

## IMPORTANCIA DE LA HIDROPEDOLOGIA EN LA DETERMINACION DE PROCESOS HIDROLOGICOS A ESCALA DE LADERA EN ZONAS DE PARAMO

V. Iñiguez<sup>1</sup>, P. Borja<sup>1</sup>, P. Crespo<sup>1,2</sup> y F. Cisneros<sup>1</sup>

### INTRODUCCION

#### Antecedentes

El ecosistema de páramo es una pradera neotropical alpina extendiéndose desde Colombia hasta el norte de Perú y cubriendo la región de los Andes por encima de los 3500 m s.n.m. (Medina y Mena, 2001; Hosftede et al., 2003). La interacción entre el clima frío y húmedo de las tierras altas y los depósitos de cenizas volcánicas resulta en la formación de un suelo orgánico muy peculiar en pendientes muy pronunciadas, altas cantidades de complejos orgánico-metálicos y propiedades hidrofísicas especiales, los cuales son clasificados como Andosoles de acuerdo con la World Reference Base for Soil Resources de la FAO (FAO/ISRIC/ISSS, 1998). El suelo funciona como un tanque de almacenamiento, liberando agua en una respuesta hidrológica lenta. Las tierras altas de los Andes septentrionales dependen casi completamente del páramo para su suministro de agua potable, riego y generación hidroeléctrica dependiendo fuertemente de la fuente constante de agua superficial de alta calidad proveniente del ecosistema de páramo. Se han alcanzado consensos sobre el impacto de los cambios de usos del suelo en la disponibilidad de caudal base en los ríos del páramo. Este estudio pretende tener un mejor entendimiento de los impactos de los cambios de uso del suelo en la hidrología del páramo a nivel de ladera.

### MATERIALES Y METODOS

#### Descripción del área de estudio

El proyecto se encuentra ubicado en los páramos de Quimsacocha (>3700 m s.n.m.). Esta zona de estudio tiene una especial connotación debido principalmente a su ubicación geográfica, estos páramos se localizan en las cabeceras de las cuencas hidrográficas de los ríos Yanuncay, Tarqui y Rircay. Los dos primeros ríos son afluentes del río Paute el mismo que desemboca en el océano Atlántico, en tanto que el río Rircay es afluente del río Jubones que desemboca en el océano Pacífico. En este contexto, los páramos de Quimsacocha se encuentran influenciados por las dos corrientes de aire que ascienden por la cordillera desde los dos océanos (ver Figura 1).

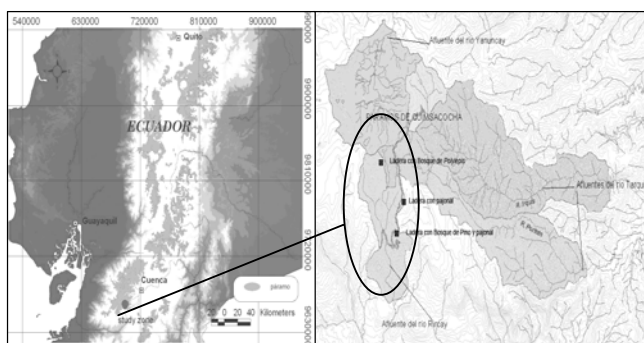


Figura 1. Mapa de la zona de estudio.

El clima de los páramos de Quimsacocha se caracteriza por una temperatura media mensual que esta alrededor de los 6 °C. La humedad relativa promedio mensual es de 90%. La velocidad del viento promedio mensual en invierno (entre Enero y Junio) es de aproximadamente 4 m/s, sin embargo, en verano (entre julio y diciembre) se presenta un incremento considerable de la velocidad del viento alcanzando valores de hasta 12 m/s. La radiación solar alcanza valores superiores a 1400 W/m<sup>2</sup> en

<sup>1</sup> Programa para el Manejo del Agua y del Suelo, Universidad de Cuenca, Ecuador.

<sup>2</sup> Institute of Landscape Ecology and Resources Management, Justus-Liebig-University Giessen, Germany  
Correo electrónico: [vicente.iniguez@ucuenca.edu.ec](mailto:vicente.iniguez@ucuenca.edu.ec)

verano. Los suelos más comunes en el páramo de Quimsacocha son los Andosoles y los Histosoles de acuerdo con la World Reference Base for soil Resources de la FAO (ISSS Working Group RB, 1998).

### Diseño experimental

En el presente estudio, la respuesta hidrológica del páramo es estudiada a escala de ladera. El plan experimental consiste de (1) monitoreo meteorológico detallado del clima del páramo, en particular su variabilidad; (2) continuos monitoreos de varias laderas con diferente vegetación en zonas de páramo. Estos resultados son complementados con experimentos a pequeña escala, principalmente experimentos hidrológicos de conductividad en campo y ensayos en laboratorio de hidrofísica de suelos.

En la zona de estudio tres laderas experimentales han sido seleccionadas, una de ellas con representativa, vegetación natural del páramo y las otras dos con diferente cobertura (una ladera reforestada con pinos *Patula* y un relicto de bosque nativo *Polylepis*), ver Figura 1. Cerca de estas laderas, una estación meteorológica es instalada para monitoreo del clima, es decir: medición de la velocidad y dirección del viento, radiación solar, humedad relativa y temperatura del aire. Las laderas se encuentran ubicadas lo más cercanamente posible a una estación pluviográfica para monitoreo de la precipitación. Adicionalmente, un equipo completo de TDR (sondas para medición de la humedad del suelo) ha sido instalado en cada ladera.

En la ladera de pajonal una sonda adicional para medición de la tensión en el suelo o potencial matricial (Davis, 2006) es instalada. La sonda tiene la posibilidad de instalar hasta cuatro tensiómetros. La tensión es medida por el método del gypsum (Eijkelkamp, 2005). Estos cuatro tensiómetros son colocados conjuntamente con sondas de TDR a diferentes profundidades y siguiendo una misma alineación (en sentido de la pendiente de la ladera). Los cuatro pozos se encuentran igualmente separados una distancia igual a 1.50 m. Es decir cubren una longitud total igual a 6.00 m, estos pozos están recubiertos con tubería de PVC, diámetro igual a 10 cm, de esta forma se impide el ingreso de la precipitación o flujo preferencial. Las profundidades a las que se encuentran instaladas las sondas son: pozo 1, > 70 cm en el horizonte C; pozo 2, de 40-70cm; pozo 3, de 20-50 cm y finalmente pozo 4, de 0-30 cm.

Una descripción detallada de la implementación del sistema de monitoreo de escorrentía tanto superficial como subsuperficial puede ser visto en Iñiguez et al., 2008. Por otro lado, en cada una de las laderas se realiza un levantamiento topográfico a detalle empleando una estación total, sin embargo, en el Bosque de *Polylepis* el levantamiento topográfico se realizó por medio de un nivel de mano y a través de varios transectos.

Paralelamente a la instalación de las estaciones meteorológicas y del monitoreo de las laderas, los conjuntos de datos son complementados con el siguiente experimento: se determinan curvas de calibración para los equipos utilizados en el monitoreo de la humedad del suelo, previa a su instalación (Borja et al, 2008). Los equipos empleados se conocen como TDR (Time Domain Reflectometry). Como el contenido de agua de los suelos del páramo se encuentra entre 70 y 90%, curvas de calibración disponibles en literatura, las cuales tienen un rango de validez entre 0 y 40% (Campbell, 2006), no pueden ser usadas. Una descripción detallada del experimento para la determinación de las curvas de calibración se puede encontrar en Borja et al, 2008.

### Análisis de la información

Los datos generados permitirán los siguientes análisis:

**Datos de precipitación:** Los equipos empleados para la determinación tanto de la precipitación como de la escorrentía subsuperficial son pluviógrafos de cubeta basculante. En estos equipos viene

incluidos dispositivos de almacenamiento continuo para los impulsos de lluvia registrados. Esta información es agregada a intervalos de tiempo igual a una hora.

**Datos de caudal:** en dos de las tres laderas monitoreadas se emplea un tanque que almacena el agua que es recolectada por el canal de escorrentía superficial (ladera de pajonal y de pinos). En el fondo de este recipiente se instala un transductor de presión o sensor de nivel para estimación del caudal. La formulación matemática se puede consultar en (Iñiguez et al, 2008). La información de caudal es agregada a intervalos de tiempo igual a 10 minutos. Para el caso de la escorrentía subsuperficial, un pluviógrafo es utilizado para medir este flujo y la información es agregada a intervalos de tiempo igual a una hora. Se considera que un 75% de la ladera esta contribuyendo a la escorrentía subsuperficial. Sin embargo, este coeficiente sigue siendo tema de investigación. En la ladera de Bosque de *Polylepis* se monitorea los diferentes flujos de agua a la salida del Bosque por medio de vertederos de cresta delgada (Iñiguez et al, 2008).

**Análisis de la información hidropedológica:** el primer paso en el análisis de la información proveniente de las sondas para monitoreo del contenido volumétrico de agua fue determinar las curvas de calibración tanto para Andosoles como para los Histosoles. Un análisis de regresión lineal simple es empleado para obtener las mencionadas ecuaciones. Una vez que los equipos fueron calibrados, se procedió con la instalación de los mismos en las diferentes laderas. Posteriormente, iniciado el monitoreo de los equipos los datos provenientes de los TDR son transformados a contenido volumétrico de agua a través de las curvas de calibración. Esta información es confrontada con los datos de precipitación a lo largo del periodo de monitoreo.

**Análisis lluvia escorrentía:** toda la información, tanto de precipitación, caudal y variación del contenido volumétrico de agua en el suelo es confrontada de manera gráfica. El objetivo es identificar los principales procesos hidrológicos presentes en este ecosistema de páramo a escala de ladera.

## RESULTADOS

### Selección de los sitios de monitoreo

En los páramos de Quimsacocha se seleccionaron tres sitios de monitoreo con diferente tipo de cobertura. Una ladera con cobertura representativa de estos páramos, es decir, pajonal fue seleccionada como sitio principal de monitoreo para comparar con las otras dos tipos de cobertura. El segundo sitio de monitoreo es una ladera de paramo de pajonales que ha sido aforestada con Pinos *Patula*. Finalmente, un relicto de Bosque de *Polylepis* es seleccionado como el tercer tipo de cobertura. Una vez seleccionados los sitios de monitoreo se procedió con la implementación de las laderas y paralelamente se realizaron los levantamientos topográficos a detalle. Los planos topográficos de cada ladera se puede consultar en (Iñiguez et al., 2008). En base de los planos topográficos se determinó el área de aporte para la producción de escorrentía superficial. La superficie de la ladera con pajonales es igual a 621.14 m<sup>2</sup>, para la ladera con Pinos *Patula* el área es igual a 445.63 m<sup>2</sup>, mientras que la superficie del Bosque de *Polylepis* es igual a 8185 m<sup>2</sup>.

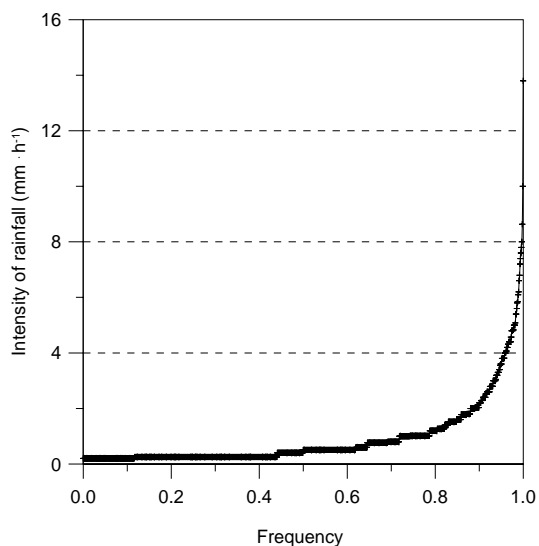
### Curvas de calibración de los TDR para Andosoles e Histosoles

Las curvas de calibración empleadas para transformar la señal de las sondas de TDR se puede consultar en (Borja et al, 2008).

**MONITOREO DE PROCESOS HIDROLOGICOS**

**Datos generales**

A continuación se detalla los resultados obtenidos del monitoreo hidrometeorológico en los páramos de Quimsacocha. El periodo de monitoreo del clima inicio el 23 de Junio de 2007 y terminó el 14 de marzo de 2008. La precipitación registrada durante este periodo fue igual a 876.1 mm.



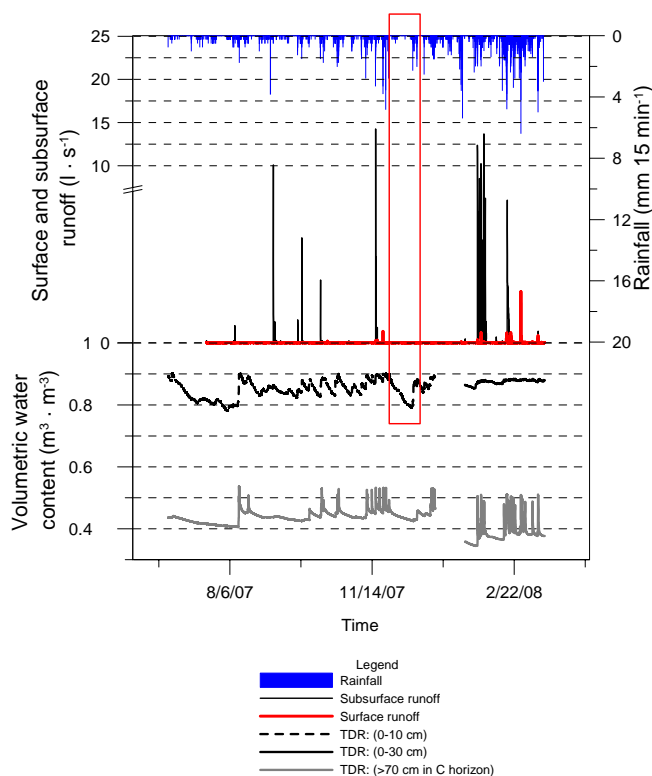
**Figura 2.** Análisis de frecuencia para intensidad de la lluvia.

Se determina que un 96% de los eventos registrados durante el periodo de monitoreo tienen una intensidad de la lluvia menor que 4 mm · h<sup>-1</sup>. La ETo promedio fue estimada en 1.76 mm/día, con una máxima de 3.80 mm/día y una mínima de 0.27 mm/día.

**PROCESOS HIDROLOGICOS**

**Ladera con pajonal**

Un análisis de lluvia escorrentía, superficial y subsuperficial, es realizado para cada uno de los diferentes tipos de cobertura o uso del suelo. Adicionalmente, se presenta los datos de hidrofísica de suelos obtenidos a partir de las sondas para el monitoreo del contenido volumétrico de agua en el suelo. En la Figura 3, se presenta el análisis realizado para la ladera con pajonales.



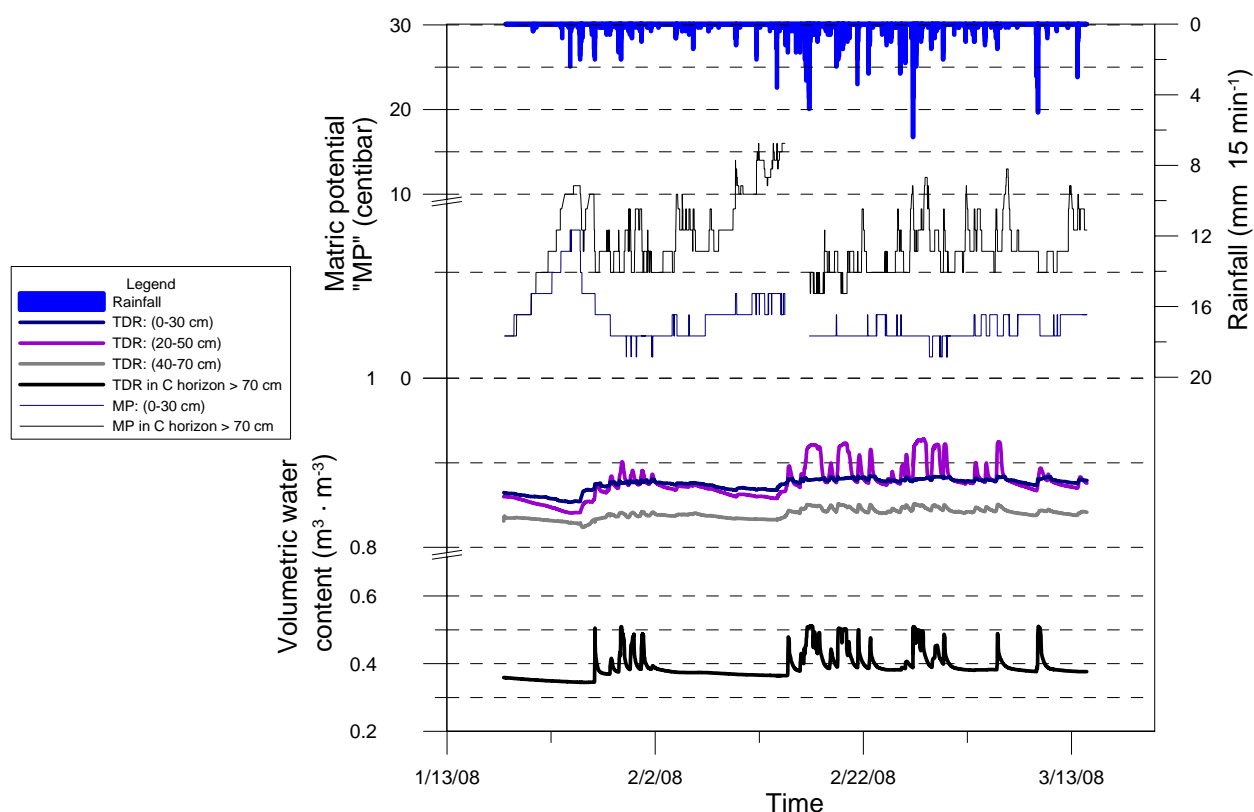
**Figura 3.** Análisis de lluvia-escorrentía e hidrofísica de suelos para la ladera con pajonales.

La Figura 3, revela que el flujo predominante de una ladera de pajonal es debido a escorrentía subsuperficial. Esto es corroborado por la señal registrada por los TDR instalados en la ladera. Los picos de escorrentía subsuperficial muestran desfases claros con respecto al tiempo en el cual la precipitación es registrada. Los eventos por escorrentía subsuperficial se encuentran posteriores al evento de lluvia, lo cual significa que la precipitación se infiltra y el suelo recupera su capacidad de almacenamiento, y cualquier entrada adicional de agua se convierte en escorrentía subsuperficial. El proceso de escorrentía es por exceso de saturación y no por exceso de infiltración o flujo hortoniano.

Analizando el evento de precipitación registrado el 26 de febrero de 2008 entre las 18 p.m. y 19 p.m., las intensidades de lluvia cada 15 minutos fueron respectivamente, 3.2, 9.6, 25.6 y 16.8  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ . Estas intensidades fueron las más altas registradas durante el periodo de monitoreo. Este evento de lluvia es el único que generó escorrentía superficial o flujo hortoniano relativamente significativa, ver Figura 3. De este hecho, es posible concluir que la capacidad máxima de infiltración de estos suelos estaría entre 16.8 y 25.6  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ .

En la Figura 3, se observa adicionalmente los datos del TDR insertado en la capa mineral u horizonte “C”. Los datos del TDR revelan una contribución activa de esta zona del perfil del suelo. Sin embargo, se desconoce si el cambio en el contenido volumétrico del agua es debido a la presencia de la interfase entre el suelo orgánico y la capa mineral, es decir, por la presencia de un flujo preferencial que corre paralelo a la ladera, o efectivamente los primeros 20 o 30 cm del horizonte mineral contribuyen significativamente al ciclo hidrológico.

En este contexto, en la Figura 4 se presenta los datos de las sondas de tensión y de humedad del suelo que fueron instaladas en cuatro puntos y a diferentes niveles del perfil del suelo. La tensión del suelo es conocida también como potencial matricial. En la ladera de pajonal el perfil del suelo tiene una profundidad que oscila entre 60 y 70 cm.

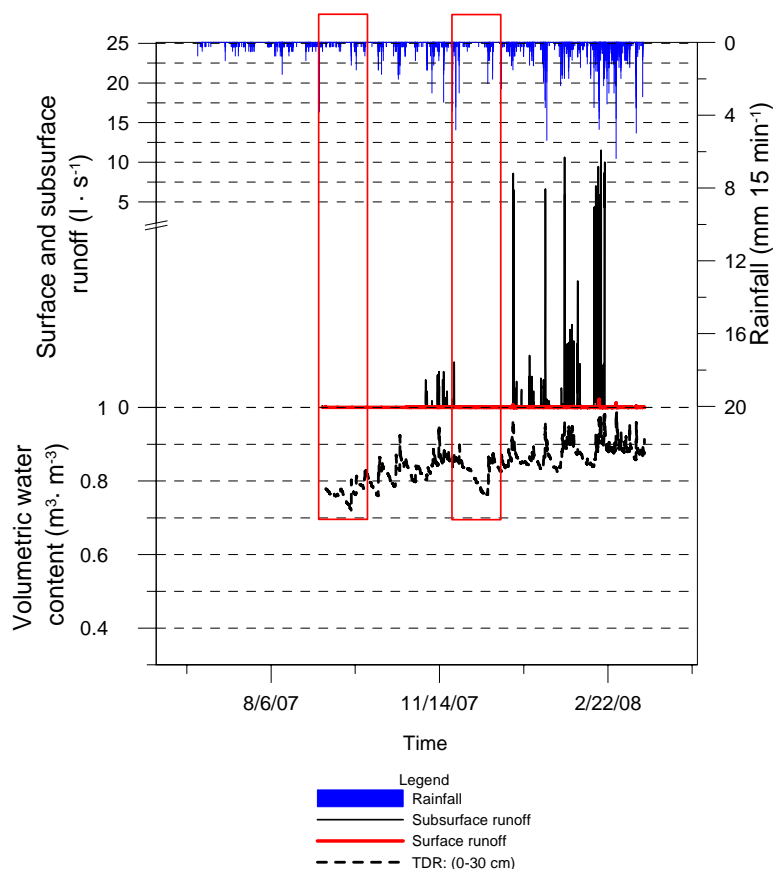


**Figura 4.** Datos hidrofísicos para la ladera de pajonal.

En la Figura 4, se observa que la tensión en el suelo a una profundidad mayor a 70 cm, que es el horizonte “C”, se incrementa considerablemente (alrededor de 15 centibar) durante los primeros meses de monitoreo, debido principalmente a que la precipitación es relativamente baja. Esto, se comprueba al analizar la señal del TDR instalado a la misma profundidad (línea gruesa de color negro, ver Figura 4). En lo relacionado al contenido volumétrico de agua en el suelo, se observa que el TDR instalado entre 20 y 50 cm de profundidad es el que presenta mayor variación, mientras que los otros sensores no presentan una variación significativa. Aparentemente, este horizonte de suelo de 20 a 50 cm es el más activo.

### Ladera de pinos

En la Figura 5, se presenta los datos de precipitación y escorrentía (superficial y subsuperficial) para la ladera que ha sido aforestada con pinos. Adicionalmente, se incluye la variación temporal del contenido volumétrico de agua en el suelo.

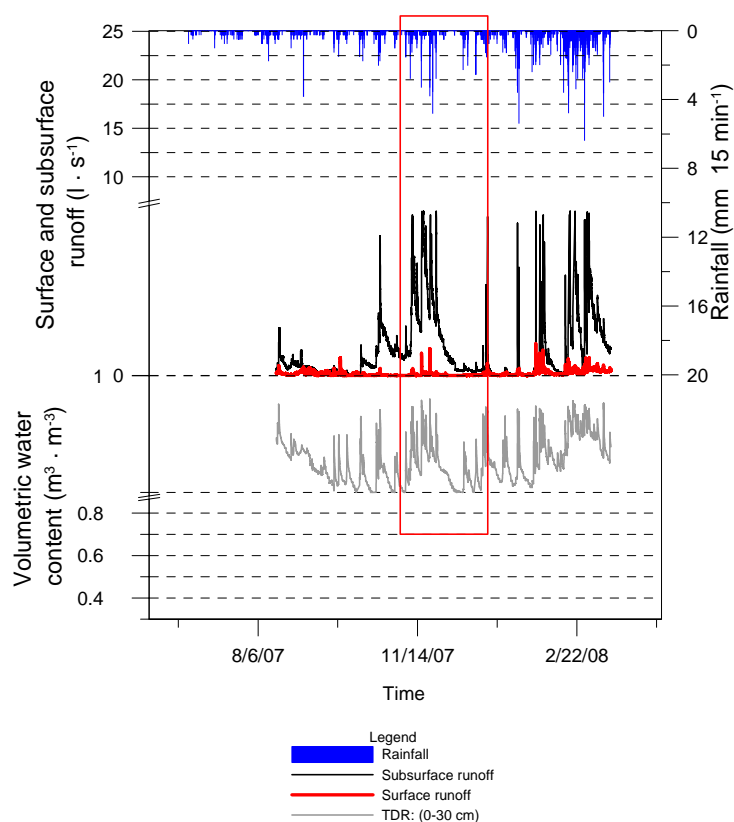


**Figura 5. Datos hidrofísicos para la ladera con pinos**

En la Figura 5, se observa un comportamiento similar que para el caso de la ladera con pajonal. El flujo predominante es el subsuperficial. Por otro lado, los picos en señales del TDR coinciden con los eventos donde se registra el flujo subsuperficial. Estos datos revelan que el proceso de escorrentía en una ladera con pajonales que ha sido aforestada con pinos es el mismo que en una ladera con pajonales en condiciones naturales, es decir por exceso de saturación. Sin embargo, la diferencia principal es debida al consumo de agua por parte de los pinos, en la Figura 5 se remarca el periodo durante el cual no se registró precipitación. Como se puede observar el contenido volumétrico de agua en el suelo alcanza un valor muy cercano a  $0.7 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ , valor muy por debajo del punto de saturación (aproximadamente  $0.9 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) o de las condiciones esperadas para este tipo de suelo. Es decir, una reducción de hasta un 20% en el contenido volumétrico de agua puede ser esperado, lo cual afectaría directamente el caudal base de una cuenca de páramo.

### Ladera de *Polylepis*

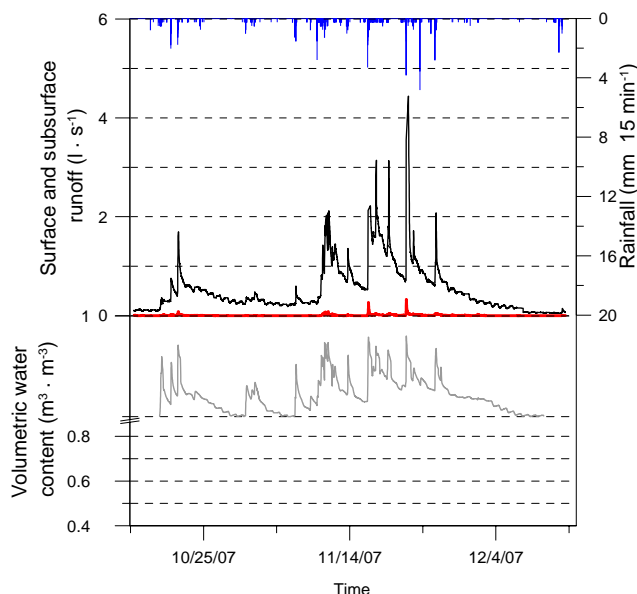
En la Figura 6, se presenta los datos del monitoreo del Bosque de *Polylepis*. La precipitación es considerada la misma para las tres laderas, debido a su cercanía (ver Figura 1).



**Figura 6. Datos hidrofísicos para la ladera con *Polylepis***

La Figura 6, revela que el flujo predominante es el subsuperficial, similar que para el caso de las otras dos laderas. Esta conclusión es sustentada fuertemente por los datos del TDR, en la Figura 7 se presenta un periodo corto de tiempo que permite observar de manera ampliada la información levantada.





**Figura 7. Datos hidrofísicos para la ladera con *Polylepis* (ampliado)**

La Figura 7, muestra como la señal del TDR es prácticamente amplificada por los datos obtenidos del vertedero de cresta delgada instalado a la salida del Bosque de *Polylepis*. Este hecho sustenta la conclusión de que el principal tipo de escorrentía presente en este Bosque es por escorrentía subsuperficial. Es decir, el agua de lluvia que alcanza el suelo dentro del Bosque infiltra y se escurre paralelamente al material parental hasta que alcanza el cauce principal. Es importante resaltar que las variaciones del contenido volumétrico de agua en el suelo son mínimas (ver Figura 7), pero estas fluctuaciones mínimas son las que mantienen un caudal base a la salida del Bosque.

## CONCLUSIONES

La intensidad de la lluvia en los páramos de Quimsacocha es menor o igual a  $4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  en el 96 % de los eventos registrados durante el periodo de monitoreo. Esto tiene algunas implicaciones, por un lado los suelos del páramo al tener excelentes características de infiltración son receptores muy buenos para estos valores de intensidad relativamente pequeños, lo que se traduce a escala de cuenca hidrográfica en un caudal base sostenido. Sin embargo, es necesario identificar en posteriores investigaciones a que valor de intensidad de la lluvia la vegetación natural de los páramos intercepta en su totalidad esta precipitación para posteriormente evapotranspirarla.

Los datos de escorrentía y precipitación en la ladera con pajonales revelan que la capacidad máxima de infiltración de los suelos de páramo estarían en un rango que varía entre  $16.8$  y  $25.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ .

En base de los datos hidropedológicos es claro que los procesos hidrológicos a escala de ladera en una zona de páramo intervenida con Pinos son los mismos que se encontrarían en una ladera con pajonales únicamente. Esta conclusión se sustenta en los datos de las sondas de TDR y de la medición directa de los flujos. Los datos sugieren que la escorrentía subsuperficial es el principal tipo de flujo. En este contexto, si se plantea un balance hídrico los diferentes elementos cambian en valor de un tipo de cobertura a otro, pero los procesos en lo relacionado con la escorrentía son los mismos. Sin embargo, al profundizar en otros elementos del balance hídrico como es el almacenamiento de agua en el suelo, éste disminuye considerablemente bajo Pinos, hasta un 20 %. Lo cual es perjudicial para el caudal base a nivel de cuenca hidrográfica.

Los datos de las sondas de TDR revelan la presencia de un posible flujo preferencial entre la capa orgánica y el horizonte mineral, ó la presencia activa de los primeros 15 ó 25 cm del horizonte mineral en el ciclo hidrológico de una ladera en páramo.

En el Bosque de *Polylepis* la importancia de la hidropedología toma una fuerza inusitada. La señal de las sondas de TDR es prácticamente un reflejo de los datos de caudal subsuperficial a la salida del Bosque. Los datos revelan que en un rango de humedad muy pequeño entre 0.9 y 0.97 m<sup>3</sup> · m<sup>-3</sup> (prácticamente en saturación solamente), los suelos del Bosque regulan la producción hídrica de este ecosistema. En otras palabras, con una pequeña red de equipos para monitoreo de la humedad del suelo es muy probable estimar la producción de agua en un Bosque de *Polylepis*. De esta forma cualquier intervención o afectación del Bosque puede ser cuantificado a través de la implementación de estos equipos.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su gratitud a Internacional Foundation for Science (IFS) con sede en Suecia y a la compañía minera IAMGOLD ECUADOR S.A. por auspiciar el proyecto de investigación. La asistencia de Juan Sigüenza, José Tenedora y Armando Pugo durante las campañas de trabajo de campo ayudó significativamente al equipo de investigación. Finalmente los autores desean agradecer al Dr. Bert De Bièvre y al Dr. Wouter Buytaert por el apoyo brindado durante la etapa de formulación y aprobación del proyecto.

### BIBLIOGRAFIA

- Borja, P., V. Iñiguez, P. Crespo, P. Cisneros, F. Cisneros, y J. Feyen. 2008. Hydraulic characterization of Andean Andosols and histosols. EGU General Assembly. 13 - 18 April 2008. Vienna, Austria.
- Campbell Scientific, INC. 2006. CS616 and CS625 Water Content Reflectometers. Utah. EEUU
- Davis Instruments Corp. 2006. Soil Moisture & Multi-Purpose Temperatura Probe Installation Instructions. California. EEUU.
- Eijkelpamp. 2005. Catalogue Soil Water Crop Agro-Climate Phisical Survey Sludge&Slurry. Holanda
- FAO/ISRIC/ISSS. 1998. World Reference Base for Soil Resources No. 84 in World Soil Resources Reports. FAO, Rome.
- Hofstede, R., P. Segarra, and P.V. Mena. 2003. Los Páramos del Mundo. Global Peatland Initiative/NC-IUCN/Ecociencia, Quito.
- Iñiguez, V., P. Borja, y F. Cisneros. 2008. Informe final del Proyecto “Efectos de los cambios de uso del suelo en la hidrología a escala de ladera en zonas de páramo”. PROMAS-Universidad de Cuenca. Cuenca – Ecuador
- ISSS Working Group RB. 1998. World Reference Base for Soil Resources: Introduction. (Deckers, J.A., Nachtergaele, F.O. y Spaargaren, O.C.) First Edition. International Society of Soil Science (ISSS), International Soil Reference and Information Centre (ISRIC) and Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Acco. Leuven, 157 pp.
- Medina, G. y P. Mena. 2001. Los Páramos en el Ecuador. En: Mena, P., Medina, G. y Hofstede, R. (Eds.). Los páramos del Ecuador. Particularidades, Problemas y Perspectivas. Abya Yala. Proyecto Páramo. Quito, pp. 1–24.