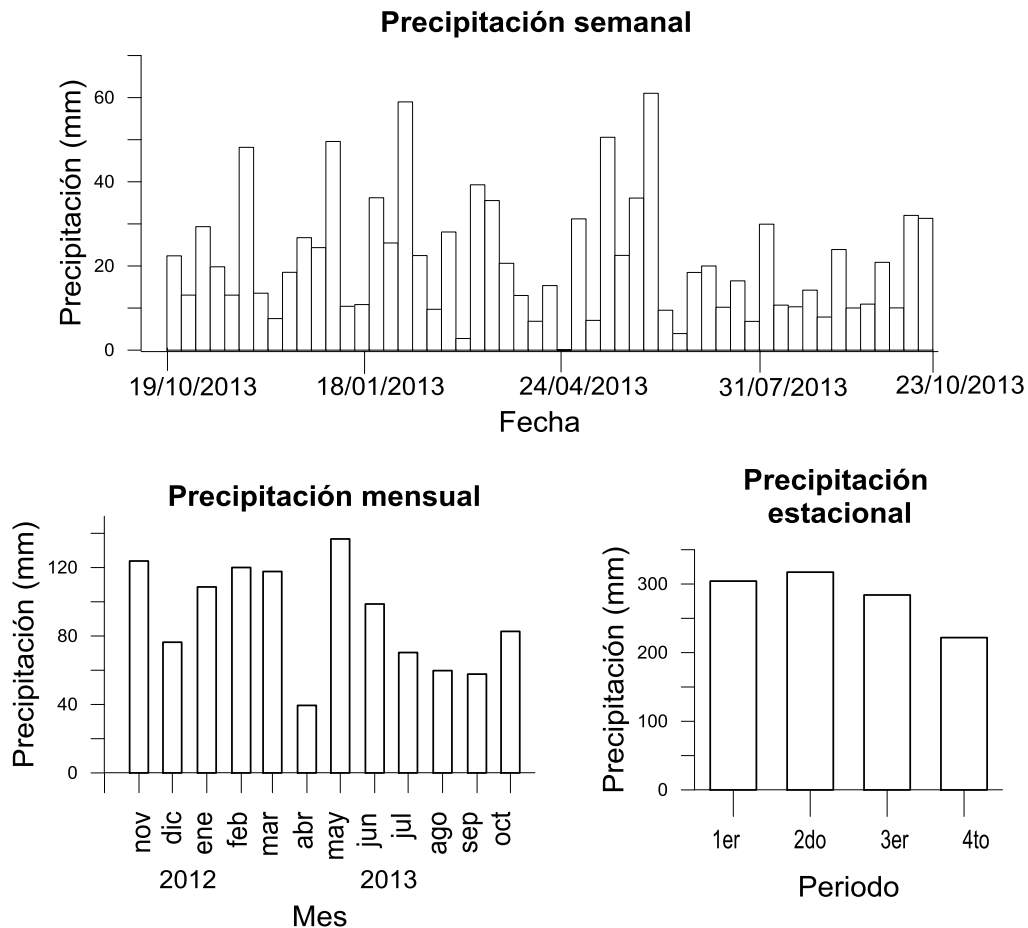


Figura 3.1. Hietograma semanal, estacional y mensual para la cuenca del Río Zhurucay desde el 19/12/2012 hasta el 23/12/2013.



La Figura 3.1 presenta el histograma de la precipitación (hietograma) mensual, estacional y semanal en la zona de estudio. Como se observa, los meses más lluviosos fueron noviembre (123mm) y mayo (137mm), mientras que abril (39mm) y septiembre (58mm) fueron los meses con menor precipitación. Durante el periodo de monitoreo, tres semanas tuvieron una precipitación menor a 5mm y solo tres presentaron lluvias mayores a los 50 mm.

El periodo 2 fue el más lluvioso (317mm) mientras que el periodo 4 fue el que menor precipitación presentó (222mm). Resultados similares, en lo que respecta a los periodos de distribución de la lluvia, fueron obtenidos por Padrón, (2013) y Buytaert y col., (2006b). Los periodos 1 y 3 presentaron 312mm y 284mm respectivamente.

3.1.1. Variación estacional de los nutrientes en la precipitación.

La concentración de los nutrientes en la precipitación no presentó variación estacional significativa. Las eventuales concentraciones altas ocurrieron de manera distribuida en todo el año. A pesar de que, tanto a nivel regional como en la zona de estudio se evidencia la influencia en la precipitación de las corrientes de aire del Pacífico y Atlántico (Vuille y col., 2000; Crespo y col., 2011; Padrón, 2013), estas corrientes no presentaron influencia en la variación temporal de la concentración de nutrientes por ingreso atmosférico. El rango de distribución de éstos valores se puede observar en la Figura 3.2.

La concentración de nutrientes en la precipitación tampoco presenta una correlación con la cantidad de lluvia semanal. Este efecto de dilución se descartó al no determinarse relaciones significativas entre estas variables. El análisis de correlación lineal presentó coeficientes de determinación menores a 0.08 para todos los nutrientes.

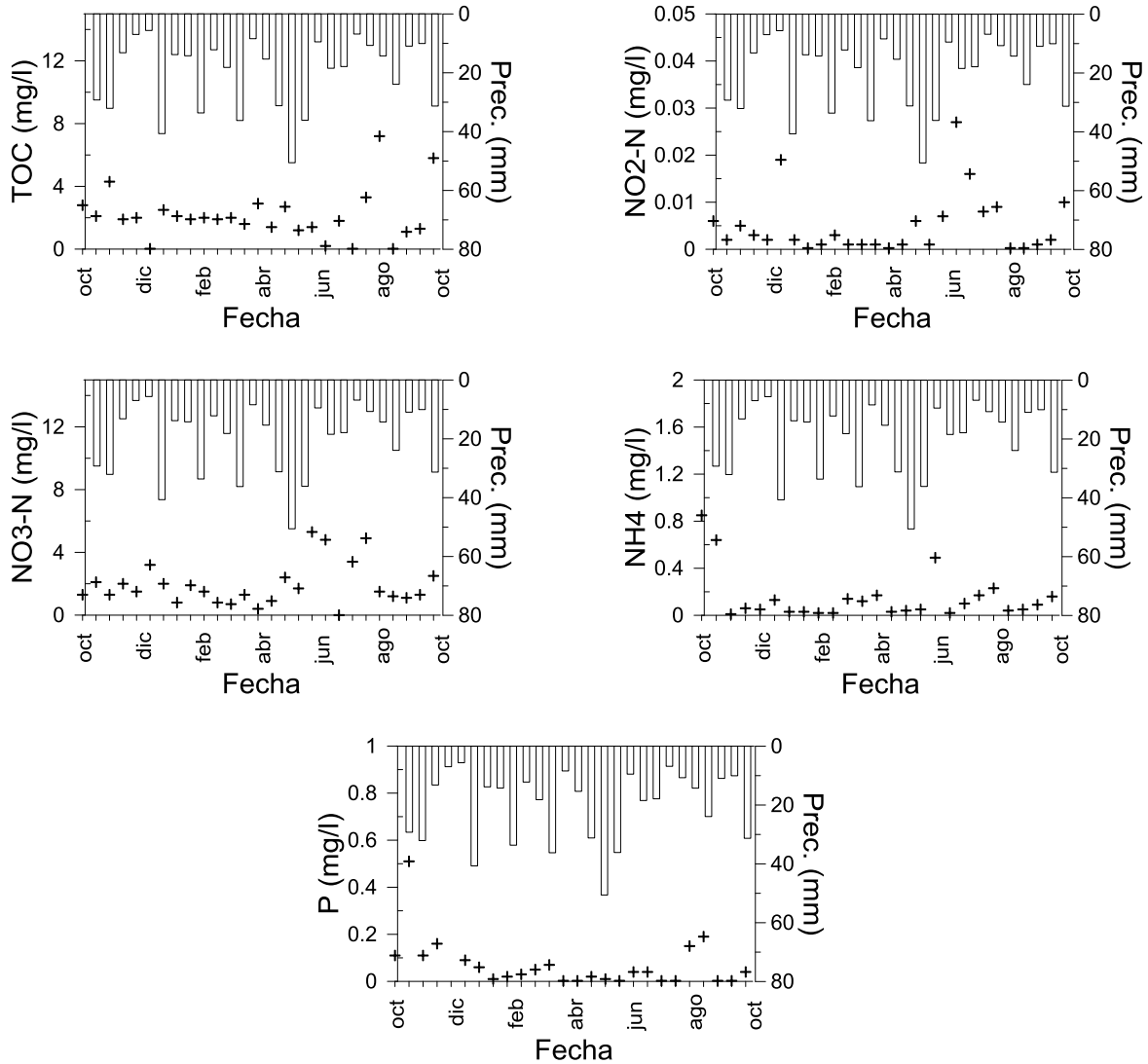


FIGURA 3.2 Concentraciones de nutrientes en la precipitación.

El comportamiento estacional uniforme de la concentración de nutrientes en la precipitación difiere de los resultados obtenidos por otros autores en la variación estacional de DOC, NO₃-N o NH₄⁺, en bosques andinos del sur del Ecuador. Estos estudios presentaron una clara influencia de las masas de aire en la composición química de los nutrientes mencionados, siendo sus concentraciones mayores en el periodo seco que en el periodo húmedo (Goller, 2004; Goller y col., 2006; Wilcke y col., 2001). Esto se debe a que en la cuenca



de estudio no existe una marcada variación estacional de la precipitación en comparación a otros sitios.

A pesar de que la variación estacional de la precipitación no influye en la variación de la concentración de nutrientes, la neblina puede ser un factor importante y fundamental en la concentración del ingreso atmosférico de los mismos en el páramo. Otros estudios realizados en la región presentan similares e incluso mayores concentraciones de NH_4 y $\text{NO}_3\text{-N}$ en la neblina que en la lluvia. Beiderwieden y col., (2005) determinó que estas concentraciones fueron mayores en la neblina, con un radio cuatro veces superior respecto a la lluvia.

La variación estacional de la neblina puede también ser un factor determinante en el ingreso atmosférico. Según Beiderwieden y col., (2005), las corrientes de aire de la Amazonía podrían tener mayor influencia que las del pacífico, siendo la influencia antropológica un factor fundamental. Rollenbeck & Bendix, (2010) obtuvo similares conclusiones en cuanto a la importancia de la neblina en la concentración de los nutrientes, pero determinó una mayor influencia del gradiente altitudinal y de las corrientes del Pacífico.

Aunque el conocimiento de la neblina o “precipitación horizontal” es aún escaso en el páramo, éste proceso podría tener una fuerte influencia en la hidrología del ecosistema (Buytaert y col., 2006c) y por lo tanto en el depósito de nutrientes. El estudio del ingreso atmosférico de nutrientes en el páramo a través de la neblina es necesario para caracterizar con mayor detalle la lixiviación de los nutrientes, pudiendo ser objeto de futuras investigaciones.

3.1.2. Variación estacional de los nutrientes en los suelos.

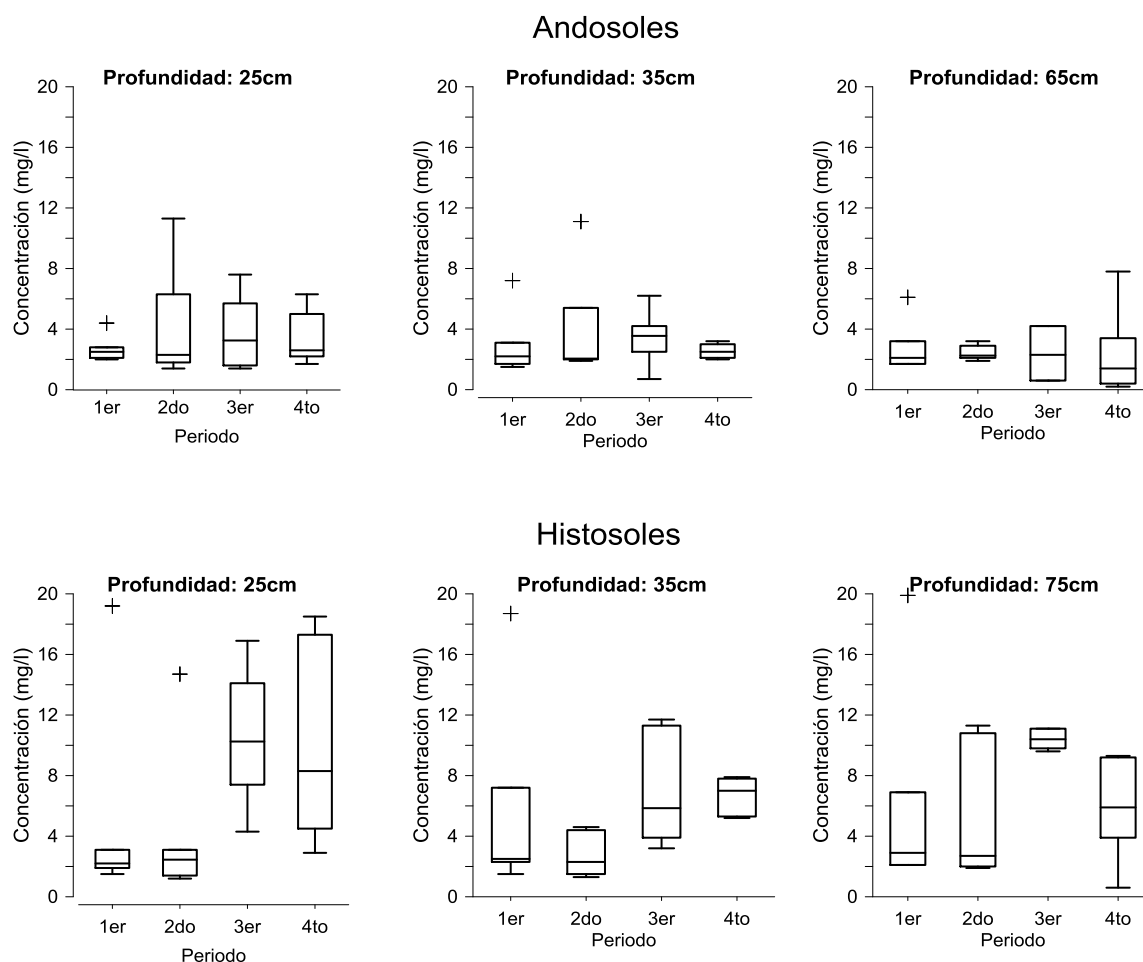


Figura 3.3: Variación estacional de la concentración de TOC en Andosoles e Histosoles.

Respecto a los suelos, el comportamiento estacional del TOC varió significativamente en los horizontes orgánicos de los Histosoles. Estos horizontes presentaron una significativa variación siendo los periodos de mayor precipitación los que menores concentraciones de TOC presentaron. El periodo 2, el de mayor precipitación, presentó valores promedio de 2 mg/l en los tres horizontes, mientras que el periodo 4, el de menor precipitación, presentó en promedio 9mg/l para el primer horizonte y 6mg/l para el segundo (Figura 3.3).



Si bien el tercer horizonte (mineral) presentó valores medios distintos para cada periodo (Figura 3.3), la diferencia de la concentración entre los periodos de mayor y menor precipitación no fue significativa ($p>0.6$).

Contrario al efecto de estacionalidad del TOC observado en los horizontes orgánicos de los Histosoles, los Andosoles no presentaron variación estacional de éste elemento. La Figura 3.3 muestra que, aunque las mayores concentraciones en Andosoles se produjeron el segundo periodo en los horizontes orgánicos, éste incremento no influencia significativamente en su variabilidad estacional. Los demás nutrientes, P, NO₂-N, NO₃-N y NH₄, tampoco presentaron variación estacional significativa en Andosoles o Histosoles durante el periodo de estudio.

3.1.3. Variación estacional de los nutrientes en el caudal

Para el P, la zona de estudio muestra una clara variación temporal entre los periodos de mayor y menor precipitación. El periodo 4, el de menor precipitación, presentó en los caudales las mayores concentraciones de éste nutriente, siendo frecuente encontrar valores cercanos a 0.9 mg/l. En cambio para el periodo 2, el de mayor precipitación, las concentraciones se ubicaron frecuentemente en un rango menor a los 0.15 mg/l. Para éstos dos periodos, las diferencias entre la concentración de P fueron significativas en la mayoría de las microcuencas (M3, M5, M6 y M7). Las demás concentraciones de nutrientes en los caudales; TOC, NO₂-N, NO₃-N y NH₄, presentaron similares distribuciones estacionales en todas las microcuencas sin una diferencia significativa, por lo que no existe una variación de sus concentraciones asociada a la variación estacional.

3.2. Variación de la concentración de nutrientes entre Andosoles e Histosoles

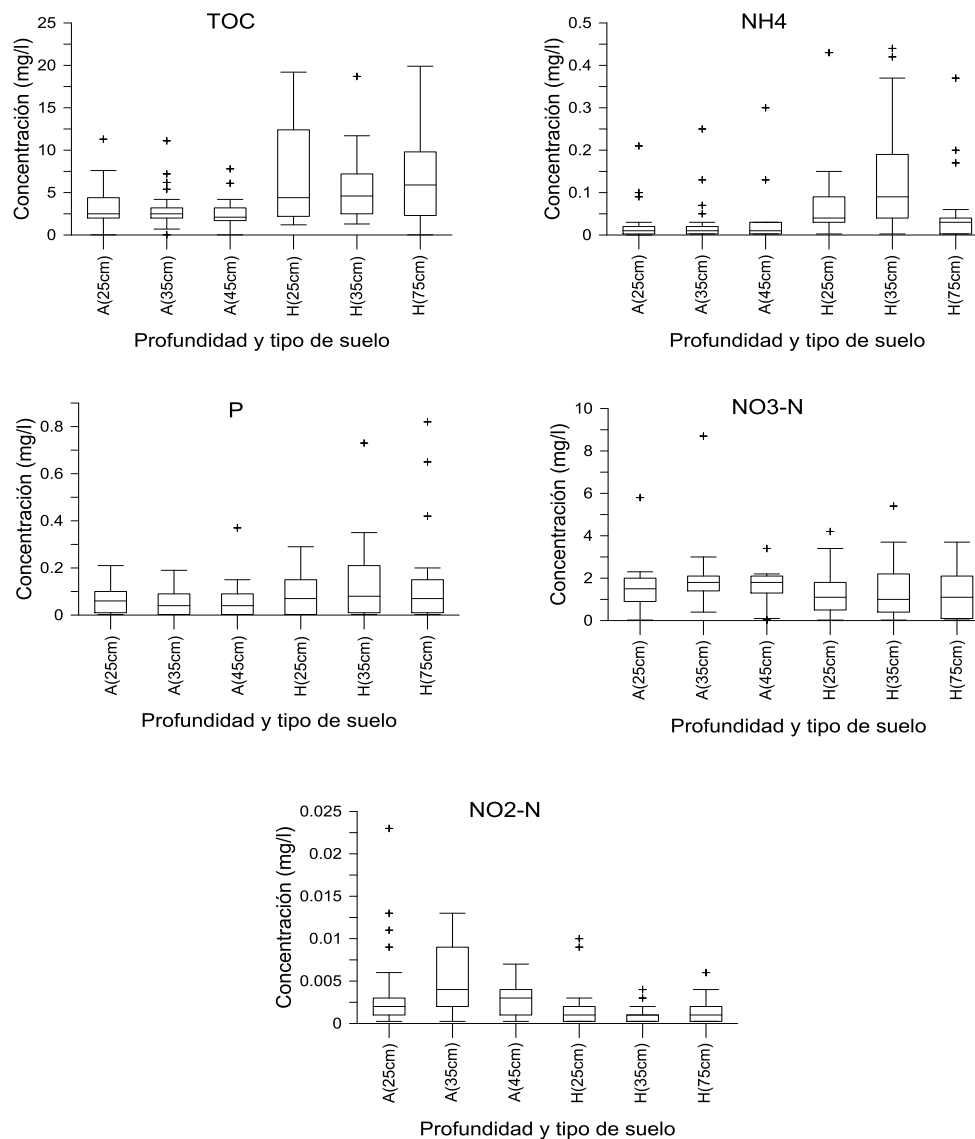


Figura 3.4: Concentración de nutrientes en los horizontes orgánicos y minerales de Andosoles e Histosoles.



Los Andosoles e Histosoles presentan distintas concentraciones en la lixiviación del TOC. Los horizontes orgánicos de los primeros tienen concentraciones medias similares (2.5 mg/l) ligeramente superiores a la del horizonte mineral (2 mg/l). En cambio, las concentraciones medias anuales en los Histosoles son similares en los tres horizontes (4.4 - 5.9 mg/l). Los resultados estadísticos muestran que la lixiviación de estos suelos es significativamente diferente, siendo mayor siempre la producida en los Histosoles, tanto en sus horizontes orgánicos como en el mineral (Figura 3.4). Lo anterior es debido posiblemente a que los Histosoles presentan mayores concentraciones de materia orgánica (53%) que los Andosoles (17%) (Borja y col., 2009), siendo esta materia la responsable de la mayor lixiviación de TOC en los Histosoles.

La lixiviación de NH_4 , de manera similar al TOC, es mayor en los Histosoles. El segundo horizonte orgánico de éste suelo presenta valores medios de 0.09 mg/l, superiores a los del primer y tercer horizonte (<0.04 mg/l). Además, éstos horizontes son significativamente mayores a los de los Andosoles, los mismos que presentan concentraciones promedio de 0.01 mg/l, con valores generalmente menores a los 0.04 mg/l (Figura 3.4). La diferencia entre los suelos se debe posiblemente a la influencia de la materia orgánica y al contenido de humedad; en suelos más húmedos y con mayor contenido orgánico, la oxidación de NH_4 es más restringida (Hattermann y col., 2006).

Los Andosoles presentan ligeras concentraciones mayores de lixiviación de $\text{NO}_2\text{-N}$. Entre los horizontes de cada suelo no existe variación en la lixiviación, sin embargo entre Andosoles e Histosoles la variación si es significativa (Figura 3.4). Los Andosoles tienen en promedio mayores concentraciones (0.002 – 0.004 mg/l) que los Histosoles (0.001 mg/l). En los Histosoles se esperan concentraciones menores a los 0.005 mg/l mientras que en los Andosoles éste



valor es con frecuencia superior. Para Ullah & Zinati, (2006), la desnitrificación depende principalmente de las condiciones de humedad en el suelo y de la disponibilidad de materia orgánica en el mismo. Por lo que, la diferencia de estas condiciones entre Andosoles e Histosoles podría ser el factor principal para la menor concentración de $\text{NO}_2\text{-N}$ en éste último suelo.

En el caso del P y $\text{NO}_3\text{-N}$, la lixiviación en los horizontes orgánicos y minerales de Andosoles e Histosoles es similar. Las concentraciones medias de P se ubican entre los 0.07 mg/l Histosoles y 0.05 mg/l para los Andosoles. Aunque los Histosoles muestran ligeras concentraciones mayores de P (Figura 3.4), estas no varían significativamente la lixiviación de éste nutriente entre los suelos. Similar al proceso de lixiviación del P, el $\text{NO}_3\text{-N}$ tampoco presentó una variación significativa, las concentraciones medias se ubican en torno a 1.1 mg/l para los Histosoles y 1.7 mg/l para los Andosoles.

3.3. Relación entre el caudal y la concentración de nutrientes.

El análisis de regresión entre el caudal y la concentración de nutrientes se realizó mediante el uso de cuatro modelos descritos anteriormente: lineal, logarítmico, exponencial e hiperbólico. La Tabla 2 presenta los resultados para la mejor correlación en cada microcuenca, definida por coeficiente de determinación. Esta tabla detalla además los casos en que los análisis de regresión y correlación fueron significativos ($p > 0.05$).

A partir de los resultados presentados en la Tabla 2 se puede inferir una relación positiva entre el TOC y el caudal. La mayoría de microcuencas presentaron correlaciones lineales con tendencias significativas de relación. Especialmente en caudales altos se observa una alta producción de éste elemento en comparación con los caudales medios y bajos. Similares



resultados fueron obtenidos por Bückner y col., (2011) y por Wilcke y col., (2001) en los que se evidencia un incremento de la concentración de TOC en caudales altos, en cuencas de bosque andinos con diferentes usos de suelo.

Vertedero	Coeficiente de determinación (r^2)				
	TOC	NO ₂ -N	NO ₃ -N	NH ₄	P
M1	0.13 ^{lg}	0.08 ^e	0.04 ^e	0.13 ^e	0.02 ^{lg}
M3	0.37 ^{l,a,b}	0.00	0.00	0.11 ^e	0.08 ^l
M5	0.44 ^{l,a,b}	0.01 ^{lg}	0.02 ^e	0.04 ^{lg}	0.23 ^{e,a}
M6	0.51 ^{l,a,b}	0.05 ^e	0.02 ^h	0.06 ^{lg}	0.04 ^l
M7	0.22 ^{l,a}	0.08 ^h	0.25 ^{l,a}	0.08 ^e	0.08 ^e
M9	0.13 ^e	0.06 ^{lg}	0.01 ^{lg}	0.07 ^e	0.29 ^{lg,a}
M10	0.38 ^{l,a,b}	0.00	0.11 ^l	0.01 ^h	0.06 ^e

l=ajuste lineal; e=exponencial; lg=logarítmico; h=hiperbólico

a= significativo coeficiente de regresión; b=significativo coeficiente de determinación

Tabla 2: Coeficientes de determinación entre el caudal y la concentración de cada nutriente en el mismo.

La positiva relación entre el caudal y la concentración de TOC permite relacionar la variación de éste elemento en función de la hidrología. Esta tendencia fue descrita por Salmon y col., (2001) como un efecto debido al mayor acceso hidrológico (“enhanced hydrological access”), o también denominado flujo pistón. Este flujo se define como el control presente en el aumento de la concentración de los nutrientes debido al aumento del caudal. Según Salmon y col., (2001), el flujo pistón se da principalmente en cuencas activas hidrológicamente durante periodos de altos caudales, desde los suelos superficiales. De esta manera, el efecto de éste proceso podría promover la lixiviación del TOC presente en los horizontes orgánicos (Watanabe & Ortega, 2011).

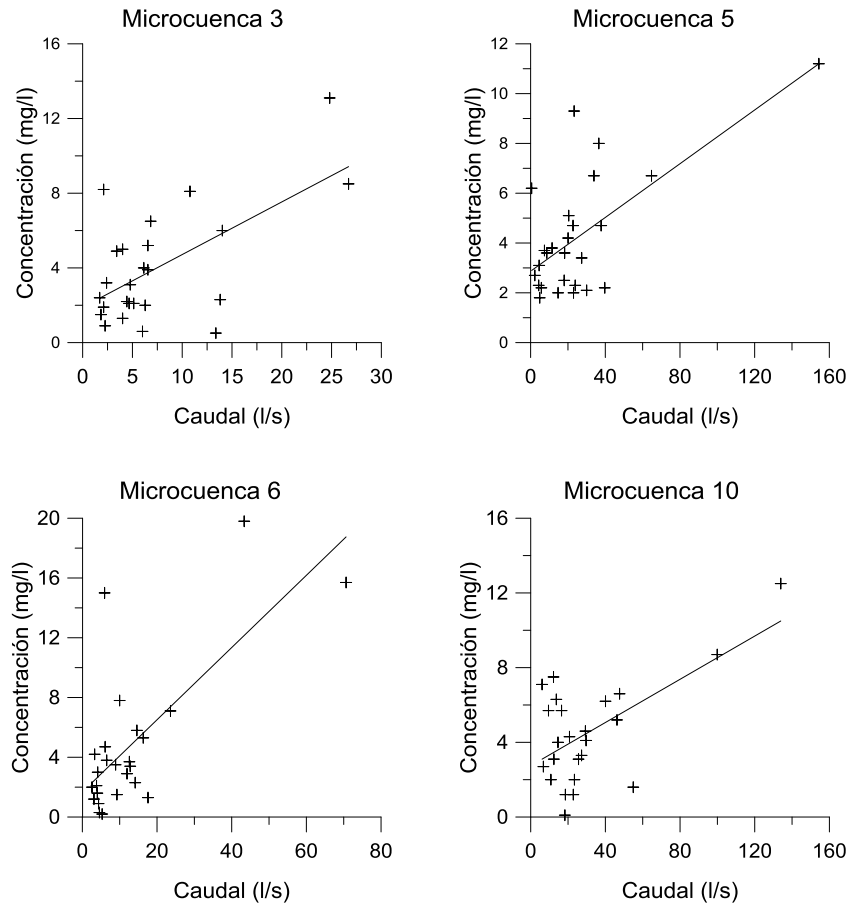


Figura 3.5: Relación entre caudal y concentración de TOC en M3, M5, M6 y M10.

Los demás elementos no presentaron relación significativa con el caudal (Tabla 2). A pesar de que el P no presentó una alta relación en toda la zona de estudio, dos de las microcuencas tuvieron variaciones negativas significativas (M5, M9), suponiendo un débil efecto de dilución. La ausencia de relación para las concentraciones de NO₂-N, NO₃-N Y NH₄, supone que no existe una relación entre la lixiviación de éstos nutrientes y el caudal. Estos resultados son diferentes a los obtenidos por Goller, (2004), que asoció los altos niveles de



NO₃-N y NH₄ con las altas condiciones de esorrentía, en especial en los periodos más húmedos.

Según Recha y col., (2013) y Salmon y col., (2001), la independencia de los elementos de N respecto al caudal se debe a un balance hidrológico en la producción de los mismos. Esta independencia puede ser similar en éste estudio debido a que no existe una temporada seca específica ya que las precipitaciones de altas intensidades ocurren de manera distribuida a lo largo del año. El análisis alternativo por tipos de flujo obtiene similares conclusiones a las expuestas anteriormente.

El segundo análisis mediante tipos de flujo determinó, en promedio para todas las microcuencas, un 25% de concentraciones obtenidas en flujos bajos, 70% en flujos medios y 5% en flujos altos. Los resultados muestran que las concentraciones de TOC en flujos altos varían significativamente de los caudales medios y bajos ($p < 0.009$). En todas las microcuencas se observó que la mediana de los flujos bajos y medios tuvo concentraciones entre 1.6 mg/l y 5.7 mg/l mientras que las concentraciones en flujos altos fueron siempre superiores a los 10 mg/l, excepto en M1 (6.5 mg/l). El efecto mencionado anteriormente en M1 podría deberse a su ubicación en la microcuenca y a su menor tamaño, lo que podría influenciar en la menor lixiviación de TOC en caudales altos.

El NO₂-N, NO₃-N, NH₄ y P no presentaron variación significativa respecto a los tipos de caudal definidos. Sin embargo, debido a la poca cantidad de datos en los caudales definidos como bajos y altos, es evidente la necesidad de monitorear las concentraciones en éstos eventos para así obtener resultados más concisos.



3.4. Coeficientes de ingreso y de exportación de nutrientes

Los coeficientes de ingreso anual (precipitación) se obtuvieron a partir del método VWMC, los mismos que se presentan en la Tabla 3. Similares estudios realizados en Ecuador reportan coeficientes de ingreso distintos a los obtenidos en este estudio para el DOC y NH₃-N, y similares para el caso del NH₄. Goller y col., (2006) reportó concentraciones de carbono orgánico disuelto (DOC) entre 4.0 mg/l y 4.5 mg/l, mientras que Wilcke y col., (2001) determinó concentraciones de 0.11 mg/l para el NH₄ y para el NO₃-N valores menores a los 0.2 mg/l.

	TOC	NO ₂ -N	NO ₃ -N	NH ₄	P
VWMC (mg/l)	2.116	0.005	1.872	0.117	0.052
Coeficiente Ingreso (kg/ha/año)	24.02	0.06	21.25	1.33	0.59

Tabla 3: VWMC y coeficiente de ingreso de nutrientes a través de la precipitación.

La Tabla 4 presenta los coeficientes de exportación, obtenidos mediante el método FWMC para las distintas microcuencas evaluadas en la zona de estudio. Se eligió este método debido a su aplicación generalizada y a que no se evidencia una correlación de ningún elemento en toda la cuenca (Schleppi y col. 2005).

Los resultados para los coeficientes de exportación de TOC y NH₄ son menores, y para el P y NO₃-N son mayores a los obtenidos por Boy y col., (2008) en bosques andinos. Los coeficientes que presenta este autor son: TOC, 39-71 kg/ha/año; NH₄, >1.2 kg/ha/año; NO₃-N, <1.4 kg/ha/año; y P, 0.34



kg/ha/año. Mientras que, en comparación con el estudio realizado por Borbor-Cordova y col., (2006) en la cuenca del Rio Guayas, las concentraciones de P en los caudales son similares en la mayoría de microcuencas. Este último autor presenta coeficientes de exportación entre 0.7 y 1.2 kg/ha/año para el P en la región con distintos tipos de ecosistemas y usos del suelo, entre los que el páramo tiene un 7% de cobertura.

		M1	M3	M5	M6	M7	M9	M10
FWMC (mg/l)	TOC	4.25	5.36	5.63	7.88	5.92	4.91	5.49
	NO2-N	0.002	0.005	0.004	0.002	0.002	0.003	0.004
	NO3-N	1.15	1.51	1.28	1.40	1.37	1.42	1.29
	NH4	0.017	0.035	0.037	0.020	0.026	0.021	0.029
	P	0.18	0.14	0.07	0.12	0.11	0.10	0.15
COEFICIENTE DE EXPORTACION (kg/ha/año)	TOC	25.67	32.37	34.00	47.59	35.76	29.64	33.17
	NO2-N	0.012	0.031	0.024	0.015	0.011	0.018	0.023
	NO3-N	6.96	9.10	7.71	8.45	8.25	8.59	7.80
	NH4	0.10	0.21	0.22	0.12	0.16	0.13	0.18
	P	1.10	0.82	0.40	0.71	0.68	0.58	0.88

TABLA 4: Coeficientes de Ingreso y exportación de TOC, P, NO2-N, NO3-N y NH4 en kg/ha/año.

3.5. Procesos de lixiviación

3.5.1. Lixiviación de TOC

La lixiviación del TOC presenta un incremento en su concentración en el paso a través de la zona de estudio. Esto se puede evidenciar comparando las concentraciones máximas y promedio de éste elemento en la precipitación y caudal. Las concentraciones máximas registradas en la precipitación (7.2 mg/l) fueron menores a las obtenidas en los suelos; Andosoles (11.3mg/l), Histosoles (19.9mg/l), y en los caudales (11.2-19.8 mg/l).



La lixiviación de TOC en los Andosoles es similar a las concentraciones de TOC por ingreso en la precipitación. Las concentraciones registradas son significativamente las mismas en comparación con las de la lluvia, a pesar de que valores ligeramente mayores se registraron en los Andosoles.

El incremento estacional de la concentración del TOC en los horizontes orgánicos de los Histosoles es la responsable de la mayor lixiviación de éste elemento, en comparación con los Andosoles. Los horizontes orgánicos de los dos tipos de suelos presentan similares concentraciones en los periodos de mayor precipitación. En cambio, en los periodos de menor precipitación, las diferencias son significativas entre los Andosoles e Histosoles, siendo las concentraciones mayores en éstos últimos. Las mayores concentraciones en los Histosoles, en las épocas menos lluviosas, se deben a las altas concentraciones de materia orgánica que presentan y a que se espera un efecto de dilución del TOC durante los periodos más húmedos (Likens & Bormann, 1995).

A más del efecto de estacionalidad que presentan los horizontes orgánicos de los Histosoles, los suelos mencionados se ven afectados por las intensas precipitaciones. La semana que presentó la mayor precipitación diaria (3-ene-2013; 26m) registró la mayor concentración de TOC en éstos horizontes (>18.5 mg/l). De manera similar, la segunda mayor precipitación diaria (20-may-2013; 19mm) registro en esa semana una concentración de 16.9 mg/l en el primer horizonte y 11.3 mg/l. Por lo tanto, la lixiviación de TOC en los Histosoles aumenta considerablemente en eventos irregulares de precipitación de altas intensidades. Este efecto no se observó en los de los Andosoles, por lo que los procesos de lixiviación en los dos suelos son diferentes.

Los eventos inusuales de alta precipitación también afectan las concentraciones de TOC en el caudal. En la zona de estudio es evidente una



alta concentración de TOC en el caudal asociada a la mayor precipitación diaria (4-ene-2013). En éste evento las concentraciones en toda la microcuenca fueron superiores a los 10 mg/l (Figura 3.6). La semana de mayor precipitación (22/05/2013) también presentó en toda la cuenca concentraciones superiores a los 4 mg/l. Esta alta lixiviación debida a altos periodos de precipitación se debe a que en la zona de estudio la respuesta del caudal a la precipitación es rápida (Mosquera y col., 2012) y a la influencia que presentan los Histosoles en la lixiviación de éste nutriente.

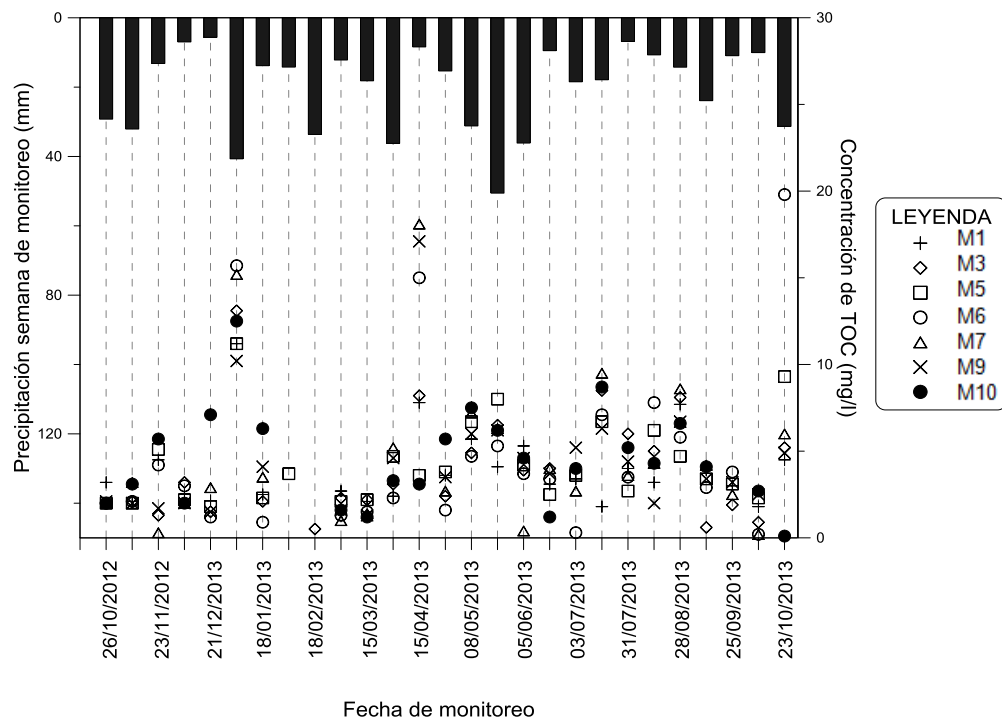


Figura 3.6: TOC (mg/l) en el caudal y precipitación semanal correspondiente solamente a las fechas de monitoreo (mm).

Los porcentajes de Andosoles e Histosoles presentes en las microcuencas podrían influenciar la lixiviación del TOC en los caudales. Los coeficientes de exportación presentados en la Tabla 4 muestran que M1, la microcuenca con

mayor porcentaje de Andosoles (85%), presenta los menores coeficientes de salida de TOC. Mientras tanto M6, que presenta un alto contenido de Histosoles (50%), presenta el mayor coeficiente de salida de éste nutriente. Esta correlación no es válida para M5 (63% de Histosoles), sin embargo se debe considerar que otros factores afectarían el comportamiento de la misma, pues es la única que no presenta actividad humana, la pendiente media es la menor y tiene el mayor porcentaje de cobertura vegetal de plantas denominadas en cojín o almohadillas. El análisis de correlación demuestra lo expuesto anteriormente como se puede observar en la Figura 3.7.

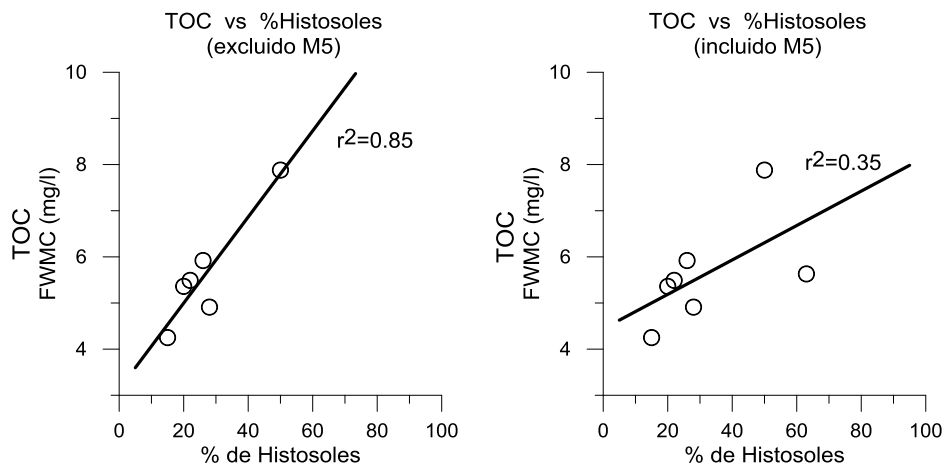


Figura 3.7: Análisis de correlación entre el FwMC del TOC (mg/l) y la presencia de Histosoles en las microcuencas.

El coeficiente de salida al final de la zona de estudio (M9) concuerda con la afirmación de la influencia de los Histosoles en la lixiviación de TOC en los caudales. El coeficiente en M9 es menor a los de M6 y M7, principales afluentes de la misma, debido a que el porcentaje de Histosoles que influye exclusivamente a la misma (0.32 km²) es menor al de los Andosoles (2.13 km²).



3.5.2. Lixiviación de P

La lixiviación de P es similar entre la precipitación y los suelos. Este proceso muestra similares concentraciones medias producidas en la lluvia y en los horizonte de Andosoles e Histosoles (0.05 - 0.07 mg/l). Esto se debe a que el ciclo del P presenta bajas producciones en ecosistemas terrestres (Macrae, 2004). Además los eventos de precipitación de altas intensidades no muestran una variación en las concentraciones de P en los suelos.

A pesar de que las concentraciones medias de P en el caudal (0.07-0.18 mg/l) aumentan ligeramente en comparación con las registradas en los suelos, esta variación no es significativa. Por lo tanto, no se puede asegurar una variación significativa en la producción de P en la zona de estudio. La lixiviación de P presenta además bajas concentraciones, las mismas que no ocasionan riesgo ambiental alguno (Recha, et al., 2013).

Respecto al efecto de las precipitaciones de altas intensidades, estas no presentaron variación o relación con las concentraciones de P en los caudales. La variación estacional del P tampoco afecta los coeficientes de exportación. Como se observa en la Tabla 4, los coeficientes de las cuencas que presentaron variación estacional significativa (M3, M5, M6 y M7) son similares a las que no presentaron tal efecto.

Las microcuencas con mayor contenido de Andosoles presentan mayores coeficientes de exportación. Las microcuencas M1, M3 y M10 contienen en más del 78% de su área Andosoles (Tabla 1), obteniéndose en estas coeficientes mayores a 0.82 kg/ha/año (Tabla 6), mientras que en la microcuenca que menores porcentajes de Histosoles se encuentran (M5, 37%) el coeficiente disminuye a 0.4 kg/ha/año. El análisis de correlación entre el porcentaje de Andosoles y los coeficientes de P presenta una significativa



correlación con un coeficiente de determinación igual a 0.6. Por lo tanto en la zona de estudio, la presencia de Andosoles en las microcuencas se relaciona con los coeficientes de exportación de P.

3.5.3. Lixiviación de NH_4

Las mayores concentraciones de NH_4 se presentan en la precipitación con una considerable disminución en los suelos, tanto en sus concentraciones medias como máximas. Las concentraciones medias de éste nutriente disminuyen: precipitación>Histosoles>Andosoles, desde valores medios de 0.117 mg/l en la lluvia hasta a 0.09 mg/l en el segundo horizonte de los Histosoles y 0.04 mg/l en los demás horizontes de éste suelo y 0.01 mg/l en los Andosoles. La variación entre la precipitación y los suelos, tanto en Andosoles como en Histosoles es significativa.

Debido a la variación de la concentración de NH_4 en la precipitación, en relación con los suelos y el caudal, y considerando que el ciclo del N es altamente dinámico en suelos húmedos y con altos contenidos orgánicos (Silver y col., 2010) una rápida oxidación o nitrificación de NH_4 en $\text{NO}_3\text{-N}$ en el suelo es posible (Wilcke y col., 2001). Además de que para éste elemento se espera una rápida dilución en los caudales (Likens & Bormann, 1995).

Los caudales presentaron similares concentraciones que las de los Histosoles, encontrándose las mismas entre 0.037 mg/l y 0.021 mg/l. Aunque los porcentajes del tipo de suelo presente en cada microcuenca no afectan las concentraciones de NH_4 en los caudales, se puede observar que las concentraciones de este elemento son similares a las de los Histosoles y mayores a las de los Andosoles. Por lo tanto, los Histosoles podrían ser los responsables de la lixiviación de NH_4 hacia los caudales.



3.5.4. Lixiviación de NO₂-N y NO₃-N

El NO₂-N y NO₃-N fueron los elementos que mayor independencia presentaron en la zona de estudio respecto a la estacionalidad, precipitación y caudal. La precipitación no presentó relación entre la cantidad registrada semanalmente y la concentración de éstos nutrientes en la lluvia, suelos o caudal. Tampoco se detectó un efecto de estacional para éstos nutrientes ni relación significativa entre el caudal y su concentración. Por lo tanto, basados en esta independencia, se puede definir a la lixiviación de éstos nutrientes como un proceso hidrológicamente constante e independiente (Salmon y col., 2001).

Aunque la concentración en la lixiviación de NO₂-N varía estadísticamente entre los Andosoles e Histosoles, estas concentraciones son bajas y similares a las obtenidas en la precipitación y caudal (Tabla 3 y Tabla 4). Este resultado es esperado en el proceso de lixiviación de NO₂-N en comparación con el proceso del NO₃-N, por lo que en los estudios que involucran nutrientes se prioriza el análisis del segundo elemento (Ji, 2008). Como se puede observar en la zona de estudio, las concentraciones de NO₂-N estuvieron por lo general cercanas al límite de detección y los máximos valores registrados fueron menores a 0.035 mg/l. La similitud entre las concentraciones de éste elemento en los diferentes horizontes y suelos analizados no permite identificar de manera concisa las principales fuentes del mismo para los caudales.

Las concentraciones medias de lixiviación de NO₃-N son similares en la precipitación (1.872 mg/l) y en los horizontes orgánicos y minerales de los Andosoles e Histosoles. A pesar de que la precipitación presenta una concentración media (1.872 mg/l) mayor a los Andosoles (1.7 mg/l), Histosoles (1.1 mg/l) y caudales (1.15 - 1.51 mg/l) estadísticamente esta variación no es significativa ($p > 0.07$). Por lo tanto, la lixiviación de este elemento no varía hacia los cauces no tiene un origen definido



CAPITULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La presente tesis tuvo como objetivo determinar el proceso de la lixiviación de TOC, NO₂-N, NO₃-N, NH₄ y P en una cuenca de páramo andino. Esta investigación a más de establecer una línea base de las concentraciones esperadas para éstos nutrientes, permite identificar los principales factores que influyen en el transporte de nutrientes a través del agua.

Debido a que anteriormente no se han realizado estudios similares en éste ecosistema, esta investigación es un importante aporte para el entendimiento de los ciclos de los nutrientes y su relación con la hidrología de la zona de estudio. Los resultados presentan significativas diferencias en la lixiviación de nutrientes, en comparación con otros ecosistemas de la región. En base a los resultados presentados se puede concluir lo siguiente:

- a) La precipitación no presenta variación estacional en su concentración de nutrientes a pesar de que en la zona de estudio la influencia de masas de aire del Pacífico y Atlántico es evidente. Lo anterior es debido a que la variación temporal de la precipitación no es marcada.
- b) Los Histosoles y caudales están asociados con los altos eventos de precipitación que ocurren en la zona de estudio. Las precipitaciones de mayor intensidad producen altas tasas de lixiviación de TOC en los Histosoles y en el caudal. Las semanas con mayores cantidades de lluvia presentaron las máximas concentraciones registradas de éste nutriente en los horizontes orgánicos de estos suelos y en todos los caudales de la microcuenca.



- c) Los Histosoles y Andosoles presentan diferentes lixiviaciones de TOC. Las mayores concentraciones se registran en los Histosoles, influenciadas por la variabilidad estacional de sus horizontes y por su alto contenido de materia orgánica. Además, la lixiviación de éste elemento es distinta entre sus horizontes orgánicos y el mineral, siendo mayor en los primeros.
- d) La concentración de nutrientes en el caudal se correlaciona con la cantidad de agua presente en los mismos solamente para el TOC. Específicamente para éste nutriente, los caudales definidos como altos son los que mayores concentraciones presentan diferentes a los caudales medios y bajos. Este efecto, denominado flujo pistón, puede asociarse al TOC. En cambio, para los demás nutrientes se descartó una correlación significativa con la cantidad de agua producida en los cauces, descartando así el efecto de dilución esperado para el P.
- e) Los porcentajes de tipo de suelo presentes en las microcuencas se correlacionan a las concentraciones de P y TOC. Las cuencas con mayor contenido de Andosoles presentan mayores lixiviaciones de P en el caudal mientras que las que contienen mayores Histosoles presentan altas concentraciones de TOC. Por lo que el origen de estos elementos en los caudales podría depender del tipo de suelo presente en las microcuencas.
- f) Los procesos de lixiviación del $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ presentan una clara independencia con la cantidad de precipitación y con los caudales. Las concentraciones de éstos nutrientes son similares en la precipitación, caudal y en los suelos, tanto en sus horizontes orgánicos como minerales, por lo que la lixiviación de éstos



elementos no presenta variación en su paso a través del ecosistema estudiado.

- g) La variación en la concentración de NH_4 entre la precipitación y los suelos se debe posiblemente a una rápida oxidación del mismo, especialmente en los Andosoles. Este proceso podría ser mayor en los horizontes de los Andosoles debido a la diferencia con los Histosoles en su contenido de humedad y de materia orgánica. Además, y en base a lo anterior, se puede establecer que la concentración de NH_4 en los caudales está relacionada de mayor manera con los Histosoles.

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda para futuros estudios que involucren la lixiviación de nutrientes en el páramo un estudio más exhaustivo de la influencia de la precipitación en éste proceso. Estos estudios deberían contar con un análisis del efecto de la neblina en el ingreso atmosférico ya que éste proceso podría tener especial influencia en el páramo. Otro proceso importante a estudiar es el efecto que tiene el flujo a través del dosel en los diferentes bosques presentes en el páramo, tanto de manera natural como el bosque de polylepis o de manera introducida como el pino.

A más de la importancia de mantener a largo plazo el monitoreo de nutrientes en el páramo, pues permitirá corroborar los resultados obtenidos y establecer rangos esperados de coeficientes anuales, es evidente la necesidad de estudiar el efecto que tiene la precipitación con altas intensidades y los altos caudales producidos a las salidas de las microcuencas. Lo anterior permitirá reconocer el efecto de las drásticas variaciones de éstos eventos en el proceso de lixiviación de nutrientes.



CAPITULO 5. BIBLIOGRAFIA

Alexander, R., Boyer, E., Smith, R., Schwartz, G., & Moore, R., 2007. The Role of Headwater Streams in Downstream Water Quality. *Journal of the American Water Resources Association*, 43(1), pp. 41-59.

American Public Health Association (APHA), the American Water Works Association (AWWA), the Water Environment Federation (WEF), 1999. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22 ed. Edición: Rice, E., Baird, R., Eaton, A., Ciesceri, L .,

Beiderwieden, E., Wrzesinsky, T., & Klemm, O., 2005. Chemical characterization of fog and rain water collected at the eastern Andes Cordillera. *Hydrology and earth system science*, Volume 9, pp. 185-191.

Boll, J., Selker, J.S., Nijssen, B.M., Steenhuis, T.S., Van Winkle, J., Jolles, E., 1991. Water quality sampling under preferential flow conditions. In: Allen, R.G., Howell, T.A., Pruitt, W.O., Walter, I.A., Jensen, M.E. (Eds.). *Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements*, American Society of Civil Engineers, New York, pp. 290–298.

Boll, J., Steenhuis, T. S., Selker, J. S., 1992. Fiberglass Wicks for Sampling of Water and Solutes in the Vadose Zone. *Soil Science Society of America Journal*. Volume 56, pp. 701–707.

Borbor-Cordova, M., Boyer, E., McDowell, W., & Hall, C., 2006. Nitrogen and phosphorus budgets for a tropical watershed impacted by agricultural land use: Guayas, Ecuador. *Biogeochemistry*, Volume 79, pp. 135-161.

Borja, P., Iñiguez, V., Crespo, P., Feyen, J., & Cisneros, F., 2009. Andosoles e Histosoles de la región de Páramo del Austro Ecuatoriano., Loja: Paramundi, II congreso mundial de páramos.

Bormann, F., & Likens, G., 1967. Nutrient Cycling. *Science*, 155(3761), pp. 424-429.

Boy, J., Valarezo, C., & Wilcke, W., 2008. Water flow paths in soil control element exports in an andean tropical montane forest. *European Journal of Soil Science*, Volume 59, pp. 1209-1227.



Brown, K.W., Thomas, J.C., Holder., M.W., 1986. Development of a capillary wick unsaturated zone water sampler. U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Monitoring Systems Laboratory, Las Vegas, NV, Cooperative Agreement CR812316-01-0.

Brown, A., Zhang, L., & McMahon, T., 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yields resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, Volume 310, pp. 28-61.

Bücker, A., Crespo, P., Frede, H.-G., & Breuer, L., 2011. Solute behavior and export rates in neotropical montane catchments under different land-uses. *Journal of Tropical Ecology*, 27(3), pp. 305-317.

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*, pp. 79, 53-72.

Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., De Bièvre, B., & Wyseure, G., 2006b. Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, Volume 329, pp. 413-421.

Buytaert, W., Iñiguez, V., Celleri, R., De Bièvre, B., Wyseure, G., & Deckers, J., 2006c. Analysis of the water balance of small paramo catchments in South Ecuador. *Environmental Role of Wetlands in Headwaters*, pp. 271-278.

Buytaert, W., Iñiguez, V., & De Bièvre, B., 2007. The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest Ecology and Management*, 251(1), pp. 22-30.

Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Feyen, J., Iñiguez, V., Borja, P., & De Bievre, B., 2010. Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems. *IAHS Red Books* 336.

Crespo, P., Feyen, J., Buytaert, W., Bucker, A., Breuer, L., Frede, H.-G., & Ramírez, M., 2011. Identifying controls of the rainfall–runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology*, Volume 407, pp. 164-174.

Dann, M., Lynch, J., & Corbett, E., 1986. Comparison of Methods for Estimating Sulfate Export from a Forested Watershed. *Journal of Environmental Quality*, Volume 15, pp. 140-145.



De Bièvre, B., Iñiguez, B., & Buytaert, W., 2012. Hidrología del páramo: Importancia propiedades y vulnerabilidad. Colombia tiene páramos, Issue 2, pp. 93, 9-27.

Díaz-Granados, M., Navarrete, J., & Suárez, T., 2005. Páramos: Hidrosistemas Sensibles. Revista de Ingeniería, pp. 64-75.

FAO/ISRIC/ISSS, 1998. World Reference Base for Soil Resources. En: World Soil Resources Report. Rome: FAO.

Freeman, M., Pringle, C., & Jackson, R., 2007. Hydrologic Connectivity and the contribution of stream headwaters to ecological integrity at regional scales. Journal of the American Water Resources Association, 43(1), pp. 5-14.

Goller, R., 2004. Biogeochemical Consequences of Hydrologic conditions in a tropical montane rain forest in Ecuador. Ph. D. thesis, Fakultät Biologie/Chemie/Geowissenschaften der Universität Bayreuth.

Goller, R., Wilcke, W., Fleischbein, K., Valarezo, C., & Zech, W., 2006. Dissolved nitrogen, phosphorus, and sulfur forms in the ecosystem fluxes of a montane forest in Ecuador. Biogeochemistry, Volume 77, pp. 57-89.

Gualpa, M., 2013. Efecto de la incertidumbre de las observaciones hidrometeorológicas en estudios hidrológicos (Zhurucay, Soldados y Mazar). Tesis de Ing. Civil, Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería.

Hattermann, F., Krysanova, V., Habeck, A., Bronstert, A., 2006. Integrating wetlands and riparian zones in river basin modelling. Ecological modelling, volume 199 (4), pp. 379-392.

Heatwaite, L., 1995. Sources of eutrophication: hydrological pathways of catchment nutrient export. Man's Influence on Fresh water Ecosystems and Water Use, Volume 230, pp. 161-175.

Helsel, D., & Hirsch, R. M., 2002. Statistical Methods in Water Resources. En: Book 4, chapter A3. U.S. Geological Survey., p. 522.

Hofstede, R., Segarra, P., & Mena, P., 2003. Los páramos del mundo. Quito: Proyecto Atlas Mundial de los Páramos.



Knutson, J.H., Lee, S.B., Zhang, W.Q., Selker, J.S., 1993. Fiberglass wick preparation for use in passive capillary wick soil pore-water samplers. *Soil Science Society of America Journal*, Volume 57, pp. 1474–1476.

Ji, Z.-G., 2008. *Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes, and estuaries*. Mexico: Wiley.

Johnson, N., Likens, G., Bormann, F., Fisher, D., & Pierce, R., 1969. A working model for the variation of stream water chemistry at the Hubbard Brook Experiment Forest, New Hampshire. *Water Resources Research*, 5(6), pp. 1353-1363.

Landon, M.K., Delin, G.N., Komor, S.C., & Regan, C.P., 1999. Comparison of the stable-isotopic composition of soil water collected from suction lysimeters, wick samplers, and cores in a sandy unsaturated zone. *Journal of Hydrology*, Volume 224, 45–54.

Likens, G.E. & Bormann, F.H. (1995) *Biogeochemistry of a forested ecosystem*, 2nd edn. Springer, New York, 159p.

Montgomery, D., & Runger, G., 2002. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. Third Edition ed. John Wiley & Sons.

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 y oxígeno-18. *Maskana*, 3(2), pp. 87-105.

Padrón, R., 2013. *Análisis de la estructura de lluvia de páramo*. Tesis de Ing. Civil, Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería.

Podwojewski, P., & Poulenard, J., 2000. Los suelos de los Páramos del Ecuador. *Los Suelos del Páramo*, Volume Serie Páramo 5, pp. 75, 7-26.

Recha, J., Lehmman, J., Todd, W., Pell, A., Verchot, L., & Johnson, M., 2013. Stream water nutrient and organic carbon exports from tropical headwater catchments at a soil degradation gradient. *Nutrient Cycle Agroecosystem*, 95(2), pp. 145-158.

Rollenbeck, R., & Bendix, J., 2010. Spatial and temporal dynamics of atmospheric water and nutrient inputs in tropical mountain forest of southern Ecuador. *Hydrological Processes*, 25(3), pp. 344-352.



Salmon, C., Todd, W., Hedin, L., & Brown, M., 2001. Hydrological controls on chemical export from an undisturbed old-grown Chilean forest. *Journal of Hydrology*, Volume 253, pp. 69-80.

Schleppi, P., Waldner, P., & Stahl, M., 2005. Error of flux integration methods for solutes in grab samples of runoff water, as compared to flow-proportional sampling. *Journal of Hydrology*, Volume 319, pp. 1-16.

Semkin, R., Jeffries, D., & Clair, T., 1994. Hydrochemical Methods and Relationships for Study of Stream Output from Small Catchments. En: B. Moldan & J. Cerný, eds. *Biogeochemistry of Small Catchments: A Tool for Environmental Research*. Scope, pp. 163-187.

Shapiro, J., & Wilk, M., 1965. An analysis of variance test for normality. *Biometrika*, 52(3/4), pp. 591-611.

Silver, W., Thompson, A., Herman, D. & Firestone, M., 2010. Is there evidence for limitations to nitrogen mineralization in upper montane tropical forest. En: L. Bruijnzeel, F. Scatena & L. Hamilton, eds. *Tropical Montane Cloud Forest: Science for Conservation and Management*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 418-427.

Smakhtin, V., 2001. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, Volume 240, pp. 147-186.

Soethe, N., Lehmann, J., & Engels, C., 2008. Nutrient availability at different altitudes in a tropical montane forest in Ecuador. *Journal of Tropical Ecology*, Volume 24, pp. 397-406.

StatSoft, 2004. *Statistica 7.0*. Tulsa, Oklahoma, USA.

The Hach Company, 2009. *DR/890 Colorimeter Procedures Manual*. 9 ed. Hach Company.

Ullah, S. & Zinati, G., 2006. Denitrification and nitrous oxide emissions from riparian forests soils exposed to prolonged nitrogen runoff. *Biogeochemistry*, Volume 81 (3), pp. 253-267.

Vuille, M., Bradley, R., & Keimig, F., 2000. Climate Variability in the Andes of Ecuador and Its Relation to Tropical Pacific and Atlantic Sea Surface Temperature Anomalies. *Journal of Climate*, Volume 13, pp. 2520-2535.



Walsh, R., & Lawler, D., 1981. Rainfall seasonality: description, spatial patterns and change through time. *Weather*, Volume 36, pp. 201-208.

Watanabe, M., & Ortega, E., 2011. Ecosystem services and biogeochemical cycles on a global scale: valuation of water, carbon and nitrogen processes. *Environmental Science & Policy*, 14(6), pp. 594-604.

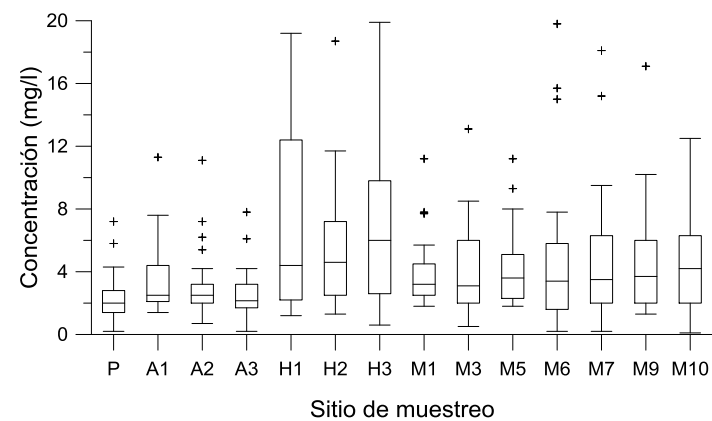
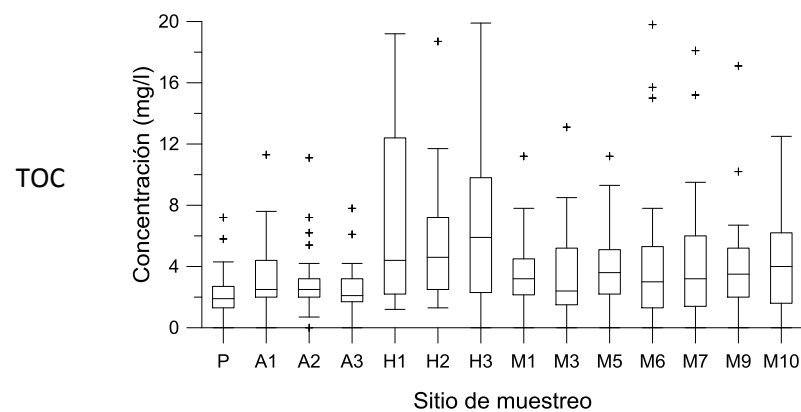
Wilcke, W., Yasin, S., & Valarezo, C., 2001. Change in water quality during the passage through a tropical montane rain forest in Ecuador. *Biogeochemistry*, Volume 55, pp. 45-72.

ANEXOS

ANEXO 1: Diagramas de caja estándar para el análisis de valores extremos y outliers.

Resultados para las concentraciones de nutrientes
obtenidas en laboratorio

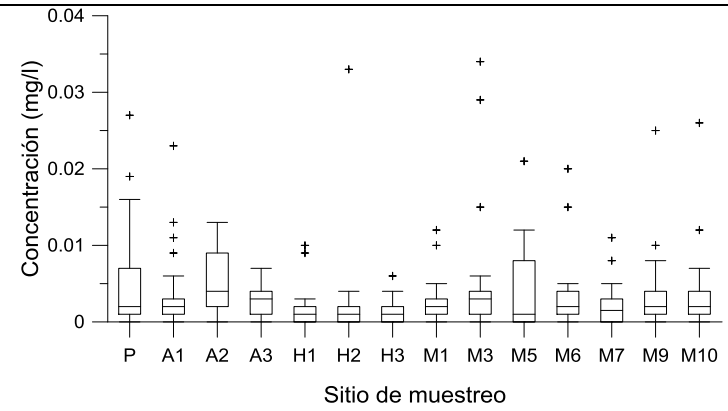
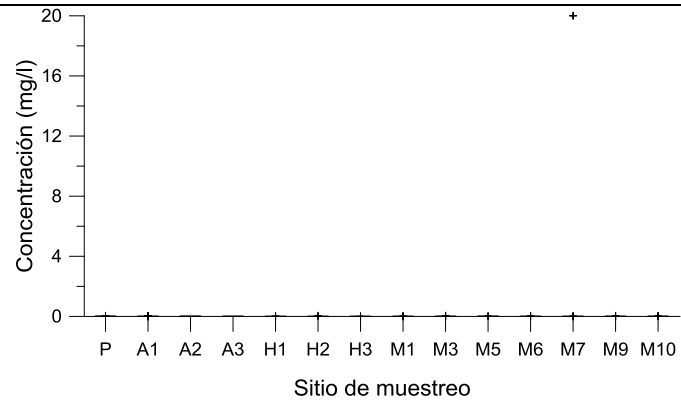
Resultados utilizados en el análisis



NO2-N



UNIVERSIDAD DE CUENCA



NO₃-N

