

UNIVERSIDAD DE CUENCA



Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

Efectos de los controladores hidrometeorológicos en la concentración del carbono orgánico disuelto (COD) en el agua de suelo y río de una cuenca de Páramo andino

Trabajo de Titulación Previo a la Obtención
del Título de Ingeniero Ambiental

Autores:

Samuel Eli De Mera Rodríguez

CI: 1311643017

Correo electrónico: sedr260496@gmail.com

Mateo Josué Jerves Ramírez

CI: 0106742901

Correo electrónico: mateo.jervesramirez@gmail.com

Tutor:

Ing. Patricio Javier Crespo Sánchez, PhD.

CI: 0102572773

Asesor:

Ing. Juan Patricio Pesántez Vallejo, MSc.

CI: 0104894530

Cuenca-Ecuador

13-noviembre-2020



Resumen

El ecosistema de Páramo es de vital importancia para las comunidades alto-andinas, debido a su capacidad de almacenamiento de agua, capacidad que se atribuye en parte al contenido de carbono en sus suelos. Esta propiedad podría alterarse por cambios en las características del suelo, variables hidrometeorológicas y paisajísticas. A pesar de lo anterior, existe poca información sobre la dinámica del carbono en este ecosistema. Por este motivo en este estudio se analizó la influencia de los controladores hidrometeorológicos sobre la concentración de COD en el agua de suelo y río de una cuenca de Páramo andino. Para este fin, se realizó: un análisis temporal, análisis de correlación, análisis discriminante por las condiciones de caudal y un análisis de tipo de dispersión entre los parámetros hidrometeorológicos medidos y la concentración de COD en el agua de suelo y río. La cuenca de estudio (cuenca del río Zhuruca) se encuentra al sur del Ecuador a 85 km al suroeste de la ciudad de Cuenca, donde opera el Observatorio Ecohidrológico Zhuruca. Esta cuenca tiene un área de 3.28 Km² con un rango altitudinal entre los 3656 y 3917 m s.n.m. y una distribución de la precipitación relativamente uniforme a lo largo del año con un volumen de lluvia de alrededor de los 1200 mm al año. Se observó que la concentración de COD tuvo una variación asociada a las épocas de mayor y menor precipitación en agua de río, mientras que para el agua de suelo no se observa una variabilidad ligada a la precipitación. Sin embargo, cuando se analizó el efecto de las variables hidrometeorológicas se encontró que la precipitación, evapotranspiración y el caudal fueron las variables con mayor influencia en la dinámica de COD para todos los compartimentos estudiados. En conclusión, el mayor controlador de la concentración de COD en el ecosistema de Páramo es la precipitación, la cual está estrechamente ligada con el caudal. Ambas variables pueden ser significativamente influenciadas por factores de cambio climático y de cambio de uso de suelo por lo que la concentración de COD puede ser un indicador inicial de estos cambios.

Palabras Clave: Páramo Andino. Carbono orgánico disuelto. COD. Agua de suelo. Controladores de carbono orgánico disuelto.



Abstract

The Páramo ecosystem has high importance for High-Andean communities, because its capacity of storage water, capacity attributed in part to the high content of carbon in the soils. This property could be altered by changes in the soils characteristics, hydrometeorology and landscape variables. Despite the above, there is low information about the carbon dynamics in this ecosystem. For this reason, in this study we analyze the influence of hydrometeorological Dissolved Organic Carbon (DOC) concentration controls on the soil and stream water in an Andean Páramo catchment. For this purpose, a temporal, correlation and discriminant analysis by flow conditions and a dispersion type analysis between the measured hydrometeorological parameters and the concentration of DOC in the soil and flow water was carried out. The study catchment (Zhuruca river catchment) is located in southern Ecuador, 85 km southwest of the city of Cuenca, where the Zhuruca Ecohydrological Observatory has been established. This catchment has an area of 3.28 Km² with an altitude range between 3656 and 3917 m a.s.l. and a relatively uniform precipitation distribution throughout the year with a rainfall volume of around 1200 mm per year. It was observed that the DOC concentration had a variation related to the precipitation for stream water, while in soil water no variability linked to precipitation was observed. However, when the effect of the hydrometeorological variables was analyzed, it was found that precipitation, evapotranspiration and streamflow were the variables with the greatest influence on DOC dynamics for all the studied compartments. In conclusion, the greatest controller of DOC concentration in the Páramo ecosystem is precipitation, which is closely related to streamflow. Both variables can be significantly influenced by climate change and land use changes, so the COD concentration can be an initial indicator of these changes.

Keywords: Andean Páramo. Dissolved organic carbon. DOC. Soil water. DOC controllers.



Índices

Índice de Contenido

Resumen.....	2
Abstract.....	3
1. Introducción	15
2. Marco Teórico	17
3. Metodología	20
3.1. Descripción área de estudio	20
3.2. Monitoreo, muestreo y análisis de muestras.....	21
3.3. Análisis de información	22
3.3.1. Análisis de la variabilidad temporal de COD en agua de suelo y río en una cuenca de Páramo andino.	23
3.3.2. Análisis de que variables hidrometeorológicas tienen un efecto como controladoras de las concentraciones de COD en agua de suelo y río.....	23
3.3.3. Análisis de cómo influyen los controladores hidrometeorológicos en las concentraciones de COD en agua de suelo y río.	24
4. Resultados y discusión	25
4.1. Análisis de la variabilidad temporal de COD en agua de suelos y río.....	25
4.1.1. Variabilidad temporal de COD en el agua de río.....	25
4.1.2. Variabilidad temporal de COD en el agua de suelo Histosol y Andosol	27
4.2. Análisis de las variables hidrometeorológicas como controladores de las concentraciones de COD en agua de suelos y río.....	30
4.2.1. Análisis de la relación entre el caudal y la concentración de COD en agua de suelos y río por condiciones de caudal.....	30
4.2.2. Relación entre las variables hidrometeorológicas y la concentración de carbono orgánico disuelto en agua de río.	34
4.2.3. Relación entre las variables hidrometeorológicas y la concentración de carbono orgánico disuelto en agua de suelo Histosol.....	39
4.2.4. Relación entre las variables hidrometeorológicas y la concentración de carbono orgánico disuelto en agua de suelo Andosol.....	46



5. Conclusiones	50
6. Recomendaciones	52
7. Bibliografía	53



Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de área de estudio 20

Figura 2. Serie de tiempo de la concentración de COD en el agua de río con la precipitación y el caudal específico 26

Figura 3. Serie de tiempo de la concentración de COD en agua suelo Histosol y Andosol con la precipitación 29

Figura 4. Curva de no excedencia de caudales para la microcuenca de estudio 31

Figura 5. Diagramas de cajas de la concentración de COD para la microcuenca del río Zhurucay en agua de río y agua de suelo Histosol y Andosol, bajo diferentes condiciones de caudal 32

Figura 6. Relación de la concentración de COD y las variables hidrometeorológicas en agua de río por correlación bajo diferentes condiciones de caudal 37

Figura 7. Relación de la concentración de COD y las variables hidrometeorológicas en agua de suelo Histosol 42

Figura 8. Relación de la concentración de COD y las variables hidrometeorológicas en agua de suelo Andosol 48

Índice de Tablas

Tabla 1. Número de observaciones de COD por condiciones de caudal analizada en cada compartimento. 31

Tabla 2. Comparaciones por pares usando la prueba de Suma de rangos de Wilcoxon entre las diferentes condiciones de caudal con la concentración de COD en el agua de río. 33

Tabla 3. Comparaciones por pares usando la prueba de Suma de rangos de Wilcoxon entre las diferentes condiciones de caudal con la concentración de COD en el agua de suelo Histosol y Andosol..... 34

Tabla 4. Resultados regresión COD - variables hidrometeorológicas en agua de río.. 35

Tabla 5. Resultados regresión COD – variables hidrometeorológicas en agua de suelo Histosol 40

Tabla 6. Resultados regresión COD - variables hidrometeorológicas en agua de suelo Andosol 46



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Samuel Eli De Mera Rodríguez en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Efectos de los controladores hidrometeorológicos en la concentración del carbono orgánico disuelto (COD) en el agua de suelo y río de una cuenca de Páramo andino", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

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

Cuenca, 13 de noviembre de 2020

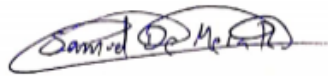
Samuel Eli De Mera Rodríguez

C.I: 1311643017

Cláusula de Propiedad Intelectual

Samuel Eli De Mera Rodríguez, autor/a del trabajo de titulación “Efectos de los controladores hidrometeorológicos en la concentración del carbono orgánico disuelto (COD) en el agua de suelo y río de una cuenca de Páramo andino”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 13 de noviembre de 2020



Samuel Eli De Mera Rodríguez

C.I: 1311643017



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Mateo Josué Jerves Ramírez en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Efectos de los controladores hidrometeorológicos en la concentración del carbono orgánico disuelto (COD) en el agua de suelo y río de una cuenca de Páramo andino", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

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

Cuenca, 13 de noviembre de 2020

Mateo Josué Jerves Ramírez

C.I: 0106742901



Cláusula de Propiedad Intelectual

Mateo Josué Jerves Ramírez, autor/a del trabajo de titulación “Efectos de los controladores hidrometeorológicos en la concentración del carbono orgánico disuelto (COD) en el agua de suelo y río de una cuenca de Páramo andino”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 13 de noviembre de 2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Mateo Jerves', written over a horizontal line.

Mateo Josué Jerves Ramírez

C.I: 0106742901



Agradecimientos

Agradezco al Ing. Patricio Crespo, PhD. por su guía en este trabajo de titulación, además al Ing. Juan Pesántez, MSc. por sus consejos y ayuda en cualquier duda durante la realización de este trabajo. A mis padres y hermanos, que siempre estuvieron para brindarme su apoyo en cada momento, enseñándome a ser paciente y aprender de mis errores para cumplir mis sueños. A mis mejores amigos, David y Michael, por motivarme a ser mejor en cada aspecto de mi vida y enseñarme que el esfuerzo en tus proyectos siempre traerá cosas positivas. A mis amigos en Cuenca, por apoyarme, acompañarme y ser un pilar fundamental en este logro. A mi compañero de tesis, Mateo, por soportar las tardes de aprendizaje intenso y por las risas que nunca faltaron. A Melissa, por escucharme, apoyarme, brindarme otro punto de vista a los problemas y viajar desde México para celebrar con nosotros. Finalmente, y de manera especial a mi mejor amiga Katherine, por darme consejos en los momentos difíciles desde el colegio, por visitarme, por darme su apoyo incondicional y ese impulso para hacerla sentir orgullosa del amigo que tiene.

Samuel De Mera Rodríguez



Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mis padres, por su apoyo, dedicación, paciencia y motivación que me han brindado toda mi vida, pues sin ellos este logro no habría sido posible.

Samuel De Mera Rodríguez



Agradecimiento

Agradezco al Ing. Juan pesantez por su guía y consejos durante la realización de este trabajo, y de igual manera al Ing. Patricio Crespo por permitirme ser parte de este proyecto y brindar guía al mismo. A mis padres por todos los sacrificios y esfuerzos que realizaron para que pueda conseguir esta meta. A mis hermanos por estar ahí cuando no hubo a quien recurrir. A todos mis amigos que fueron un apoyo y una fuente de consejos en especial a Mateo, David, Paz, Daniela, Isabel y Melissa y finalmente a mi compañero y coautor Samuel por presionar y apurar el paso cuando se debía, las risas no faltaron.

Mateo Jerves Ramírez.



Dedicatoria

Este trabajo, lo dedico con todo mi amor a mis padres, Iván y Elizabeth, y a mis hermanos Isabel y Roberto.

Mateo Jerves Ramírez.



1. Introducción

En el Ecuador el ecosistema de Páramo comprende el 7% del territorio nacional, y se constituye por valles y planicies de origen glaciario (Josse et al., 2009; Vásquez, Medina, & Hofstede, 2001). Este ecosistema se caracteriza por almacenar cantidades importantes de agua y carbono orgánico, razón por la cual son ecosistemas de gran importancia para comunidades alto-andinas (Buytaert et al., 2006). Estas comunidades se ven beneficiadas por los servicios ecosistémicos brindados por el Páramo en varios aspectos, principalmente el suministro de agua constante para su potabilización y posterior consumo doméstico, provisión de agua para riego y además para uso industrial (Buytaert & De Bievre, 2012; Buytaert et al., 2010; Célleri & Feyen, 2009; Tobón, 2009). El ecosistema de Páramo tiene una distribución espacial homogénea de la precipitación a lo largo del año (Buytaert, Sevink, De Leeuw, & Deckers, 2005), esto sumado a la capacidad de regulación hídrica y a las características biofísicas que posee el suelo, brinda una calidad de agua adecuada y caudal estable durante la mayor parte del año (Tobón, 2009). Es así que la regulación hídrica se da como resultado de los siguientes factores: volúmenes de precipitación distribuidos durante todo el año, baja tasa de evapotranspiración, elevada capacidad de infiltración de los suelos y capacidad de almacenamiento de agua de los suelos, siendo este último el de mayor importancia (Buytaert et al., 2006).

Además del suministro de agua, la cantidad de carbono almacenado en los suelos de Páramo es otra importante característica de este ecosistema (Castañeda & Montes, 2017; Hofstede, 1999). A pesar de esto se ha detectado, por medio de mediciones de carbono en la atmósfera en este ecosistema, que el Páramo no actúa específicamente como un sumidero de carbono, sino como fuente emisora del mismo (Carrillo-Rojas, Silva, Rollenbeck, Célleri, & Bendix, 2019). Ambas características pueden verse modificadas por cambios en las variables meteorológicas y cambios en la cobertura y uso de suelos, haciendo que disminuya la capacidad de mantener carbono fijado, por lo tanto alterando la concentración de carbono en el agua, y su calidad (Pesántez, Mosquera, Crespo, Breuer, & Windhorst, 2018; Scott, Jones, Woof, & Tipping, 1998; Wen et al., 2019). Además de lo anterior, el COD en el agua es precursor de varios tipos de compuestos tóxicos, como los trihalometanos y los ácidos haloacéticos (Boorman et al., 1999). Estos compuestos se forman al utilizar agua con altas concentraciones de COD en un proceso de potabilización con operaciones de cloración, formando así: ácido dicloroacético, ácido tricloroacético, ácido monocloroacético, bromodiclorometano (CHBrCl_2), clorodibromometano (CHClBr_2), bromoformo (CHBr_3) y cloroformo (CHCl_3) (Boorman et al., 1999; R. Clark & Sivaganesan, 1998). Estos compuestos son



clasificados por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA) como probablemente carcinógenos (Pereira, 2000; Sarmiento, Rojas, Medina, Olivet, & Casanova, 2003). Además, el COD en el suelo está asociado a la movilidad de ciertos metales (As, Cu, Mn, Cd, Fe, Hg), estos al liberarse por medio de la escorrentía superficial y subsuperficial, provoca que los mismos puedan moverse como radicales libres dentro del medio, y por lo tanto llegar al agua de río (Alberts, Giesy, & Evans, 1984; Sherene, 2009). Debido a este proceso la concentración de COD en el agua podría estar relacionada de cierta forma con la concentración de ciertos metales en este medio (Birkel, Broder, & Biester, 2017).

A pesar de la importancia del Páramo, el conocimiento sobre este ecosistema es parcial, y las investigaciones se ven obstaculizadas por falta de datos completos y consistentes a lo largo del tiempo (Castañeda & Montes, 2017; Céleri & Feyen, 2009; Pesántez et al., 2018). Por lo tanto, el objetivo general de la presente investigación es identificar como los controladores hidrometeorológicos influyen en la concentración de carbono orgánico disuelto (COD) en el agua de suelo y río de una cuenca de Páramo andino. Para lograr el objetivo principal, los objetivos específicos son:

- (i) Analizar la variabilidad temporal de COD en agua de suelos y río en una cuenca de Páramo andino.
- (ii) Analizar que variables hidrometeorológicas tienen un efecto como controladores en las concentraciones de COD en agua de suelos y río en una cuenca de Páramo andino.
- (iii) Analizar de qué manera influyen los controladores hidrometeorológicos en la concentración de COD en agua de suelos y río en una cuenca de Páramo andino.

2. Marco Teórico

El suelo es un componente clave en el ciclo de carbono, pues en este se encuentra almacenado el 69.8% del carbono orgánico de la biosfera (FAO, 2001; E. Martínez, Fuentes, & Acevedo, 2008). El carbono orgánico es la cantidad de carbono ligada a compuestos orgánicos en el suelo, el cual proviene de múltiples fuentes como la descomposición de materia orgánica (glucosa, ácido húmico, celulosa) y productos de actividad metabólica (Ramesh et al., 2019). La forma de estimar la concentración de carbono orgánico del suelo es realizando un balance, donde las entradas son: la incorporación de material orgánico al suelo (principal entrada) (Aguilera, 2000) y la deposición húmeda (Willey, Kieber, Eyman, & Brooks Avery, 2000; Xing et al., 2019); y las salidas de carbono del suelo son: liberación en forma de CO₂ a la atmósfera (Swift, 2001) y por erosión y/o un proceso de lixiviación en el agua (E. Martínez et al., 2008). El comportamiento del carbono orgánico en el suelo está determinado por múltiples y complicadas interacciones entre los controladores y las formas de carbono presentes. Se ha encontrado que la temperatura y la humedad son los principales controladores a nivel global de carbono en la mayoría de ecosistemas (González-Domínguez et al., 2019), otros controladores hasta ahora registrados como de menor importancia son: la geología local, el uso de suelo y la gestión del territorio (FAO, 2017). Sin embargo, a escala de cuencas hidrográficas no se ha determinado que variables son las controladoras de la concentración de carbono en el ecosistema, pues algunas investigaciones muestran que variables como la precipitación actúan como uno de los principales controladores (Chen, Yoshitake, Iimura, Asai, & Ohtsuka, 2017; Meybeck, 1988; Sánchez-Murillo et al., 2019). Mientras que, otras investigaciones muestran relaciones claras entre la concentración de carbono y variables hidrometeorológicas como el caudal, evapotranspiración y radiación solar (Messer, Birgand, & Burchell, 2019; Warner & Saros, 2019; Zheng, Waldron, & Flowers, 2018). Debido a esto, y a las diferencias entre las cuencas hidrográficas no se tiene claro cuáles son los principales controladores de la concentración de carbono en el ecosistema a esta escala.

En particular, el ecosistema de Páramo posee suelos principalmente de origen volcánico (Buytaert et al., 2006) y con grandes cantidades de carbono orgánico (Castañeda & Montes, 2017; Crespo et al., 2014). La acumulación de materia orgánica en el suelo de Páramo se puede deber a las bajas temperaturas, la falta de oxígeno y la humedad de este ecosistema (Castañeda & Montes, 2017; Conant et al., 2011). Además, la descomposición de la ceniza volcánica y la roca provoca la formación de sumideros de Aluminio y Hierro (Shoji, Nanzyo, & Dahlgren, 1993). Debido a esto se da la formación de complejos organometálicos (Al +3, Fe+3) que mejoran el proceso de acumulación de



materia orgánica, pues al ser estables y resistentes a la descomposición microbiana incrementan la capacidad de almacenamiento de carbono en el suelo (Conant et al., 2011; Six, Conant, Paul, & Paustian, 2002; Wagai, Kajiura, Asano, & Hiradate, 2015). En el Páramo Andino se ha reportado que la cobertura de suelo es el mejor predictor para las concentraciones de COD en agua de suelos, encontrándose las concentraciones más altas bajo cobertura de bosque natural (Pesántez et al., 2018). Esto último puede ser por la alta actividad biológica y alta cantidad de biomasa que se encuentra bajo los bosques naturales. Otro controlador importante en el Páramo es la humedad del suelo, pues se ha encontrado que a humedades altas, las concentraciones bajan (Pesántez et al., 2018). Los autores atribuyen este comportamiento a la movilización, lavado y dilución de COD en el agua de suelo. Sin embargo, los cambios en las condiciones ambientales podrían afectar indirectamente los cambios en la concentración de COD en el agua de suelo, alterando la capacidad de acumulación de materia orgánica de los suelos (Pesántez et al., 2018) y el equilibrio hídrico de este ecosistema (Buytaert, Cuesta-Camacho, & Tobón, 2011; Mosquera et al., 2016; Ochoa-Tocachi et al., 2016). Por lo que, la concentración de COD puede ser un indicador de cambio en las condiciones hidrológicas del ecosistema (Dalzell, Filley, & Harbor, 2007).

Dentro del ciclo de carbono, el COD juega un papel crucial a escala global (Ramesh et al., 2019; Wen et al., 2019), este se origina de una multitud de fuentes como la descomposición de plantas, exudación de raíces y de humus de suelo o biomasa microbiana (Bolan, Domy, & De-la-Luz, 2004; Guggenberger, Christensen, & Zech, 1994). La concentración de COD en el agua a nivel global depende de la interacción de los procesos de transferencia suelo-agua (Seitzinger et al., 2010), la cual está controlada por el uso del suelo, factores edáficos, factores ambientales (temperatura, lluvia, CO₂ atmosférico), deposición atmosférica de nitrógeno y las prácticas de manejo del suelo (Rizinjirabake, Pilesjö, & Tenenbaum, 2019).

A pesar de lo anterior, hay evidencia de que los factores climáticos también pueden actuar como controladores del COD en el agua, debido a que el COD presenta una variación estacional en lagos, ríos y arroyos (Scott et al., 1998; Wen et al., 2019). Sin embargo, las concentraciones de COD por si solas nos dan una imagen parcial de la realidad, pues esta estacionalidad puede ser explicada por otros fenómenos, y por lo tanto no reflejan un cambio en la producción o exportación de COD (Scott et al., 1998). En el Páramo andino se ha reportado que existe una relación positiva entre la precipitación de la cuenca y la concentración de carbono en el agua, esto quiere decir que las concentraciones más altas se dieron en eventos de precipitación alta (Chapa, 2014; Guamán, 2019). Los autores atribuyen este comportamiento a un aumento en el



flujo superficial y subsuperficial que da como respuesta, una mayor exportación de carbono hacia el agua. Otra variable importante en el Páramo es el caudal, el cual muestra una relación positiva con la concentración de carbono en el agua, pues se ha encontrado que a caudales altos, las concentraciones aumentan (Chapa, 2014; Guamán, 2019; Palacios, 2017). Esto último puede deberse a que con caudales altos se promueve la exportación de carbono desde los horizontes orgánicos enriquecidos hacia el agua. Sin embargo, otras investigaciones han mostrado que las variables hidrometeorológicas podrían tener efectos sobre los procesos de generación y exportación de COD en el agua (J. Clark, Chapman, Adamson, & Lane, 2005; Gielen, Neiryck, Luysaert, & Janssens, 2011; Messer et al., 2019).

En este contexto, el movimiento o flujo de COD en el suelo y agua, controlado por los factores antes descritos, es de importancia dentro del ciclo global del carbono (Battin et al., 2009). En particular, en el ecosistema de Páramo se da principalmente por escorrentía superficial y lixiviación (Chapa, 2014; Guamán, 2019). Además, el flujo de COD se relaciona estrechamente con la respiración del ecosistema, en la disponibilidad de nutrientes como el nitrógeno, con la toxicidad de metales y en el balance general de carbono (Mulholland, 2007; Song et al., 2018; Strohmeier et al., 2013). Por lo tanto, una parte sustancial del COD terrestre es lavada hacia ríos y arroyos (Lauerwald, Hartmann, Ludwig, & Moosdorf, 2012) el cual contribuye a la emisión de CO₂ a la atmósfera (Moody, Worrall, Evans, & Jones, 2013); actúa como fuente de energía de ecosistemas acuáticos (Hynes, 1983); transporta metales y micro contaminantes orgánicos (Worrall, Parker, Rae, & Johnson, 1997); cumple una función de "buffer" del pH (Kerekes, Beauchamp, Tordon, Tremblay, & Pollock, 1986); e influye en la penetración de luz (Schindler, Curtis, Parker, & Stainton, 1996). Sin embargo, este carbono también representa un problema importante en el tratamiento del agua potable, pues en los procesos de cloración tradicionales se generan trihalometanos y ácidos haloacéticos, los cuales son compuestos tóxicos (Bieroza, Baker, & Bridgeman, 2009; Padhi, Subramanian, Mohanty, & Satpathy, 2019).

3. Metodología

3.1. Descripción área de estudio

La zona de estudio (Figura 1), microcuenca del río Zhurucay, se encuentra al sur del Ecuador, aproximadamente a 85 km al suroeste de la ciudad de Cuenca, en el Páramo de Quimsacocha. El río Zhurucay es afluente del río Rircay el cual forma parte de la cuenca hidrográfica del río Jubones que desemboca al océano Pacífico. La cuenca del río Zhurucay tiene un área de drenaje de 7,97 km², para esta investigación se estudió una subcuenca de 3.28 Km² en un rango altitudinal entre los 3656 y 3917 m s.n.m.

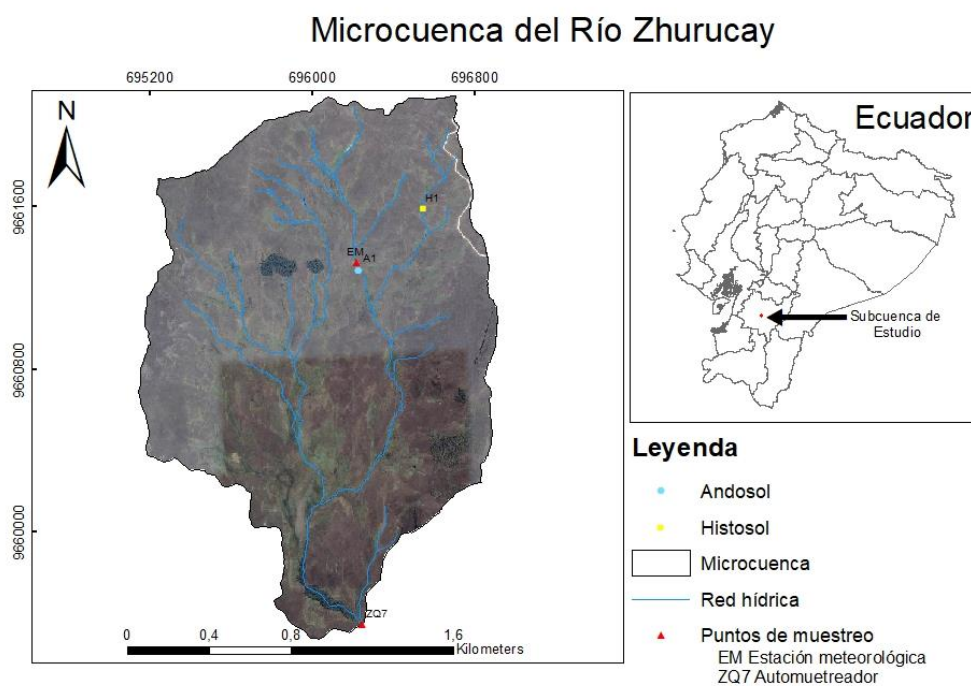


Figura 1. Mapa de área de estudio

La humedad continental originada en la selva amazónica y la fuerte influencia del jet de niveles bajos de Sur América (SALLJ) que transporta el vapor de agua desde la selva amazónica al Páramo del sur de Ecuador influyen en el clima de la cuenca de estudio (Esquivel-Hernández et al., 2019). El efecto resultante de esta influencia es una precipitación anual ligeramente bimodal (con una estación más seca entre agosto y septiembre y otra menos seca de diciembre a febrero) resultando en una distribución relativamente uniforme de la precipitación a lo largo del año (Padrón, Wilcox, Crespo, & Célleri, 2015). El volumen de precipitación anual durante el tiempo de estudio fue de 1280 mm, con intensidades bajas (generalmente por debajo de los 10 mm h⁻¹) (Padrón et al., 2015). La temperatura del aire decrece con la altitud con una gradiente térmica



promedio de 0,6 a 0,7°C por cada 100 m, con una temperatura media de 6.9°C a 3500 m s.n.m. (Córdova et al., 2016).

La microcuenca del río Zhurucay se compone por tres formaciones geológicas: Turi, compuesta de brechas tobáceas primarias de composición andesítica originario del Mioceno Tardío, Quimsacocha, compuesta por lavas y tobas de la cual no se ha podido determinar su edad y Santa Isabel, compuesta por lavas y brechas tobáceas andesíticas del Mioceno Temprano (Hungerbühler et al., 2002).

A pesar de la compleja geología y topografía del Páramo, los suelos comúnmente son homogéneos (Quichimbo et al., 2012). Los suelos comunes en el Páramo, según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO), son los Andosoles, Histosoles, Regosoles y Umbrisoles (FAO, 2017). En la zona de estudio se encuentran principalmente suelos clasificados como Histosoles (28%) y Andosoles (72%) (Crespo et al., 2012; Mosquera, Lazo, Céleri, Wilcox, & Crespo, 2015).

3.2. Monitoreo, muestreo y análisis de muestras

Los datos meteorológicos fueron obtenidos por la estación meteorológica Zhurucay. Para la medición de la precipitación se utilizó pluviógrafos tipo balancín, con una resolución de 0.1 mm, marca Texas. Las mediciones de temperatura de aire y humedad relativa se obtuvieron con un sensor CS215 marca Campbell, la radiación solar fue medida con un piranómetro marca Campbell CS300 y la velocidad del viento con un anemómetro Met-One 034BWind.

La evapotranspiración fue calculada de acuerdo a Carrillo-Rojas et al., 2019. El flujo de ETa consiste en la transpiración de la vegetación, la evaporación interceptada por lluvia y niebla y la evaporación de la superficie del suelo, la cual es útil para entender la disponibilidad de agua y el acoplamiento de carbono/agua en biomas naturales.

Para la medición de caudal, se utilizó un sensor inteligente de nivel de agua y conductividad eléctrica (CT2X, Seametrics, Washington, USA) instalado junto a un vertedero rectangular de pared delgada en la salida de la microcuenca.

Para seleccionar los puntos de muestreo se consideraron los 2 tipos de suelos predominantes en la zona de estudio, la posición de la estación meteorológica de Zhurucay y el punto de salida de la red hídrica de la microcuenca. Los puntos poseen una cobertura vegetal natural y se encuentran alejados de cualquier actividad humana que pudiera afectar los parámetros medidos. La Figura 1 presenta la ubicación de los



sitios para la toma de muestras de agua de río (ZQ7), en agua de suelo Histosol (H1), Andosol (A1) y la estación meteorológica Zhuruca y (EM).

Las muestras de agua de río fueron tomadas cada 4 horas mediante un auto-muestreador (PVS4120D, CAMPBELL SCIENTIFIC, INC., Utah, USA) a la salida de la cuenca. Las muestras fueron retiradas dos veces por semana, y filtradas con filtros de 0.45 μm de membrana de polipropileno (Puradisc 25PP Whatman Inc., Clifton, NJ, USA). Las muestras fueron analizadas el día de toma de muestras o máximo un día después. El carbono orgánico disuelto fue medido como carbono orgánico no purgable de las muestras filtradas; que se determinó por combustión usando un Vario TOC cube (Elementar, Germany). Los análisis fueron realizados en el Laboratorio de suelos y calidad de agua del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias ambientales de la Universidad de Cuenca.

Las muestras de agua de suelo fueron tomadas semanalmente usando platos de succión a 3 diferentes profundidades (15, 30 y 60 centímetros). Los platos de succión están conformados de platos de polietileno de 50 x 50 cm, conectados por mangueras plásticas de 13 mm de diámetro (Mertens, Diels, Feyen, & Vanderborght, 2007) a botellas de vidrio con capacidad de un litro. Dentro de las mangueras plásticas se colocaron cuerdas de fibra de vidrio de 9.5 mm, con el propósito de muestrear la fase móvil del agua de suelo continuamente con una succión constante de 1 metro (Mertens et al., 2007). En los sitios también se monitoreó humedad y temperatura del suelo cada 30 minutos usando 3 reflectores de contenido de agua (Stevens Hydra Probe II) cada uno con una sonda de temperatura ubicados a 5 cm de profundidad del suelo. Para el análisis de COD de las muestras de agua de suelo se realizó con el mismo procedimiento utilizado en las muestras de agua de río.

Los datos fueron colectados y analizados por el Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (iDRHICA) de la Universidad de Cuenca.

3.3. Análisis de información

Para el análisis estadístico de los datos se elaboró una base de datos con las variables hidrometeorológicas y la concentración de COD en el agua de río y agua de suelo. Para las variables hidrometeorológicas se utilizó la medición del momento de la toma de muestra y la media de las diferentes condiciones antecedentes a la toma de muestra (4 horas, 12 horas, 1 día, 3 días, 5 días, 7 días, 9 días, 12 días y 15 días). Los datos fueron tomados desde febrero del 2018 hasta marzo del 2019.

Los datos fueron analizados mediante el software libre para informática y gráficos estadísticos ambientales R Studio.

3.3.1. Análisis de la variabilidad temporal de COD en agua de suelo y río en una cuenca de Páramo andino.

Con el fin de dar cumplimiento al objetivo (i) se realizaron gráficos de series de tiempo, donde se utilizaron los parámetros hidrometeorológicos como variable para definir los periodos de estudio. La finalidad fue reconocer los posibles patrones estacionales y temporales en la concentración de COD en agua de río y agua de suelo. Esto se realizó mediante un análisis visual de las concentraciones en relación a la variabilidad temporal de la precipitación y el caudal.

Para graficar la precipitación en la parte superior del gráfico en forma de barras se consideró las condiciones antecedentes de toma de muestras. Para el caudal se graficó en la parte superior del gráfico en forma de línea continua el caudal específico (CE). Las concentraciones de COD fueron graficadas como puntos en el gráfico.

3.3.2. Análisis de que variables hidrometeorológicas tienen un efecto como controladoras de las concentraciones de COD en agua de suelo y río.

Con el fin de dar cumplimiento al objetivo (ii), identificar que variables hidrometeorológicas funcionan como controladoras de las concentraciones de COD del agua de suelo y río, se analizó la correlación entre las variables estudiadas y las concentraciones de COD. Inicialmente se realizó una prueba estadística para comprobar la normalidad de los datos mediante el test de Shapiro-Wilks ($p > 0.05$). Se encontró que los datos no siguen una distribución normal, por lo tanto, para determinar si existe una relación entre los parámetros hidrometeorológicos y la concentración de COD se utilizó la prueba no paramétrica de correlación de Spearman. Mediante el coeficiente de correlación de Spearman (r) se cuantificó la magnitud de la correlación en los periodos de tiempos anteriormente mencionados; y se identificó la tendencia de esta relación. La magnitud de la correlación fue clasificada siguiendo los criterios propuesto por M. Martínez, Ortiz, Río, & Acosta, 2010: $1 > r > 0.7$ muy alta, $0.69 > r > 0.50$ alta, $0.49 > r > 0.30$ moderada, $0.29 > r > 0.10$ baja, $0.09 > r$ nula.

Además, se elaboró la curva de no excedencia de caudales para la zona de estudio con el fin de clasificar los datos conforme a las condiciones de caudal. Para definir las diferentes condiciones de caudal se consideró los puntos de inflexión en la curva de



probabilidad de no excedencia, siendo cada punto de inflexión el límite de cada condición de caudal. De acuerdo a nuestra zona de estudio se definió: Caudal máximo y alto, cuyos valores son entre Q_{max} y Q_{90} ; caudal medio alto entre valores de Q_{90} a Q_{60} ; caudal medio bajo entre valores de Q_{60} a Q_7 ; y caudales bajos entre valores de Q_7 y valores inferiores. Posterior a esto se elaboraron diagramas de caja y se realizó una prueba de la Suma de los rangos de Wilcoxon para identificar las diferencias en la concentración de COD con las diferentes condiciones de caudal que varían en el tiempo, tanto para agua de río como para el agua de suelo.

3.3.3. Análisis de cómo influyen los controladores hidrometeorológicos en las concentraciones de COD en agua de suelo y río.

Con el fin de dar cumplimiento al objetivo (iii), identificar cómo influyen los controladores en las concentraciones de COD se elaboraron gráficos de dispersión para cada una de las variables hidrometeorológicas, agrupando la concentración de COD en el agua de río para las diferentes condiciones de caudal definidas anteriormente. También se realizaron gráficos de dispersión para cada una de las variables hidrometeorológicas con la concentración de COD en el agua de suelo Histosol y Andosol. En cada variable se consideró el periodo de tiempo con mayor magnitud del coeficiente de Spearman ($|r|$). Este análisis nos permite identificar las variables que actúan como controladores para la concentración de COD y los mecanismos que son causantes de esta relación.

4. Resultados y discusión

4.1. Análisis de la variabilidad temporal de COD en agua de suelos y río.

Para analizar la variabilidad estacional se realizaron series temporales, en donde se observó la variación en la concentración de COD en relación a la precipitación y al caudal. En la Figura 2 se muestran gráficos de serie de tiempo para la concentración de COD en el agua de río que incluyen: precipitación acumulada de 4 horas (barras descendentes), caudal específico (CE) instantáneo horario (línea) y la concentración instantánea de COD (puntos). En la Figura 3 se muestran gráficos de serie de tiempo para la concentración de COD en el agua de suelo Histosol y Andosol que incluyen: precipitación acumulada de 7 días (barras descendentes) y la concentración instantánea de COD de cada suelo (puntos). Se consideraron las condiciones antecedentes en precipitación, de 4 horas en agua de río y 7 días en agua de suelo, debido a que estos tiempos son la frecuencia de toma de muestras y representa los eventos de precipitación registrados durante estos tiempos. El mes de mayor precipitación acumulada fue mayo de 2018 con 227.43 mm, mientras que el mes de menor precipitación acumulada fue septiembre de 2018 con 45.53 mm. El mes de mayor caudal acumulado fue mayo de 2018 con 155.6 mm, mientras que el mes de menor caudal acumulado fue octubre de 2018 con 4.15 mm.

4.1.1. Variabilidad temporal de COD en el agua de río.

De acuerdo a la Figura 2, series de tiempo precipitación, caudal y concentración de COD en el agua de río, se puede observar una cierta relación entre estos tres. La concentración de COD en el agua de río registró un rango de valores entre 0.16 y 22.78 mg/L, con una media de 5.6 mg/L. Los meses con las concentraciones de COD instantáneas más altas fueron: febrero de 2018 con 22.78 mg/L, julio de 2018 con 16.63 mg/L y febrero de 2019 con 16.13 mg/L. En estos meses las condiciones de precipitación y CE fueron: en febrero de 2018, 10.83 mm/4h de precipitación antecedente y 0.29 mm/h de CE, en julio de 2018, 0.23 mm/4h de precipitación antecedente y 0.28 mm/h de CE y febrero de 2019, 1.43 mm/4h de precipitación antecedente y 0.43 mm/h de CE. Los meses con las concentraciones instantáneas de COD más bajas fueron: septiembre de 2018 con 1.44 mg/L, octubre de 2018 con 0.16 mg/L, diciembre de 2018 con 1.28 mg/L. En estos meses las condiciones de precipitación y CE fueron: en septiembre de 2018, 0 mm/4h de precipitación antecedente y 0.02 mm/h de CE, en octubre de 2018, 0.22

mm/4h de precipitación antecedente y 0.005 mm/h de CE y en diciembre de 2018, 0 mm/4h de precipitación antecedente y 0.03 mm/h de CE.

Se observa que la concentración de COD en el agua de río es muy variable, esta variación está asociada a las épocas de mayor y menor precipitación y caudal. Por ejemplo, desde el 29 al 30 de julio, se registró un aumento en la concentración de COD, los valores de concentración van desde 7.82 a 16.63 mg/L, con valores en la precipitación de 1.04 y 4.68 mm/4h de condición antecedente y CE de 0.04 y 0.29 mm/h respectivamente. De esta manera se prueba como las concentraciones tienden a incrementar cuando la precipitación y el caudal aumentan.

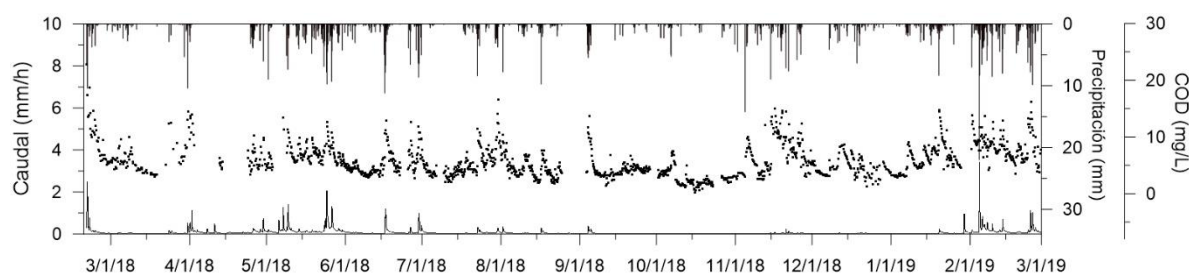


Figura 2. Serie de tiempo de la concentración de COD en el agua de río con la precipitación y el caudal específico (CE)

Como se observó anteriormente con los resultados obtenidos en este análisis se demostró que la concentración de COD no presenta una estacionalidad marcada, sin embargo, tuvo una variación asociada a las épocas de mayor y menor precipitación y caudal. Esta relación entre la precipitación y el caudal podría deberse a que la principal fuente de generación de escorrentía es el agua de precipitación (Correa et al., 2017). El incremento en la concentración puede deberse a un aumento en la humedad del suelo debido a un evento de precipitación, provocando un aumento en el flujo lateral superficial, el cual fluye por el horizonte orgánico hacia el caudal de la cuenca (Crespo et al., 2014). De manera que se produce un lavado del suelo exportando COD al agua de río (Hinton, Schiff, & English, 1997). Por el contrario, la disminución en la concentración puede deberse a que, en épocas de menor precipitación y caudal, el flujo lateral se da en los horizontes bajos del suelo (Crespo et al., 2014), los cuales tienen una menor cantidad de carbono orgánico (E. Martínez et al., 2008). Los resultados coinciden con estudios realizados en una cuenca de bosque húmedo, bajo influencia de alta humedad y bajas temperaturas ambientales y del suelo, las cuales sugieren un aumento de la concentración de COD en las aguas superficiales debido a un aumento en la precipitación (Sánchez-Murillo et al., 2019). Los autores atribuyen este comportamiento a un aumento en el flujo lateral por los horizontes orgánicos del suelo.

4.1.2. Variabilidad temporal de COD en el agua de suelo Histosol y Andosol

Como observamos en la Figura 3 la concentración de COD en el agua de suelo de Histosoles y Andosoles tienen rangos de concentración diferentes. Observamos que las concentraciones de COD bajo suelos Histosoles (4.66 - 12.60 mg/L) son significativamente mayores a aquellas bajo Andosoles (0.21 - 4.57 mg/L). Esto se puede deber a que los Histosoles poseen una mayor concentración de materia orgánica frente a los Andosoles (E. Martínez et al., 2008), además los Histosoles se ubican en áreas donde permanecen constantemente saturados, esto sumado a las bajas temperaturas y la acidez favorecen la acumulación de materia orgánica (Borja, Iñiguez, Crespo, Cisneros, & Cisneros, 2008).

En la primera parte de la Figura 3a (concentración de COD en agua de Histosoles) se puede observar que existe una ligera variabilidad ligada a la precipitación en las muestras tomadas a 30 cm, profundidad a la cual se pudo colectar agua más frecuentemente. Para el resto de profundidades muestreadas no se puede observar una tendencia debido a la poca cantidad de datos registrados. En el periodo de febrero-junio del 2018 se registraron altas precipitaciones, en este mismo periodo la concentración de COD mínima fue de 6.41 mg/L, con una precipitación de 21.65 mm/7d de condición antecedente el 28 de junio, y la concentración de COD máxima fue de 11.96 mg/L, con una precipitación de 29.67 mm/7d de condición antecedente el 17 de mayo. En el periodo de julio-octubre del 2018 se registraron bajas precipitaciones, en este mismo periodo la concentración de COD mínima fue de 4.66 mg/L, con una precipitación de 16.28 mm/7d de condición antecedente el 23 de agosto, y la concentración de COD máxima fue de 12.08 mg/L, con una precipitación de 15.16 mm/7d de condición antecedente el 12 de octubre. De esta manera se observa que la concentración de COD en el agua de suelo Histosol es poco variable, esta variación parece estar asociada a las épocas de mayor y menor precipitación. Esta relación con la precipitación puede deberse al proceso de dilución, es decir, con mayores eventos de precipitación existe más cantidad de solvente con la misma cantidad de soluto, lo cual se traduce a menores concentraciones de COD registradas en el agua del suelo directamente (Hinton et al., 1997; Pesántez et al., 2018). Sin embargo, mediante el análisis visual de la serie de tiempo no se puede determinar la magnitud de la relación entre la precipitación y la concentración de COD, pues en el agua de suelo Histosol hay poca variabilidad en las concentraciones.

En la segunda parte de la Figura 3b (concentración de COD en agua de Andosoles) se puede observar que existe una variabilidad con la precipitación para las muestras



tomadas a 15 y 60 cm. Para las muestras tomadas a 15 cm de profundidad observamos que en el periodo de febrero-junio del 2018 la concentración de COD mínima fue de 1.54 mg/L, con una precipitación de 38.18 mm/7d de condición antecedente el 26 de abril, y la concentración de COD máxima fue de 3.77 mg/L, con una precipitación de 70.09 mm/7d de condición antecedente el 22 de febrero. En el periodo de julio-octubre del 2018 la concentración de COD mínima fue de 1.53 mg/L, con una precipitación de 15.16 mm/7d de condición antecedente el 12 de octubre, y la concentración de COD máxima fue de 3.53 mg/L, con una precipitación de 8.41 mm/7d de condición antecedente el 20 de julio. En el caso de las muestras tomadas a 60 cm de profundidad, observamos que en el periodo de febrero-junio del 2018 la concentración de COD mínima fue de 0.36 mg/L, con una precipitación de 71.06 mm/7d de condición antecedente el 22 de febrero, y la concentración de COD máxima fue de 1.53 mg/L, con una precipitación de 4.78 mm/7d de condición antecedente el 1 de marzo. En el periodo de julio-octubre del 2018 la concentración de COD mínima fue de 0.34 mg/L, con una precipitación de 32.61 mm/7d de condición antecedente el 23 de noviembre, y la concentración de COD máxima fue de 3.18 mg/L, con una precipitación de 5.23 mm/7d de condición antecedente el 9 de agosto. De esta manera se observa que la concentración de COD en el agua de suelo Andosol es variable, esta variación está asociada a las épocas de mayor y menor precipitación. Esta relación de la precipitación con la concentración de COD en el agua de suelo Andosol puede deberse a un efecto de dilución tal como sucede en Histosoles lo cual ya se explicó en párrafos anteriores. A pesar de todo lo anterior, mediante un análisis visual no se puede determinar una relación clara entre la precipitación y la concentración de COD, pues en el agua de suelo Andosol hay una alta variabilidad en las concentraciones.

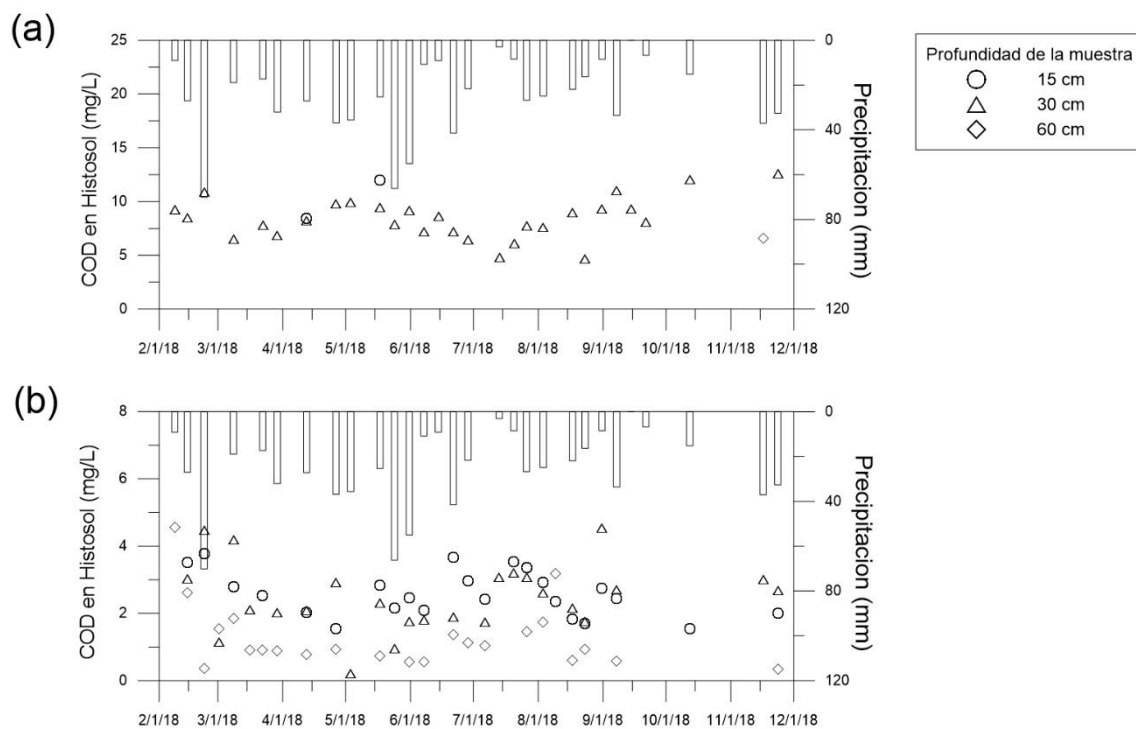


Figura 3. (a) Serie de tiempo de la concentración de COD en agua suelo Histosol con la precipitación y (b) Serie de tiempo de la concentración de COD en agua de suelo Andosol con la precipitación

4.2. Análisis de las variables hidrometeorológicas como controladores de las concentraciones de COD en agua de suelos y río.

En esta sección se resolverá de manera conjunta los objetivos (ii) analizar que variables hidrometeorológicas tienen un efecto como controladores en las concentraciones de COD en agua de suelos y río en una cuenca de Páramo andino y (iii) analizar de qué manera influyen los controladores hidrometeorológicos en la concentración de COD en agua de suelos y río en una cuenca de Páramo andino. Para lo anterior en cada subsección se analizó primero que variables hidrometeorológicas controlan las concentraciones de COD en cada compartimento estudiado (agua de suelos y río) y luego de que manera estas variables controlan (si las concentraciones de COD aumentan o disminuyen con las condiciones estudiadas).

Dentro de los análisis de esta sección, en la primera subsección se agruparon las concentraciones de COD de acuerdo a las condiciones de caudal y se analizó las diferencias entre los grupos formados. En las tres siguientes subsecciones se analizó las concentraciones de COD directamente de agua de río y de suelos (Histosol y Andosol) con las condiciones hidrometeorológicas a las cuales estas muestras fueron tomadas. De esta manera se determinó que variables funcionan como controladores y como controlan las concentraciones de COD en los compartimentos estudiados.

4.2.1. Análisis de la relación entre el caudal y la concentración de COD en agua de suelos y río por condiciones de caudal.

Para realizar el análisis de la influencia del caudal en la concentración de COD del agua de los ríos, se estableció la condición de caudal en la que fueron tomadas las muestras de agua y suelo. Para esto se elaboró una curva de no excedencia de caudales para la microcuenca del río Zhuruca y (Figura 4).

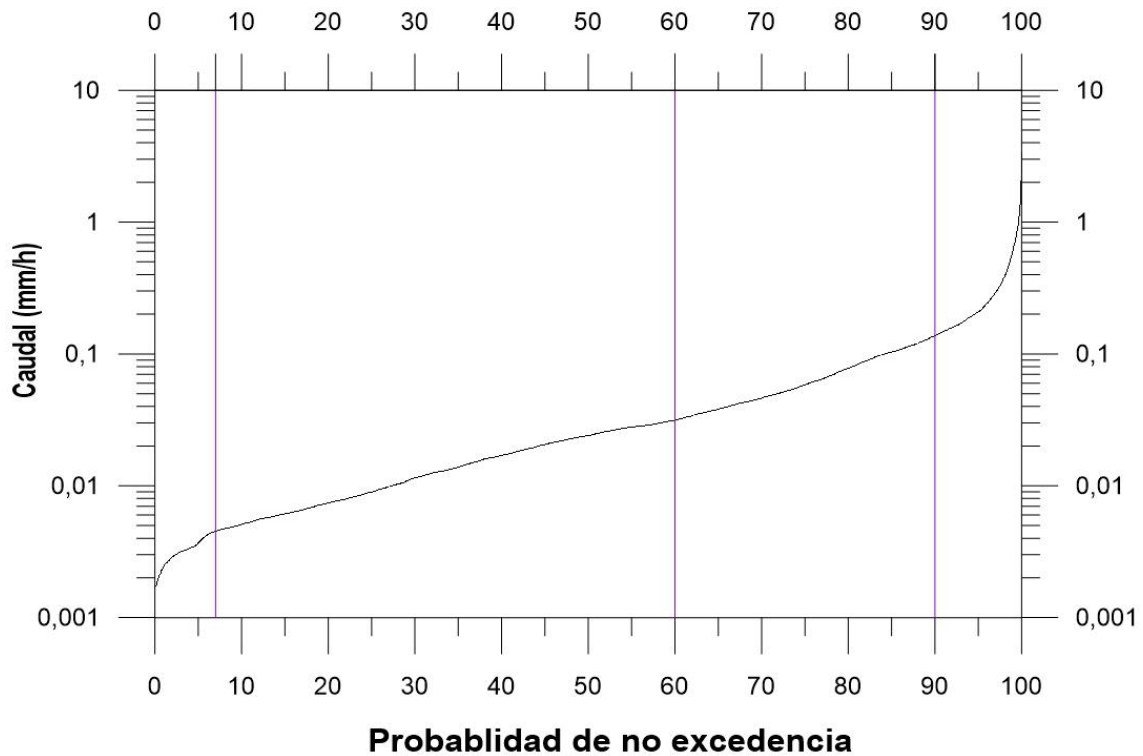


Figura 4. Curva de no excedencia de caudales para la microcuenca de estudio

Con los eventos de caudal separados, se clasificaron las concentraciones de COD de acuerdo a las condiciones en las que fueron tomadas para analizar su relación con el caudal mediante diagramas de caja. La separación de las concentraciones observadas de COD según la condición de caudal se describe en la Tabla 1.

Tabla 1. Número de observaciones de COD por condiciones de caudal analizada en cada compartimento.

Compartimento	Caudal bajo	Caudal medio bajo	Caudal medio alto	Caudal alto
Agua de río	39	833	687	207
Agua de suelo Histosol	0	10	21	3
Agua de suelo Andosol	0	22	44	5

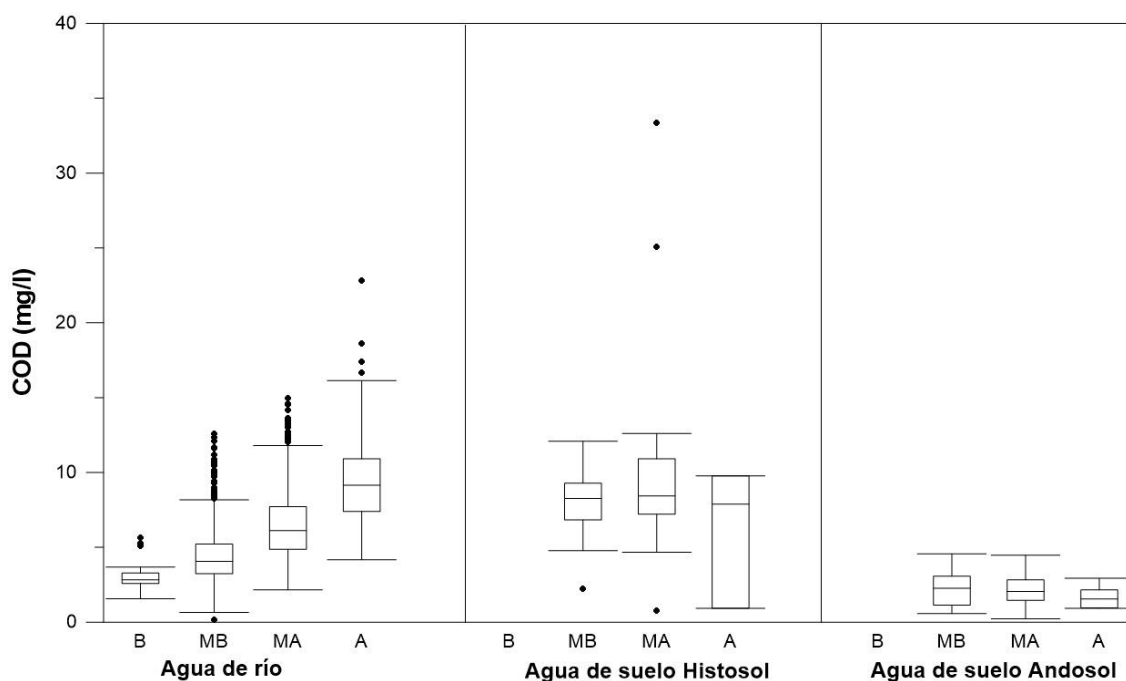


Figura 5. Diagramas de cajas de la concentración de COD para la microcuenca del río Zhuruca y en agua de río y agua de suelo Histosol y Andosol, bajo diferentes condiciones de caudal. B= Condiciones de caudal bajo, MB= Condiciones de caudal medio bajo, MA= Condiciones de caudal medio bajo, MA= Condiciones de caudal medio alto, A= Condiciones de caudal Alto.

La variación de la concentración de COD de acuerdo a las condiciones de caudal en agua de ríos y agua de suelo Histosol y Andosol se presenta en la Figura 5. En la concentración de COD para el agua de río, mediante la prueba de Suma de rangos de Wilcoxon (Tabla 2) se encontró que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) en las concentraciones de COD entre las diferentes condiciones de caudal. Además, se observa una tendencia a incrementar los valores conforme aumenta la condición de caudal. Los rangos intercuartílicos de las concentraciones de COD bajo las diferentes condiciones de caudal fueron: en condiciones de caudal bajo (2.59 - 3.28 mg/L), en condiciones de caudal medio bajo (3.23 - 5.21 mg/L), en condiciones de caudal medio alto (4.86 - 7.71 mg/L), en condiciones de caudal alto (7.39-10.91 mg/L), por lo tanto, los valores de COD incrementan cuando el caudal aumenta.

El aumento en la concentración de COD en el agua de río por el incremento de la condición de caudal podría deberse a que la condición de caudal, en la cuenca de estudio, depende del flujo lateral (Crespo et al., 2014). Este flujo a su vez, está influenciado por la duración e intensidad de la lluvia y la condición de humedad antecedente en el suelo (Mosquera et al., 2016). El aumento del flujo lateral provoca un

lavado de los horizontes orgánicos de los suelos (Hinton et al., 1997), causando una mayor exportación de COD al caudal. Estos resultados coinciden con investigaciones realizadas en cuencas tropicales con altas precipitaciones y suelos con altas concentraciones de materia orgánica, los cuales muestran que la exportación de COD hacia el caudal aumenta con las condiciones de caudal de la cuenca, debido a eventos de precipitación mayor que generan una mayor escorrentía (Felizzola, Cak, Figueiredo, & Lima, 2019; Lloret et al., 2013; Rizinjirabake, Abdi, Tenenbaum, & Pilesjö, 2018).

Tabla 2. Comparaciones por pares usando la prueba de Suma de rangos de Wilcoxon entre las diferentes condiciones de caudal con la concentración de COD en el agua de río.

Condiciones de caudal	Bajo	Medio bajo	Medio alto	Alto
Bajo				
Medio bajo	3.62E-08***			
Medio alto	2.20E-16***	2.20E-16***		
Alto	2.20E-16***	2.20E-16***	2.20E-16***	

*** diferencia significativa ($p < 0.05$)

En la concentración de COD en agua de suelo Histosol y Andosol, mediante la prueba de Suma de rangos de Wilcoxon (Tabla 3), se encontró que no existen diferencias significativas ($p > 0.05$) en la concentración de COD asociadas a las diferentes condiciones de caudal. Los rangos intercuartílicos de las concentraciones de COD en el agua de suelo Histosol bajo las diferentes condiciones de caudal fueron: en condiciones de caudal bajo (2.59 - 3.28 mg/L), en condiciones de caudal medio bajo (3.23 - 5.21 mg/L), en condiciones de caudal medio alto (4.86 - 7.71 mg/L), en condiciones de caudal alto (7.39-10.91 mg/L). En el caso de la concentración de COD en el agua de suelo Andosol los rangos intercuartílicos fueron: en condiciones de caudal medio bajo (6.83 - 9.28 mg/L), en condiciones de caudal medio alto (7.2 - 10.91 mg/L), en condiciones de caudal alto (0.93 - 9.77 mg/L). De esta manera, los valores de COD en agua de suelo Histosol y Andosol no varían con el caudal.

La invariabilidad de la concentración de COD en el agua de suelo Histosol bajo las diferentes condiciones de caudal podría estar relacionado a que los Histosoles son la principal fuente de aporte a la descarga para la cuenca de estudio (Mosquera, Lazo, Cárdenas, & Crespo, 2013). Los Histosoles son una parte importante en la dinámica hidrológica en la cuenca de estudio, la cual está controlada por el proceso de flujo pistón, esto quiere decir que el agua de un evento de precipitación empuja el agua retenida de

eventos previos en los suelos llegando finalmente y antes de ir al caudal a estos suelos (Mosquera et al., 2013). Esta dinámica y las propiedades hidrofísicas del suelo causan la regulación del caudal (Buytaert, Célleri, De Bièvre, & Cisneros, 2003), lo que podría ocasionar que el flujo de agua en el suelo Histosol se mantenga con una concentración de COD relativamente estable a pesar del aumento en el caudal. Estos resultados no concuerdan con aquellos obtenidos en otras investigaciones realizadas en sitios de alta precipitación (Pastizales, Páramo y bosques húmedos), donde se evidenció un aumento en la concentración de COD en el agua de suelo al aumentar la escorrentía superficial, pues el drenaje se considera un factor importante que controla las concentraciones de COD en áreas con alta precipitación (van den Berg, Shotbolt, & Ashmore, 2012). De todas maneras, la poca cantidad de muestras, tanto para suelo Histosol y Andosol, puede ser también el motivo por el que no se observan diferencias y es necesario inspeccionar los datos mediante otros análisis (Ver sección 4.2.3. y 4.2.4).

Tabla 3. Comparaciones por pares usando la prueba de Suma de rangos de Wilcoxon entre las diferentes condiciones de caudal con la concentración de COD en el agua de suelo Histosol y Andosol.

Suelo	Condiciones de caudal	Bajo	Medio bajo	Medio alto	Alto
Histosol	Bajo	-	-	-	-
	Medio bajo	-	-	-	-
	Medio alto	-	0.48	-	-
	Alto	-	0.93	0.54	-
Andosol	Bajo	-	-	-	-
	Medio bajo	-	-	-	-
	Medio alto	-	0.53	-	-
	Alto	-	0.43	0.47	-

“-”: Representa que no existen datos suficientes para la prueba

*** diferencia significativa ($p < 0.05$)

4.2.2. Relación entre las variables hidrometeorológicas y la concentración de carbono orgánico disuelto en agua de río.

En la Tabla 4 se presenta el coeficiente de correlación de Spearman (r) para las variables hidrometeorológicas en los periodos de tiempo especificados con la concentración de COD en agua de río. Se observó que todas las variables presentan correlaciones estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en por lo menos una condición

antecedente. Además, se encontró que en este compartimento se presentaron las correlaciones más altas entre las variables hidrometeorológicas y la concentración de COD. La precipitación y el caudal presentaron las mejores correlaciones ($|r| > 0.5$) en condiciones antecedentes de 3, 5, 7 y 9 días en precipitación; y en caudal para el momento de la toma de muestra, 4 horas, 12 horas, 1 día, 3 días y 5 días. Las variables: humedad relativa, radiación solar y la humedad del suelo muestran una correlación moderada ($0.49 > |r| > 0.3$) en condiciones antecedentes desde 1 día hasta 15 días, desde 3 días hasta 12 días y desde el momento de la toma de muestra hasta los 3 días, respectivamente. Por otra parte, las variables de temperatura del aire, evapotranspiración, velocidad del viento y temperatura del suelo muestran una correlación baja ($0.29 > |r| > 0.1$) en condiciones antecedentes desde 5 días hasta 15 días en temperatura del aire y temperatura del suelo, desde 1 día hasta 15 días en la evapotranspiración y desde el momento de la toma de muestra hasta los 15 días en la velocidad del viento.

Tabla 4. Resultados regresión COD - variables hidrometeorológicas en agua de río.

Variable hidrometeorológica	r									
	Momento	4 horas	12 horas	1 día	3 día	5 día	7 día	9 día	12 día	15 día
Precipitación	0.19***	0.26***	0.36***	0.47***	0.57***	0.56***	0.53***	0.51***	0.49***	0.48***
Humedad Relativa	0.17**	0.20**	0.27***	0.39***	0.47***	0.48***	0.47***	0.47***	0.45***	0.45***
Temperatura del aire	0.06*	0.03	0.05	0.05	0.09	0.11*	0.13*	0.14***	0.17***	0.18***
Evapotranspiración	-0.04**	-0.02**	-0.02**	-0.13***	-0.15***	-0.19***	-0.18***	-0.18***	-0.17***	-0.16***
Radiación	-0.08***	-0.05***	-0.07***	-0.29***	-0.37***	-0.39***	-0.36***	-0.34***	-0.30***	-0.28***
Velocidad del viento	-0.18***	-0.19***	-0.21***	-0.23***	-0.23***	-0.24***	-0.26***	-0.25***	-0.24***	-0.22***
Caudal	0.65***	0.66***	0.65***	0.64***	0.56***	0.50***	0.46***	0.42***	0.38***	0.34***
Humedad suelo	0.39***	0.38***	0.37***	0.36***	0.30***	0.25***	0.23***	0.21***	0.18***	0.15***
Temperatura Suelo	0.06**	0.06**	0.05**	0.06***	0.09***	0.12***	0.14***	0.16***	0.16***	0.17***

*Coefficientes de correlación de Spearman (r) para la microcuenca del río Zhuruca. Se resaltan en negrita las mayores correlaciones en cada una de las variables hidrometeorológicas. La magnitud de la correlación se remarca en escala de colores de rojo a verde, siguiendo los siguientes criterios propuestos por M. Martínez et al., 2010. Clasificación de los coeficientes de correlación: 1-0.7 muy alta (rojo), 0.69-0.50 alta (naranja), 0.49-0.30 moderada (verde oscuro), 0.29-0.10 baja (verde claro), 0.09 > nula (blanco). Presentan asteriscos los valores en donde las regresiones fueron estadísticamente significativas ($p < 0.05$). Niveles de significación: *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.*

En la Figura 6 se presentan los gráficos de dispersión de cada una de las variables analizadas, en la condición antecedente que presentó el mayor valor de r, comparado con la concentración de COD en el agua de río. También, los valores de r de cada



variable se presentan en la Figura 6. Las variables más importantes para la concentración de COD en el agua de río fueron: caudal, precipitación, humedad relativa, humedad del suelo y la radiación solar. Se observa que para estas variables las tendencias respecto a las condiciones de caudal son positivas; en el caso de la radiación solar se mantiene la relación negativa con las condiciones de caudal. Las variables: velocidad del viento, temperatura del aire y temperatura del suelo presentan las correlaciones más bajas. Se observa que estas variables no siguen una tendencia con las condiciones de caudal. La distribución de los valores de la concentración de COD en agua de río con respecto a estas variables son muy dispersos, indicando que son variables que posiblemente no actúan como controladores, lo que se refuerza con los bajos valores de r obtenidos. Por otra parte, en el caso de la evapotranspiración podemos observar que esta variable tiene un rango pequeño de distribución, por lo tanto, no puede ser usado como controlador pues la mayoría de datos se encuentran agrupados. Esta variable presenta una tendencia negativa con respecto a las condiciones de caudal. Sin embargo, separando las concentraciones de COD por condiciones de caudal no se encontró relación con respecto a todas variables analizadas. De esta manera podemos decir que las variables más importantes que actúan como controladores de la concentración de COD en el agua de río son la precipitación y el caudal.

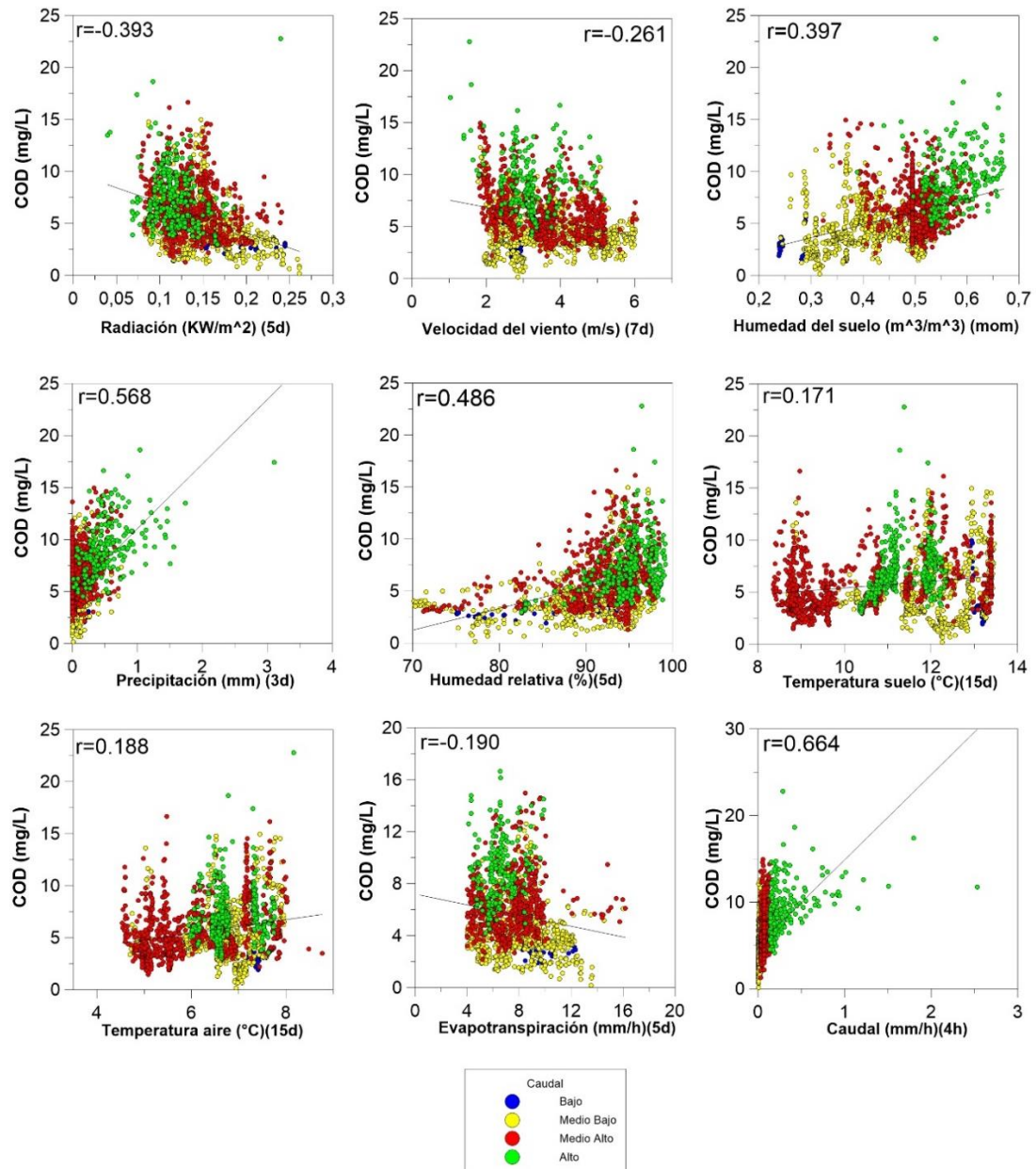


Figura 6. Relación de la concentración de COD y las variables hidrometeorológicas en agua de río por correlación bajo diferentes condiciones de caudal: caudal bajo (Azul), caudal medio bajo (amarillo), caudal medio alto (rojo), caudal alto (verde). En los títulos de los ejes X se especifica la agregación que se usó para elaborar el gráfico (d=días, h=horas, mom=momento de la toma de muestra). Las agregaciones usadas corresponden con las que presentan el mayor coeficiente de correlación de Spearman (r), el valor de r también se indica en la parte superior de cada gráfico.

En este contexto, podemos entender la relación positiva existente entre la precipitación, caudal y la concentración de COD en el agua de río está de acuerdo a la exportación de COD que se da entre los ecosistemas terrestres y acuáticos (Gielen et al., 2011; Neff & Asner, 2001). Estos resultados concuerdan con lo observado en estudios realizados



en una cuenca subalpina húmeda con una elevación altitudinal de 3200 a 4000 m s.n.m. y en una cuenca de la región boreal con humedales en un gran porcentaje de su área, donde encontraron un aumento en la concentración de COD en el agua de río ocasionado por un aumento en la precipitación, debido al movimiento de COD en los procesos de exportación y transferencia de nutrientes que se genera por la escorrentía (Boyer, Hornberger, Bencala, & Mcknight, 1997; Warner & Saros, 2019). Este aumento en la concentración de COD en la escorrentía se puede deber a varios motivos: la materia orgánica acumulada en diferentes estratos del suelo es movilizada por la lluvia (Ma et al., 2014), el impacto de las gotas de lluvia podría romper agregados en el suelo permitiendo la liberación y movilización de la materia orgánica apresada en el agregado (Ma et al., 2014), la saturación del suelo genera condiciones anaeróbicas que favorecen la liberación de materia orgánica (Fiedler & Kalbitz, 2003), o el aumento de la escorrentía causa un cambio en las piscinas de carbono orgánico de las que contribuyen normalmente al flujo base a otras enriquecidas con COD (Vidon, Wagner, & Soyeux, 2008). Con la precipitación la mejor correlación se presentó en la condición antecedente de 3 días, esto podría deberse a que este puede ser el tiempo en que el agua de precipitación tarda en empujar el agua de eventos previos presente en el suelo, y posteriormente escurrir hacia el río. En el caudal la mejor correlación se presentó en la condición antecedente de 4 horas, esto podría deberse a que este puede ser el tiempo de reacción de la cuenca ante eventos precipitación y escorrentía.

Además, la humedad del suelo también actúa como variable controladora en menor magnitud con una relación positiva, esto puede deberse a que un aumento en la humedad del suelo genera un movimiento de COD, debido a un aumento en el flujo lateral subsuperficial (Boy, Valarezo, & Wilcke, 2008; Neff & Asner, 2001). En la humedad del suelo la mejor correlación se presentó al momento de la toma de la muestra, esto podría deberse a que esta variable juega un papel importante en la dinámica hidrológica del Páramo (Buytaert & Beven, 2011), en la actividad microbiana (Ramesh et al., 2019) y en la regulación de pH (J. Clark et al., 2005). Por otra parte, la humedad relativa indica el contenido de agua en una masa de aire (Llambí et al., 2012), por lo que es una variable que se relaciona de manera muy cercana con todas las variables antes mencionadas, pues la precipitación es el principal medio de salida de vapor de agua de la atmósfera, mientras que la evaporación del agua de río y de suelo son entradas de vapor de agua a la atmósfera (Andrades & Múñez, 2012). Por lo tanto, la humedad relativa podría considerarse como una variable controladora menor con una relación positiva, esto puede deberse a su estrecha relación e interacción con el resto de estas variables controladoras. En la humedad relativa la mejor correlación se

presentó en la condición antecedente de 5 días, esto podría explicar su relación directa con la precipitación, pues las mayores correlaciones se encontraron en el mismo rango de condiciones antecedentes (de 3 a 15 días) para ambas variables.

Finalmente, la radiación solar actúa como variable controladora de menor magnitud de la concentración de COD en el agua de río con una relación negativa, esto puede deberse a que esta variable influye en la humedad relativa, pues a mayores valores de radiación solar, los valores de humedad relativa disminuyen (Carrillo-Rojas, Silva, Córdova, Céleri, & Bendix, 2016), y en consecuencia podría haber ausencia de precipitación, y por lo tanto reduciría la exportación de COD hacia el caudal. La relación negativa entre la concentración de COD en el agua de río y la radiación solar concuerda con lo observado en un estudio de mesocosmo de humedales, donde se observaron que los picos de concentración de COD ocurren en la noche, mientras que disminuyen durante el día, esto debido a una mayor actividad de procesos de liberación de COD durante la noche, a medida que la materia orgánica se descompone (Messer et al., 2019). La radiación solar presentó la mejor correlación en la condición antecedente de 5 días, esto podría deberse a su relación directa con la humedad relativa.

4.2.3. Relación entre las variables hidrometeorológicas y la concentración de carbono orgánico disuelto en agua de suelo Histosol.

En la Tabla 5 se presentan los coeficientes de correlación de Spearman (r) para las variables hidrometeorológicas en los periodos de tiempo especificados con la concentración de COD en agua de suelo Histosol. Se observó que las variables como la temperatura del aire, velocidad del viento, humedad del suelo y temperatura del suelo presentan correlaciones estadísticamente significativas ($p < 0.05$). La velocidad del viento presentó la mejor correlación ($r = -0.52$) en las condiciones antecedentes de 3 y 5 días. La precipitación presentó una correlación moderada ($0.49 > |r| > 0.3$) en las condiciones antecedentes de 9 días y 12 días. La humedad relativa tuvo una correlación moderada en las condiciones antecedentes de 12 horas, 3 días y 7 días. Por otra parte, la temperatura del aire presentó una correlación moderada en todas las condiciones antecedentes, excepto a 1 día y 9 días. La evapotranspiración presentó correlaciones moderadas en las condiciones antecedentes de 12 horas hasta 9 días y a los 15 días. La radiación solar tuvo correlaciones moderadas en las condiciones antecedentes de 4 horas hasta 12 horas y desde 3 días hasta 7 días. El pH al momento de la toma de muestra presentó una correlación moderada con la concentración de COD. La temperatura del suelo presentó una correlación moderada con la concentración de COD en todas las condiciones antecedentes, excepto a 3 días y 9 días. Las variables de

caudal y volumen de agua presentaron correlaciones bajas ($0.29 > |r| > 0.1$) en las condiciones antecedentes de 12 horas hasta 12 días en caudal y para el momento de toma de muestra en el volumen de agua. La humedad del suelo presentó una correlación nula ($0.09 > |r|$) con la concentración de COD para todas las condiciones antecedentes.

Tabla 5. Resultados regresión COD – variables hidrometeorológicas en agua de suelo Histosol

Variable hidrometeorológica	r									
	Momento	4 horas	12 horas	1 día	3 día	5 día	7 día	9 día	12 día	15 día
Precipitación	-0.11	-0.11	-0.21	-0.16	0.22	0.29	0.24	0.36	0.35	0.17
Humedad Relativa	-0.23	-0.19	-0.40	-0.16	-0.37	-0.29	-0.35	-0.21	-0.09	-0.18
Temperatura del aire	0.36**	0.38*	0.30*	0.25*	0.31*	0.34**	0.31**	0.29**	0.32**	0.34**
Evapotranspiración	-0.01	0.19	0.32	0.37	0.43	0.37	0.45	0.36	0.28	0.32
Radiación	0.17	0.38	0.38	0.14	0.40	0.37	0.42	0.25	0.18	0.27
Velocidad del viento	-0.47	-0.43	-0.48*	-0.44	-0.52*	-0.50*	-0.46	-0.42	-0.39	-0.35*
Caudal	0.08	0.09	0.10	0.14	0.2	0.17	0.14	0.19	0.16	0.07
Volumen de agua	0.13	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
pH	-0.40	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Humedad suelo	0.05	0.06	0.08	0.09	0.02	0.06	0.02	0.03*	0.01*	-0.02**
Temperatura Suelo	0.31	0.3	0.32	0.33	0.28*	0.3*	0.31*	0.28*	0.31*	0.3*

*Coefficientes de correlación de Spearman (r) para la microcuenca del río Zhuruca. Se resaltan en negrita las mayores correlaciones en cada una de las variables hidrometeorológicas. La magnitud de la correlación se remarca en escala de colores de rojo a verde, siguiendo los siguientes criterios propuestos por M. Martínez et al., 2010. Clasificación de los coeficientes de correlación: 1-0.7 muy alta (rojo), 0.69-0.50 alta (naranja), 0.49-0.30 moderada (verde oscuro), 0.29-0.10 baja (verde claro), 0.09 > nula (blanco). Presentan asteriscos los valores en donde las regresiones fueron estadísticamente significativas ($p < 0.05$). Niveles de significación: *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.*

En la Figura 7 se presenta los gráficos de dispersión de cada una de las variables analizadas en la condición antecedente que presentó el mayor valor de r con la concentración de COD en el agua de suelo Histosol. También, los valores de r de cada variable se presentan en la Figura 7. Las variables más importantes para la concentración de COD en el suelo Histosol fueron: velocidad del viento, evapotranspiración, radiación solar, humedad relativa, pH, temperatura del aire, precipitación y temperatura del suelo. Las variables con una baja correlación son el caudal, volumen de agua y humedad del suelo. En estas variables podemos observar que la mayoría de datos están agrupados en un pequeño rango, por lo tanto, no pueden ser utilizadas como controladores. En este estudio no se encontró que la humedad del suelo y el caudal son variables controladoras de la concentración de COD en el agua de



suelo Histosol, sin embargo, esto es inusual considerando que tanto la precipitación y la humedad relativa tienen mayor importancia, estando estas estrechamente relacionadas con la humedad del suelo y el caudal. Esto puede deberse a la baja cantidad de muestras. De esta manera podemos decir que las variables más importantes que actúan como controladores de la concentración de COD en el agua de suelo Histosol son la velocidad del viento, evapotranspiración y la radiación solar.

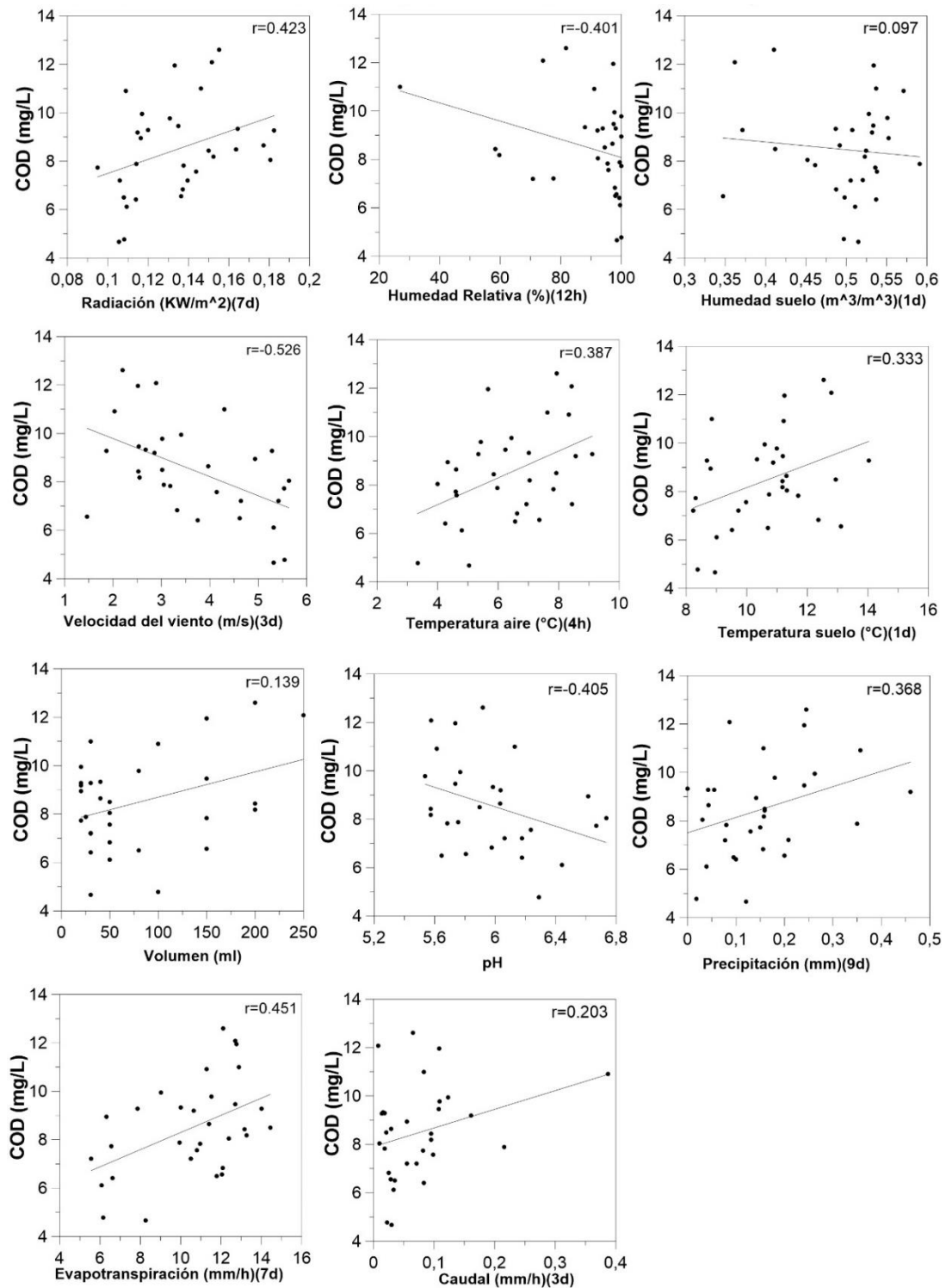


Figura 7. Relación de la concentración de COD y las variables hidrometeorológicas en agua de suelo Histosol. En los títulos de los ejes x se especifica la agregación que se usó para elaborar el gráfico (d=días, h=horas, mom=momento de la toma de muestra). Las agregaciones usadas corresponden con las que presentan el mayor coeficiente de correlación de Spearman (r), el valor de r también se indica en la parte superior de cada gráfico.



De esta manera, podemos entender la relación negativa existente entre la concentración de COD en el agua de suelo Histosol y las variables de la velocidad del viento y humedad relativa, debido a que estas variables condicionan el proceso de condensación del agua en el ambiente (Maestre & Martin-Gorriz, 2010) y pueden relacionarse con la concentración de COD mediante este fenómeno. Estos resultados coinciden con los observados en un ecosistema Tropical Monzónico con una precipitación anual similar a la obtenida en nuestra cuenca de estudio, donde se encontraron que las mayores concentraciones de COD ocurrieron en las estaciones secas (Singh, Rai, Pandey, & Singh, 2017). Los autores atribuyen este comportamiento a la baja humedad relativa que se presenta en las estaciones secas y que causa el aumento de materia orgánica que ingresa al suelo por la descomposición de hojarasca y raíces muertas (Singh et al., 2017). En la velocidad del viento la mejor correlación se presentó en la condición antecedente de 3 días, esto podría deberse a la relación existente entre esta variable, la evapotranspiración y la radiación solar, pues observamos que las mayores correlaciones de estas tres variables se encuentran en las condiciones antecedentes de 3 y 7 días. En la humedad relativa la mejor correlación se presentó en la condición antecedente de 12 horas, esto podría deberse a una variación de la humedad durante el día y la noche.

Además, la evapotranspiración también actúa como variable controladora de la concentración de COD en el agua de suelo Histosol en menor magnitud con una relación positiva, esto podría deberse a que la evapotranspiración está determinada por el tipo de suelo y contenido de agua del suelo (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006). En el suelo Histosol el agua es almacenada por largos periodos de tiempo (Mosquera et al., 2013) ocasionando una menor escorrentía subsuperficial, y aumentando de esta manera la evapotranspiración (Berrones & Oyarzún, 2013), lo que podría ocasionar un aumento en la concentración de COD en el suelo, debido a que existe la misma cantidad de soluto en menor cantidad de solvente. Estos resultados concuerdan con los observados en cuencas boscosas húmedas, donde se observa que en épocas de verano, cuando la evapotranspiración es mayor existe una acumulación de COD en el suelo, debido a un menor coeficiente de escorrentía (Huntington & Aiken, 2013). La radiación solar se relaciona de cierta forma con todas las variables mencionadas anteriormente, por lo tanto se considera parte de los fenómenos de condensación (Andrades & Muñoz, 2012). En la evapotranspiración y radiación solar la mejor correlación se presentó en la condición antecedente de 7 días, esto podría deberse a que mientras mayor sea el periodo de tiempo, la evapotranspiración provoca un descenso en la escorrentía, lo cual causaría un aumento en las concentraciones de COD en el suelo. Por otra parte, la



radiación solar afecta directamente a la actividad de la vegetación, por lo tanto, también en la evapotranspiración, lo cual podría explicar que ambas variables tengan la mayor correlación en la misma condición antecedente.

Además, como un controlador menor el pH presenta una correlación moderada con una relación negativa con la concentración de COD en el agua de suelo Histosol, esto puede deberse a que está involucrada en múltiples dinámicas del suelo, por ejemplo: el potencial de sorción, disponibilidad de cationes y degradación microbiana (E. Martínez et al., 2008; van den Berg et al., 2012), por lo que su influencia no se podría determinar a un mecanismo en específico. Sin embargo, un incremento en el pH causa una mejora de condiciones para la respiración bacteriana y, por consiguiente, aumente la descomposición de COD (Räsänen, Kankaala, Tahvanainen, Akkanen, & Saarnio, 2014). Estos resultados coinciden con estudios realizados en suelos con alto contenido de materia orgánica, donde se observa que el pH es uno de los principales controladores en el movimiento de COD hacia aguas superficiales (Kemmitt, Wright, Goulding, & Jones, 2006; Schwalm & Zeitz, 2015), pues la acidez del suelo influye en la capacidad de adsorción del carbono orgánico y afecta a varios sistemas bióticos y abióticos que se relacionan con la concentración de COD en el suelo (J. Clark et al., 2005; van den Berg et al., 2012).

También, la temperatura del aire y temperatura del suelo actúan como variables controladoras de la concentración de COD en el agua de suelo Histosol en menor magnitud con una relación positiva, esto podría deberse a un aumento en la actividad microbiana y radicular (Guggenberger & Zech, 1993; Zhang et al., 2016). En las partes superficiales del suelo, se ha observado que en periodos de mayor temperatura se da un aumento de actividad microbiótica y por ende un aumento en la producción de carbono orgánico (Schwalm & Zeitz, 2015). Estos resultados coinciden con varios estudios llevados a cabo en suelos Histosol, que muestran que en épocas de mayor temperatura la concentración de COD tiende a aumentar, debido a una mayor actividad microbiana (Billett, Deacon, Palmer, Dawson, & Hope, 2006; J. Clark et al., 2005; van den Berg et al., 2012). En la temperatura del aire la mejor correlación se presentó en la condición antecedente de 4 horas, esto podría deberse a que la actividad microbiana del suelo es sensible a cambios rápido en la temperatura del aire. En la temperatura del suelo la mejor correlación se presentó en la condición antecedente de 1 día, esto podría deberse a que al ser un medio con menor conductividad térmica el tiempo en el que cambia su temperatura es mayor, alterando la actividad microbiana del suelo con estos cambios.



Finalmente, la precipitación actúa como variable controladora de la concentración de COD en el agua de suelo Histosol en menor magnitud con una relación positiva, esto podría deberse a que la precipitación es una entrada de agua al suelo (Andrades & Múñez, 2012), por lo que puede afectar las concentraciones de COD por dilución (Hinton et al., 1997; Pesántez et al., 2018), y también influye sobre el flujo de COD en el suelo (van den Berg et al., 2012). Esto coincide con lo observado en estudios realizados en cuencas con suelos clasificados como Histosol, donde se muestra que en periodos secos o en los que se observa un descenso en el nivel freático causan una retención de COD, es decir, se suprime parcialmente la liberación del mismo (J. Clark et al., 2005; Sarkkola et al., 2009). Esto los autores lo atribuyen a una disminución de la generación de escorrentía, la acidificación del agua de suelo y un aumento en la fuerza iónica debido a un aumento en la producción de sulfatos (SO_4^{2-}) e iones Hidrógeno (H^+). En la precipitación la mejor correlación se presentó en la condición antecedente de 9 días, este puede ser el tiempo en el que la red hidrológica del suelo Histosol tarda en reaccionar a un evento de precipitación.

4.2.4. Relación entre las variables hidrometeorológicas y la concentración de carbono orgánico disuelto en agua de suelo Andosol.

En la Tabla 6 se presentan los coeficientes de correlación de Spearman (r) para las variables hidrometeorológicas en los periodos de tiempo especificados con la concentración de COD en agua de suelo Andosol. Se observó que las variables hidrometeorológicas no presentaron correlaciones estadísticamente significativas ($p > 0.05$) en ninguna condición antecedente para la concentración de COD en el agua de suelo Andosol. Además, se encontró que en este compartimento se presentaron las correlaciones más bajas entre las variables hidrometeorológicas y la concentración de COD. La variable que presentó la mejor correlación ($r = -0.29$) fue la precipitación en la condición antecedente de 15 días. La humedad relativa presentó una correlación baja ($0.29 > |r| > 0.1$) desde el momento de la toma de muestra hasta las condiciones antecedentes de 7 días. La temperatura del aire y la evapotranspiración tuvieron una correlación baja desde el momento de la toma de muestra hasta la condición antecedente de 1 día. La radiación solar tuvo una correlación baja solo en las condiciones antecedentes de 4 horas. La velocidad del viento presentó correlaciones bajas desde las condiciones antecedentes de 9 días hasta los 15 días. El caudal tuvo correlaciones bajas en todas las condiciones antecedentes de tiempo, mientras que la humedad del suelo solo presentó en las condiciones antecedentes de 5 días hasta los 15 días. El volumen de agua, pH y temperatura de suelo muestran una correlación nula ($|r| < 0.09$) con la concentración de COD en todas las condiciones antecedentes de tiempo.

Tabla 6. Resultados regresión COD - variables hidrometeorológicas en agua de suelo Andosol

Variable hidrometeorológica	r									
	Momento	4 horas	12 horas	1 día	3 día	5 día	7 día	9 día	12 día	15 día
Precipitación	-0.01	0.08	0.05	0.08	-0.07	0.02	-0.09	-0.18	-0.26	-0.29
Humedad Relativa	0.18	0.17	0.18	0.19	0.13	0.16	0.15	0.05	-0.02	-0.02
Temperatura del aire	-0.22	-0.21	-0.18	-0.12	-0.08	-0.05	-0.06	-0.06	-0.09	-0.07
Evapotranspiración	-0.13	-0.17	-0.23	-0.21	-0.07	-0.05	-0.07	-0.07	-0.03	0.00
Radiación	-0.1	-0.16	-0.15	-0.1	-0.05	-0.1	-0.14	-0.06	0.00	0.03
Velocidad del viento	0.01	0.04	-0.01	0.04	0.06	0.08	0.08	0.11	0.14	0.13
Caudal	-0.12	-0.13	-0.13	-0.13	-0.16	-0.17	-0.23	-0.23	-0.25	-0.22
Volumen de agua	-0.07	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
pH	0.00	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Humedad suelo	-0.08	-0.08	-0.08	-0.07	0	-0.1	-0.19	-0.17	-0.2	-0.18
Temperatura Suelo	-0.05	-0.03	-0.03	-0.05	-0.05	-0.07	-0.05	-0.06	-0.02	-0.04

Coeficientes de correlación de Spearman (r) para la microcuenca del río Zhuruca. Se resaltan en **negrita** las mayores correlaciones en cada una de las variables hidrometeorológicas. La magnitud de la correlación se remarca en escala de colores de



rojo a verde, siguiendo los siguientes criterios propuestos por M. Martínez et al., 2010. Clasificación de los coeficientes de correlación: 1-0.7 muy alta (rojo), 0.69-0.50 alta (naranja), 0.49-0.30 moderada (verde oscuro), 0.29-0.10 baja (verde claro), 0.09> nula (blanco). Presentan asteriscos los valores en donde las regresiones fueron estadísticamente significativas ($p < 0.05$). Niveles de significación: *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.

En la Figura 8 se presenta los gráficos de dispersión de cada una de las variables analizadas en la condición antecedente que presentó el mayor valor de r con la concentración de COD en el agua de suelo Andosol. También, los valores de r de cada variable se presentan en la Figura 8. Las variables más importantes fueron: la precipitación, caudal y la evapotranspiración. Las variables de la temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento, temperatura del suelo, volumen de agua y pH del suelo presentaron correlaciones bajas. Estas variables no pueden ser consideradas como controladores pues se observan que tienen una distribución amplia, y por lo tanto no muestran una tendencia en sus comportamientos. Por otra parte, las variables de la humedad relativa y humedad del suelo, poseen un rango de distribución menor, por lo tanto, no pueden ser consideradas como controladores. Para el análisis en el agua de suelo Andosol únicamente se consideraron las variables de precipitación, pues presentó el valor de r más alto. Se excluyeron del análisis las variables restantes, pues no presentan correlaciones estadísticamente significativas ($p > 0.05$) y tienen una correlación baja o nula. En este estudio no se encontró que la humedad del suelo es una variable controladora de la concentración de COD en agua de suelo Andosol, sin embargo, esto es inusual considerando que la precipitación tiene una mayor importancia, estando esta variable estrechamente relacionada con la humedad del suelo. Esto puede deberse a la baja cantidad de muestras. De esta manera podemos decir que las variables más importantes que actúan como controladores de la concentración de COD en el agua de suelo Andosol son la precipitación, caudal y la evapotranspiración.

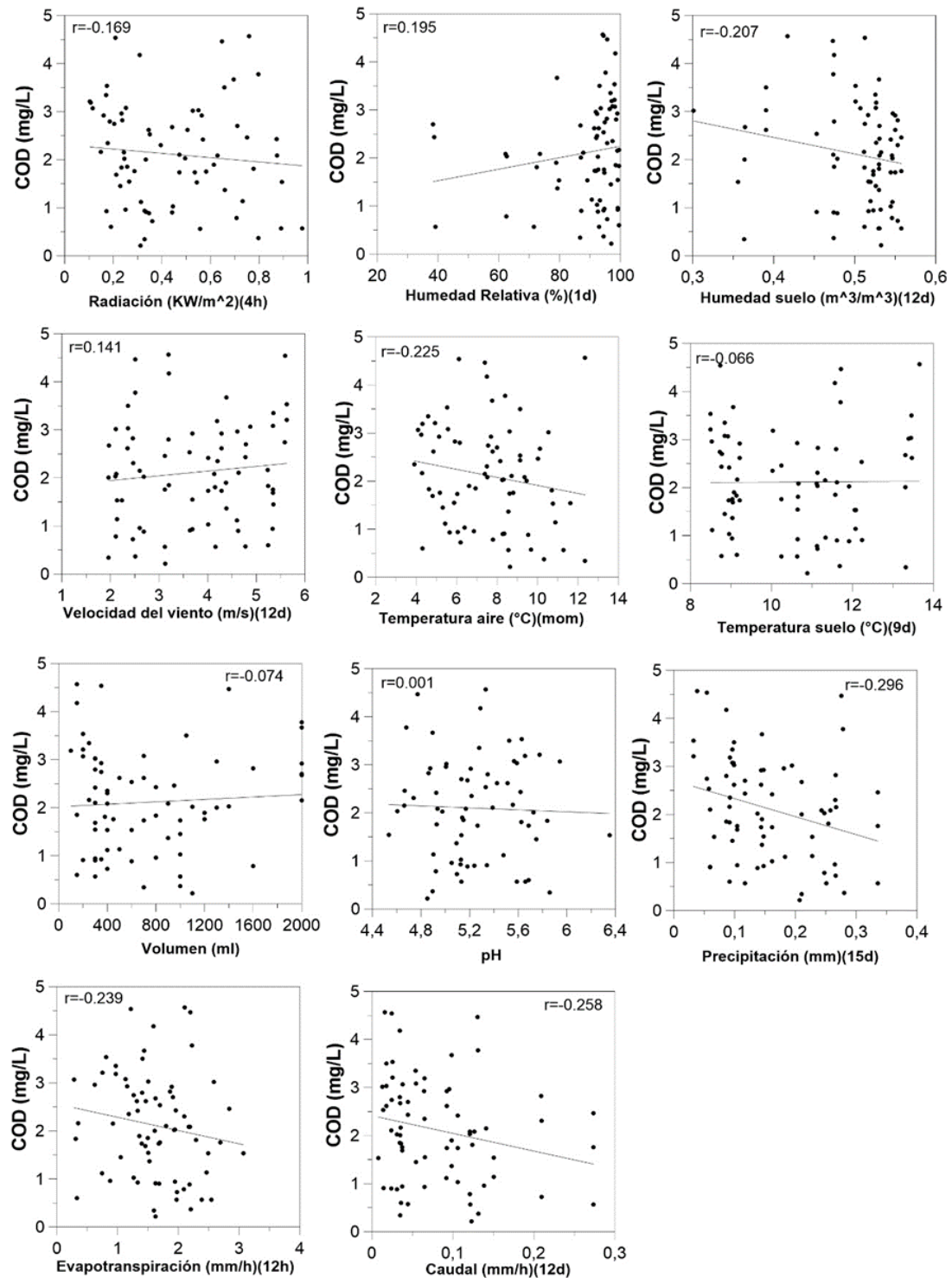


Figura 8. Relación de la concentración de COD y las variables hidrometeorológicas en agua de suelo Andosol. En los títulos de los ejes x se especifica la agregación que se usó para elaborar el gráfico (d=días, h=horas, mom=momento de la toma de muestra). Las agregaciones usadas corresponden con las que presentan el mayor coeficiente de correlación de Spearman (r), el valor de r también se indica en la parte superior de cada gráfico.



La precipitación es la principal variable controladora, aunque la relación no fue significativa presentó una ligera tendencia negativa con la concentración de COD en el agua de suelo Andosol (Ver Figura 8), esto puede deberse a un mecanismo de dilución por el aumento de la humedad del suelo por eventos de precipitación, disminuyendo la concentración de COD en el agua de suelo (Hinton et al., 1997; Pesántez et al., 2018). Además, la ubicación y pendiente de estos suelos en la zona de estudio provoca un movimiento más rápido del agua debido a efectos de la gravedad (Mosquera et al., 2013). Esto sumado al hecho de que cumplen el papel de recargar a los Histosoles durante los periodos de humedad normal causa que los tiempos de residencia del agua en el suelo sean bajos y por lo tanto, la exportación de COD disminuya (Neff & Asner, 2001). Estos resultados contradicen lo observado en un ecosistema forestal, donde el mayor porcentaje de suelo son Andosoles, en el cual la precipitación presentó una correlación negativa significativa con la concentración de COD en el suelo, esto debido a que un aumento en el volumen de precipitación provoca el aumento en el flujo subsuperficial y provoca procesos de dilución en el suelo (Chen et al., 2017). En la precipitación la mejor correlación se presentó en la condición antecedente de 15 días, esto podría deberse a que el agua de precipitación demora en infiltrarse en este tipo de suelo y llegar a las piscinas de COD en este periodo de tiempo.

5. Conclusiones

Esta investigación tuvo como objetivo identificar como los controladores hidrometeorológicos influyen en la concentración de carbono orgánico disuelto (COD) en el agua de suelo y río de una cuenca de Páramo andino. Para esto se consideró: la variabilidad temporal y la posible relación de cada variable hidrometeorológica con la concentración de COD. En base a los resultados presentados se puede concluir lo siguiente:

- La concentración de COD no presenta una estacionalidad marcada, sin embargo, si se observa una variabilidad asociada al caudal y precipitación en el agua de río. Pues cuando existe un aumento en la precipitación y en el caudal, aumenta la concentración de COD.
- La concentración de COD no presenta una estacionalidad marcada en el agua de suelo Histosol y Andosol. Podría existir una variabilidad asociada a la precipitación, pero la variabilidad y la baja cantidad de las muestras no nos permite afirmar con seguridad la existencia de esta relación.
- La concentración de COD presenta una tendencia a incrementar dependiendo de la condición de caudal en la que fue tomada la muestra en el agua de río, pues en las condiciones de caudal alto se presentaron las concentraciones de COD más altas. Esta tendencia se puede deber a un proceso de exportación de COD al agua de río mediante la escorrentía generada por la precipitación.
- La concentración de COD no presenta cambios dependiendo de la condición de caudal en el agua de suelo Histosol y Andosol. La poca cantidad de muestras, tanto para suelo Histosol y Andosol, puede ser el factor determinante por el que no se observan diferencias entre la concentración de COD en las diferentes condiciones de caudal.
- En el agua de río las variables hidrometeorológicas que actúan como controladoras de la concentración de COD son: caudal, precipitación y humedad relativa. Esto indica que la concentración de COD en el agua de río esta principalmente dominado por procesos de transferencia de agua dentro de la cuenca.
- En agua de suelo Histosol las variables hidrometeorológicas que actúan como controladoras de la concentración de COD son: velocidad del viento, evapotranspiración y radiación solar. Esto indica que la concentración de COD en el agua de suelo Histosol puede estar dominada directamente por la evapotranspiración, debido a que tanto la velocidad del viento y radiación solar influyen directamente en la evapotranspiración. Además, un incremento en la



evapotranspiración causa un descenso en la escurrentía, lo que supone una menor exportación de COD en el suelo.

- En el agua de suelo Andosol no se encontraron variables hidrometeorológicas con una correlación lo suficientemente alta como para ser considerada como controladores de la concentración de COD en el agua de suelo Andosol.
- Teniendo en cuenta los análisis realizados se pudo observar que los principales controladores de la concentración de COD en la cuenca de estudio son: precipitación, caudal y la evapotranspiración, pues en los tres medios analizados una de estas variables es una de las más importantes. Esto indica la importancia de la humedad y movimiento de agua en los suelos de Páramo.



6. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en este estudio se recomienda:

- Para el análisis de variabilidad temporal en el agua de suelo sería interesante considerar un período mayor de tiempo con el objetivo de tener mayor número de muestras. Esto podría permitir incluir eventos meteorológicos importantes que causen un efecto en las concentraciones de COD.
- Obtener un mayor número de muestras para cada tipo de suelo nos daría una visión más clara de cómo se da el flujo de COD en cada tipo de suelo. También realizar un análisis con las muestras de acuerdo a la profundidad en las que fueron tomadas podría proveer conclusiones sobre como la concentración de COD varía de acuerdo a la profundidad en el suelo.
- Se debe continuar con el monitoreo de la concentración de COD y las variables hidrometeorológicas para ampliar la base de datos y llegar a estudiar tendencias a largo plazo.
- Se debe realizar estudios para identificar otras variables, como el tipo de vegetación, uso de suelo, influencia de la precipitación horizontal, alteraciones antrópicas o fuentes hídricas que podrían influenciar en la concentración de COD y poder llegar a conocer la dinámica de COD en el ecosistema de Páramo.

7. Bibliografía

- Aguilera, M. (2000). Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. *Simposio Proyecto Ley Protección de Suelo, Boletín N°*, 77–85.
- Alberts, J., Giesy, J., & Evans, D. (1984). Distribution of dissolved organic carbon and metal-binding capacity among ultrafilterable fractions isolated from selected surface waters of the southeastern United States. *Environmental Geology and Water Sciences*, 6(2), 91–101. <https://doi.org/10.1007/BF02509915>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Roma: FAO.
- Andrades, M., & Múñez, C. (2012). *Fundamentos de climatología* (1era Edici). Logroño: Universidad de La Rioja.
- Battin, T., Luysaert, S., Kaplan, L., Aufdenkampe, A., Richter, A., & Tranvik, L. (2009). The boundless carbon cycle. *Nature Geoscience*, 2(9), 598–600. <https://doi.org/10.1038/ngeo618>
- Berrones, G., & Oyarzún, C. (2013). Efecto de la transpiración sobre la escorrentía en dos tipos de bosque de la cordillera de la costa, sur de Chile. *Enfoque UTE*, 4(2), 18–34. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v4n2.26>
- Bierzoza, M., Baker, A., & Bridgeman, J. (2009). Relating freshwater organic matter fluorescence to organic carbon removal efficiency in drinking water treatment. *Science of the Total Environment*, 407(5), 1765–1774. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.11.013>
- Billett, M., Deacon, C., Palmer, S., Dawson, J., & Hope, D. (2006). Connecting organic carbon in stream water and soils in a peatland catchment. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 111(2), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2005JG000065>
- Birkel, C., Broder, T., & Biester, H. (2017). Nonlinear and threshold-dominated runoff generation controls DOC export in a small peat catchment. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122(3), 498–513. <https://doi.org/10.1002/2016JG003621>
- Bolan, N., Domy, A., & De-la-Luz, M. (2004). Dynamics and environmental significance of dissolved organic matter in soil. *Advances in Agronomy*, 110(C), 1–75. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385531-2.00001-3>
- Boorman, G., Dellarco, V., Dunnick, J., Chapin, R., Hunter, S., Hauchman, F., ... Sills,

- R. (1999). Drinking water disinfection byproducts: Review and approach to toxicity evaluation. *Environmental Health Perspectives*, 107(SUPPL. 1), 207–217.
<https://doi.org/10.2307/3434484>
- 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* (p. 12). Retrieved from <http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/6.-Ing.-Vicente-Iniguez.-Hidropedologia.pdf>
- 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*, 59(6), 1209–1227. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01063.x>
- Boyer, E. W., Hornberger, G. M., Bencala, K. E., & Mcknight, D. M. (1997). Response characteristics of DOC flushing in an alpine catchment. *Hydrological Processes*, 11(12), 1635–1647. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1085\(19971015\)11:12<1635::aid-hyp494>3.0.co;2-h](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(19971015)11:12<1635::aid-hyp494>3.0.co;2-h)
- Buytaert, W., & Beven, K. (2011). Models as multiple working hypotheses: Hydrological simulation of tropical alpine wetlands. *Hydrological Processes*, 25(11), 1784–1799. <https://doi.org/10.1002/hyp.7936>
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., & Cisneros, F. (2003). Hidrología del Páramo Andino: Propiedades, Importancia y Vulnerabilidad.
<https://doi.org/paramo.cc.ic.ac.uk/pubs/ES/Hidroparamo2.pdf>
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Cuesta-Camacho, F., & Tobón, C. (2011). Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 19–33. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00585.x>
- Buytaert, W., & De Bievre, B. (2012). Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes. *Water Resources Research*, 48(8), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2011WR011755>
- Buytaert, W., Sevink, J., De Leeuw, B., & Deckers, J. (2005). Clay mineralogy of the

- soils in the south Ecuadorian páramo region. *Geoderma*, 127(1–2), 114–129. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.11.021>
- Buytaert, W., Vuille, M., Dewulf, A., Urrutia, R., Karmalkar, A., & Céleri, R. (2010). Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: Implications for water resources management. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(7), 1247–1258. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1247-2010>
- Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Córdova, M., Céleri, R., & Bendix, J. (2016). Dynamic mapping of evapotranspiration using an energy balance-based model over an andean páramo catchment of southern Ecuador. *Remote Sensing*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/rs8020160>
- Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Rollenbeck, R., Céleri, R., & Bendix, J. (2019). The breathing of the Andean highlands: Net ecosystem exchange and evapotranspiration over the páramo of southern Ecuador. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265(November 2018), 30–47. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.006>
- Castañeda, A., & Montes, C. (2017). Carbono almacenado en páramo andino. *Entramado*, 13(1), 210–221. <https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25112>
- Céleri, R., & Feyen, J. (2009). The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives. *Mountain Research and Development*, 29(4), 350–355. <https://doi.org/10.1659/mrd.00007>
- Chapa, J. (2014). *Evaluación de la lixiviación de nutrientes en la cuenca de páramo andino del río Zhurucaiy*. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/5440>
- Chen, S., Yoshitake, S., Iimura, Y., Asai, C., & Ohtsuka, T. (2017). Dissolved organic carbon (DOC) input to the soil: DOC fluxes and their partitions during the growing season in a cool-temperate broad-leaved deciduous forest, central Japan. *Ecological Research*, 32(5), 713–724. <https://doi.org/10.1007/s11284-017-1488-6>
- Clark, J., Chapman, P., Adamson, J., & Lane, S. (2005). Influence of drought-induced acidification on the mobility of dissolved organic carbon in peat soils. *Global Change Biology*, 11(5), 791–809. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00937.x>

- Clark, R., & Sivaganesan, M. (1998). Predicting chlorine residuals and formation of TTHMs in drinking water. *Journal of Environmental Engineering*, 124(12), 1203–1210. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1998\)124:12\(1203\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1998)124:12(1203))
- Conant, R., Ryan, M., Ågren, G., Birge, H., Davidson, E., Eliasson, P., ... Bradford, M. (2011). Temperature and soil organic matter decomposition rates - synthesis of current knowledge and a way forward. *Global Change Biology*, 17(11), 3392–3404. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02496.x>
- Córdova, M., Célleri, R., Shellito, C., Orellana-Alvear, J., Abril, A., & Carrillo-Rojas, G. (2016). Near-surface air temperature lapse rate over complex terrain in the Southern Ecuadorian Andes: Implications for temperature mapping. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 48(4), 673–684. <https://doi.org/10.1657/AAAR0015-077>
- Correa, A., Windhorst, D., Tetzlaff, D., Crespo, P., Célleri, R., Feyen, J., & Breuer, L. (2017). Temporal dynamics in dominant runoff sources and flow paths in the Andean Páramo. *Water Resources Research*, 53(7), 5998–6017. <https://doi.org/10.1002/2016WR020187>
- Crespo, P., Bücker, A., Feyen, J., Vaché, K., 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*, 26(25), 3896–3910. <https://doi.org/10.1002/hyp.8382>
- Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., ... De Bièvre, B. (2014). Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. *Avances En Investigación Para La Conservación de Los Páramos Andinos, CONDESAN*, (August), 287–304. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/264416399>
- Dalzell, B., Filley, T., & Harbor, J. (2007). The role of hydrology in annual organic carbon loads and terrestrial organic matter export from a midwestern agricultural watershed. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(6), 1448–1462. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.12.009>
- Esquivel-Hernández, G., Mosquera, G., Sánchez-Murillo, R., Quesada-Román, A., Birkel, C., Crespo, P., ... Boll, J. (2019). Moisture transport and seasonal variations in the stable isotopic composition of rainfall in Central American and Andean Páramo during El Niño conditions (2015–2016). *Hydrological Processes*,

- 33(13), 1802–1817. <https://doi.org/10.1002/hyp.13438>
- FAO. (2001). *Soil carbon sequestration for improved land management. World Soil Resources Reports*.
- FAO. (2017). Mapa del carbono orgánico en el suelo. <https://doi.org/10.1029/2008GB003327>
- Felizzola, J., Cak, A., Figueiredo, R., & Lima, M. (2019). Metals and dissolved organic carbon (DOC) of surface waters in two adjacent watersheds in the Eastern Amazon. *Revista Ambiente e Agua*, 14(6). <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2377>
- Fiedler, S., & Kalbitz, K. (2003). Concentrations and properties of dissolved organic matter in forest soils as affected by the redox regime. *Soil Science*, 168(11), 793–801. <https://doi.org/10.1097/01.ss.0000100471.96182.03>
- Gielen, B., Neiryck, J., Luysaert, S., & Janssens, I. (2011). The importance of dissolved organic carbon fluxes for the carbon balance of a temperate Scots pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(3), 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.10.012>
- González-Domínguez, B., Niklaus, P., Studer, M., Hagedorn, F., Wacker, L., Haghipour, N., ... Abiven, S. (2019). Temperature and moisture are minor drivers of regional-scale soil organic carbon dynamics. *Scientific Reports*, 9(1), 6422. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42629-5>
- Guamán, V. (2019). *Análisis de la variabilidad espacial y temporal de la calidad de agua en una zona de páramo húmedo al sur del Ecuador*. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/32347>
- Guggenberger, G., Christensen, B., & Zech, W. (1994). Land-use effects on the composition of organic matter in particle-size separates of soil: I. Lignin and carbohydrate signature. *European Journal of Soil Science*, 45(4), 449–458. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1994.tb00530.x>
- Guggenberger, G., & Zech, W. (1993). Dissolved organic carbon control in acid forest soils of the Fichtelgebirge (Germany) as revealed by distribution patterns and structural composition analyses. *Geoderma*, 59(1–4), 109–129. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90065-S](https://doi.org/10.1016/0016-7061(93)90065-S)
- Hinton, M., Schiff, S., & English, M. (1997). The significance of storms for the concentration and export of dissolved organic carbon from two Precambrian



- Shield catchments. *Biogeochemistry*, 36(1), 67–88.
<https://doi.org/10.1023/A:1005779711821>
- Hofstede, R. (1999). El Páramo como espacio para la fijación de carbono atmosférico. *El Páramo Com Espacio de Mitigación de Carbono Atmosférico*.
- Hungerbühler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Seward, D., Egüez, A., Peterson, D., ... Hammer, C. (2002). Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. *Earth-Science Reviews*, 57(1–2), 75–124.
[https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00071-X)
- Huntington, T., & Aiken, G. (2013). Export of dissolved organic carbon from the Penobscot River basin in north-central Maine. *Journal of Hydrology*, 476, 244–256. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.039>
- Hynes, H. (1983). Groundwater and stream ecology. *Hydrobiologia*, 100(1), 93–99.
<https://doi.org/10.1007/BF00027424>
- Josse, C., Cuesta, F., Navarro, G., Barrena, V., Cabrera, E., Chacón-Moreno, E., ... Tovar, A. (2009). Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro, 7–93.
- Kemmitt, S., Wright, D., Goulding, K., & Jones, D. (2006). pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(5), 898–911. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.08.006>
- Kerekes, J., Beauchamp, S., Tordon, R., Tremblay, C., & Pollock, T. (1986). Organic Versus Anthropogenic Acidity in Tributaries of the Kejimikujik Watersheds in Western Nova Scotia. In *Acidic Precipitation* (pp. 1219–1227). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3385-9_123
- Lauerwald, R., Hartmann, J., Ludwig, W., & Moosdorf, N. (2012). Assessing the nonconservative fluvial fluxes of dissolved organic carbon in North America. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 117(1), 1–19.
<https://doi.org/10.1029/2011JG001820>
- Llambí, L. D., Soto-W, A., Célleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). *Páramos Andinos Ecología, hidrología y suelos de páramos*. Retrieved from www.flacsoandes.edu.ec
- Lloret, E., Dessert, C., Pastor, L., Lajeunesse, E., Crispi, O., Gaillardet, J., & Benedetti, M. (2013). Dynamic of particulate and dissolved organic carbon in small volcanic mountainous tropical watersheds. *Chemical Geology*, 351, 229–244.

<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.05.023>

Ma, W., Li, Z., Ding, K., Huang, J., Nie, X., Zeng, G., ... Liu, G. (2014). Effect of soil erosion on dissolved organic carbon redistribution in subtropical red soil under rainfall simulation. *Geomorphology*, 226, 217–225.

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.08.017>

Maestre, J., & Martin-Gorriz, B. (2010). Influencia de la humedad relativa y el viento en el funcionamiento de condensadores radiativos pasivos. *III Jornadas de Introducción a La Investigación de La UPCT*, (May), 1–4.

Martínez, E., Fuentes, J. P., & Acevedo, E. (2008). Carbono orgánico y propiedades del suelo. *J. Soil Sc. Plant Nutr*, 8(1), 68–96. <https://doi.org/10.4067/s0718-27912008000100006>

Martínez, M., Ortiz, R., Río, H., & Acosta, R. (2010). Análisis de las correlaciones en poblaciones Cubanas de maíz. *Cultivos Tropicales*, 31(2), 82–91.

<https://doi.org/10.1234/ct.v31i2.104>

Mertens, J., Diels, J., Feyen, J., & Vanderborght, J. (2007). Numerical Analysis of Passive Capillary Wick Samplers prior to Field Installation. *Soil Science Society of America Journal*, 71(1), 35–42. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0106>

Messer, T., Birgand, F., & Burchell, M. (2019). Diel fluctuations of high level nitrate and dissolved organic carbon concentrations in constructed wetland mesocosms. *Ecological Engineering*, 133(July 2018), 76–87.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.027>

Meybeck, M. (1988). How to Establish and Use World Budgets of Riverine Materials. In *Physical and Chemical Weathering in Geochemical Cycles* (pp. 247–272).

Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3071-1_12

Moody, C., Worrall, F., Evans, C., & Jones, T. (2013). The rate of loss of dissolved organic carbon (DOC) through a catchment. *Journal of Hydrology*, 492, 139–150.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.016>

Mosquera, G., Céleri, R., Lazo, P., Vaché, K., Perakis, S., & Crespo, P. (2016). Combined use of isotopic and hydrometric data to conceptualize ecohydrological processes in a high-elevation tropical ecosystem. *Hydrological Processes*, 30(17), 2930–2947. <https://doi.org/10.1002/hyp.10927>

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, Revista Científica*, 3(2), 87–105.
- Mosquera, G., Lazo, P., Célleri, R., Wilcox, B., & Crespo, P. (2015). Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of wetlands. *Catena*, 125, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.010>
- Mulholland, P. (2007). Large-Scale Patterns in Dissolved Organic Carbon Concentration, Flux, and Sources. In *Aquatic Ecosystems* (pp. 139–159). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-012256371-3/50007-x>
- Neff, J., & Asner, G. (2001). Dissolved organic carbon in terrestrial ecosystems: Synthesis and a model. *Ecosystems*, 4(1), 29–48. <https://doi.org/10.1007/s100210000058>
- Ochoa-Tocachi, B., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., ... Arias, S. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30(22), 4074–4089. <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>
- Padhi, R., Subramanian, S., Mohanty, A., & Satpathy, K. (2019). Comparative assessment of chlorine reactivity and trihalomethanes formation potential of three different water sources. *Journal of Water Process Engineering*, 29, 100769. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2019.02.009>
- Padrón, R., Wilcox, B., Crespo, P., & Célleri, R. (2015). Rainfall in the andean páramo: New insights from high-resolution monitoring in southern Ecuador. *Journal of Hydrometeorology*, 16(3), 985–996. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0135.1>
- Palacios, D. (2017). *Evaluación del ingreso y exportación de nutrientes en la cuenca de Páramo andino del río Quinuas*.
- Pereira, M. (2000). *Health Risk of the Trihalomethanes Found in Drinking Water Carcinogenic Activity and Interactions*. Retrieved from https://cfpub.epa.gov/ncer_abstracts/index.cfm/fuseaction/display.highlight/abstract/22/report/F
- Pesántez, J., Mosquera, G., Crespo, P., Breuer, L., & Windhorst, D. (2018). Effect of land cover and hydro-meteorological controls on soil water DOC concentrations in a high-elevation tropical environment. *Hydrological Processes*, 32(17), 2624–2635. <https://doi.org/10.1002/hyp.13224>

- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Célleri, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. *Suelos Ecuatoriales*, 42(2), 138–153.
- Ramesh, T., Bolan, N., Kirkham, M. B., Wijesekara, H., Kanchikerimath, M., Srinivasa Rao, C., ... Freeman, O. (2019). Soil organic carbon dynamics: Impact of land use changes and management practices: A review. *Advances in Agronomy*, 156, 1–107. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.02.001>
- Räsänen, N., Kankaala, P., Tahvanainen, T., Akkanen, J., & Saarnio, S. (2014). Short-term effects of phosphorus addition and pH rise on bacterial utilization and biodegradation of dissolved organic carbon (DOC) from boreal mires. *Aquatic Ecology*, 48(4), 435–446. <https://doi.org/10.1007/s10452-014-9496-x>
- Rizinjirabake, F., Abdi, A., Tenenbaum, D., & Pilesjö, P. (2018). Riverine dissolved organic carbon in Rukarara River Watershed, Rwanda. *Science of the Total Environment*, 643, 793–806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.194>
- Rizinjirabake, F., Pilesjö, P., & Tenenbaum, D. (2019). Dissolved organic carbon leaching flux in a mixed agriculture and forest watershed in Rwanda. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 26, 100633. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100633>
- Sánchez-Murillo, R., Romero-Esquivel, L., Jiménez-Antillón, J., Salas-Navarro, J., Corrales-Salazar, L., Álvarez-Carvajal, J., ... Birkel, C. (2019). DOC Transport and Export in a Dynamic Tropical Catchment. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(6), 1665–1679. <https://doi.org/10.1029/2018JG004897>
- Sarkkola, S., Koivusalo, H., Laurén, A., Kortelainen, P., Mattsson, T., Palviainen, M., ... Finér, L. (2009). Trends in hydrometeorological conditions and stream water organic carbon in boreal forested catchments. *Science of the Total Environment*, 408(1), 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.008>
- Sarmiento, A., Rojas, M., Medina, E., Olivet, C., & Casanova, J. (2003). Investigación de trihalometanos en agua potable del Estado Carabobo, Venezuela. *Gaceta Sanitaria*, 17(2), 137–143. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0213-9111\(03\)71711-7](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0213-9111(03)71711-7)
- Schindler, D., Curtis, J., Parker, B., & Stainton, M. (1996). Consequences of climate warming and lake acidification for UV-B penetration in North American boreal

- lakes. *Nature*, 379(6567), 705–708. <https://doi.org/10.1038/379705a0>
- Schwalm, M., & Zeitz, J. (2015). Concentrations of dissolved organic carbon in peat soils as influenced by land use and site characteristics - A lysimeter study. *Catena*, 127, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.007>
- Scott, M., Jones, M., Woof, C., & Tipping, E. (1998). Concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in drainage water from an upland peat system, 537–546.
- Seitzinger, S., Mayorga, E., Bouwman, A., Kroeze, C., Beusen, A., Billen, G., ... Harrison, J. (2010). Global river nutrient export: A scenario analysis of past and future trends. *Global Biogeochemical Cycles*, 24(2). <https://doi.org/10.1029/2009GB003587>
- Sherene, T. (2009). Effect of Dissolved Organic Carbon (DOC) on Heavy Metal Mobility in Soils, 8(1993), 0–4. Retrieved from [http://www.neptjournal.com/upload-images/NL-1-34-\(34\)B-1334.pdf](http://www.neptjournal.com/upload-images/NL-1-34-(34)B-1334.pdf)
- Shoji, S., Nanzyo, M., & Dahlgren, R. (1993). *Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization*. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(95\)90034-9](https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)90034-9)
- Singh, A., Rai, A., Pandey, V., & Singh, N. (2017). Contribution of glomalin to dissolve organic carbon under different land uses and seasonality in dry tropics. *Journal of Environmental Management*, 192, 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.041>
- Six, J., Conant, R., Paul, E., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Song, K., Wen, Z., Shang, Y., Yang, H., Lyu, L., Liu, G., ... Zhao, Y. (2018). Quantification of dissolved organic carbon (DOC) storage in lakes and reservoirs of mainland China. *Journal of Environmental Management*, 217, 391–402. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.121>
- Strohmeier, S., Knorr, K., Reichert, M., Frei, S., Fleckenstein, J., Peiffer, S., & Matzner, E. (2013). Concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in runoff from a forested catchment: Insights from high frequency measurements. *Biogeosciences*, 10(2), 905–916. <https://doi.org/10.5194/bg-10-905-2013>
- Swift, R. (2001). Sequestration of carbon by soil. *Soil Science*, 166(11), 858–871. <https://doi.org/10.1097/00010694-200111000-00010>

- Tobón, C. (2009). *Los bosques andinos y el agua*. Quito. Retrieved from www.bosquesandinos.info
- van den Berg, L., Shotbolt, L., & Ashmore, M. (2012). Dissolved organic carbon (DOC) concentrations in UK soils and the influence of soil, vegetation type and seasonality. *Science of the Total Environment*, 427–428, 269–276. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.069>
- Vásconez, P., Medina, G., & Hofstede, R. (2001). Los Páramos del Ecuador. *Botánica Económica de Los Andes Centrales*, 2006, 91–109.
- Vidon, P., Wagner, L., & Soyeux, E. (2008). Changes in the character of DOC in streams during storms in two Midwestern watersheds with contrasting land uses. *Biogeochemistry*, 88(3), 257–270. <https://doi.org/10.1007/s10533-008-9207-6>
- Wagai, R., Kajiura, M., Asano, M., & Hiradate, S. (2015). Nature of soil organo-mineral assemblage examined by sequential density fractionation with and without sonication: Is allophanic soil different? *Geoderma*, 241–242, 295–305. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.11.028>
- Warner, K., & Saros, J. (2019). Variable responses of dissolved organic carbon to precipitation events in boreal drinking water lakes. *Water Research*, 156, 315–326. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.036>
- Wen, Z., Song, K., Liu, G., Shang, Y., Hou, J., Lyu, L., & Fang, C. (2019). Impact factors of dissolved organic carbon and the transport in a river-lake continuum in the Tibet Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 579(April), 124202. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124202>
- Willey, J., Kieber, R., Eyman, M., & Brooks Avery, G. (2000). Rainwater dissolved organic carbon: Concentrations and global flux. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(1), 139–148.
- Worrall, F., Parker, A., Rae, J., & Johnson, A. (1997). A study of the adsorption kinetics of isoproturon on soil and subsoil. *Chemosphere*, 34(1), 71–86. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(96\)00368-2](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(96)00368-2)
- Xing, J., Song, J., Yuan, H., Li, X., Li, N., Duan, L., & Qi, D. (2019). Atmospheric wet deposition of dissolved organic carbon to a typical anthropogenic-influenced semi-enclosed bay in the western Yellow Sea, China: Flux, sources and potential ecological environmental effects. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 182(7). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109371>



Zhang, T., Shi, S., Zhang, W., Wu, Y., Yang, M., & Wang, P. (2016). Environmental factors and dissolved organic carbon content in a Jinchuan peatland. *Acta Ecologica Sinica*, 36(3), 160–165. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2016.04.001>

Zheng, Y., Waldron, S., & Flowers, H. (2018). Fluvial dissolved organic carbon composition varies spatially and seasonally in a small catchment draining a wind farm and felled forestry. *Science of the Total Environment*, 626, 785–794. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.001>