

Determinación de anomalías causadas a las propiedades físicas, químicas e hidrofísicas, en los suelos de páramo en el sur del Ecuador, ocasionadas por alteraciones antrópicas.

Marco Ramírez Matamoros, Msc

Magíster de Ciencias en Manejo y Conservación del Agua y del Suelo. Participa en varios Seminarios y Talleres. Capacitador del Programa de Manejo del Agua y del Suelo PROMAS. Autor de varios artículos.

PROMAS – UNIVERSIDAD DE CUENCA
marco.ramirez@ucuenca.edu.ec

Pedro Cisneros Espinoza, Msc

Magíster de Ciencias en Manejo y Conservación del Agua y del Suelo. Profesor Universitario. Capacitador del Programa de Manejo del Agua y del Suelo PROMAS. Autor de varios artículos y Ponencias.

PROMAS – UNIVERSIDAD DE CUENCA
pedro.cisneros@ucuenca.edu.ec

Fecha de recepción: 04 de agosto de 2015/Fecha de aprobación: 22 de Octubre

Resumen

Existe un incremento de 48% en la densidad aparente, en Andosoles sometidos a intensa actividad agropecuaria (Buerán), e invernadero (Quimsacocha). En la ganadería intensiva con pastos mejorados (27%) y suelo arado con tractor (Cancán) 8% en un año. La K_s es mayor en sitios alterados (10-83%). La humedad de saturación (pF_0), supera el 80%, en Andosoles inalterados, excepto Cancán (67%), que se explicaría por alta DA (0.86 g cm⁻³), el arado en Cancán presenta los valores más bajos 65%, en los restantes alterados es < 80%. La actividad agropecuaria en Buerán causa una reducción de: 13% del contenido volumétrico a pF_0 , 22% a $pF 2.7$ y 37% a $pF 4.2$. Excepto los alterados: Cancán y Cajas aumenta 19% a $pF 4.2$. La reducción del contenido total del agua, entre los sitios testigos vs alterados, muestran diferencias significativas ($p=0.0004$) con 29%.



El ACP de los parámetros hidrofísicos. El primer componente está conformado por densidad aparente, correlacionado negativamente con la materia orgánica y pF-2.7. Este componente explica 77% de la varianza. La MO presenta alta correlación con la DA ($r = -0.71$), $P = 0.003$. La MO se redujo 31% en un año, después de arar con tractor en Cancán. La SB se incrementa 50% en sitios que se aplican fertilización o enmiendas. El Ca es mayor (50-87%).

ACP para las variables químicas, el componente 1 explica 52% de la varianza y está conformado por: SB, Ca, correlacionadas negativamente con: C, N y CIC. El segundo componente explica 23%, corresponde al pH, correlacionado negativamente con Al+H.

Palabras clave: *Densidad aparente (DA), humedad (θ) materia orgánica, análisis de componentes principales, saturación de bases.*

Abstract

There is 48% increase of DA in Andosols, that are subjected to intense agricultural activity (Buerán) and greenhouse (Quimsacocha). In intensive farming with improved pastures (27%). And in soils plowed by tractor (Cancan) there exist an increase of 8% in one year. The Ks is greater in disturbed sites (10-83%). Moisture saturation (pF0) exceeds 80% in unchanged Andosols, with exception of Cancan (67%), what could be explained by high DA (0.86 g cm⁻³), plowed fields in Cancan show the lowest values of 65%, in the other altered sites it's <80%. Agricultural activity in Buerán causes a reduction of: 13% volumetric content at pF0, 22% at pF 2.7 and 37% at pF 4.2. With exception of altered soils: Cancan and Cajas increase 19% at pF 4.2. The reduction of the total water content, among the witnesses vs disturbed sites, show significant differences ($p = 0.0004$) with 29%. The parameters hydro physical ACP, the first component consists of DA, negatively correlated with MO and pF-2.7, this component explains 77% of the variance. The MO has a high correlation with DA ($R = -0.71$), $P = 0.003$. The MO reduced 31% in one year, after plowing with tractor in Cancan. SB increases 50% at sites where they apply fertilizers or amendments. The content of Ca is higher (50-87%). ACP for chemical variables, the component 1 explains 52% of variance and consists of: SB, Ca, negatively correlated with C, N and CIC. The second component explains 23%, corresponds to the pH, negatively correlated with Al+H.

Keywords: *Apparent Density, Humidity, Organic Material, Principal component analysis, Base Saturation.*

1 Introducción

Ecuador posee 12500 km² de páramo, lo que equivale a casi 5% del territorio nacional y 8000 km² de superficie transformada o degradada encima de los 3000 ms.n.m. Tres cuartos de los páramos naturales están dominados por pajonales, que prácticamente todos sufren algún grado de intervención humana (Hofstede, Coppus, Mena, Wolf, & Sevink, 2002). Los páramos son ecosistemas tropicales de alta montaña que prestan servicios ecosistémicos directa e indirectamente a millones de personas.

Uno de estos servicios es la captación y regulación de agua, destinada al consumo doméstico y riego así como para la generación de energía hidroeléctrica (Guerrero, 2009). El páramo es un gran reservorio de carbono, también de suma importancia ecológica por su biodiversidad. En 1997 (Medina, Recharte, Suárez, & Bernal, 1997), estimaron que son 500.000 personas las que viven en los páramos y lo usan de manera directa. Sin embargo la mayoría de la población ecuatoriana depende indirectamente de este ecosistema.

Las principales características de los suelos del páramo son: alta capacidad de retención de agua, elevado contenido de carbono, baja densidad aparente, susceptibilidad al secamiento irreversible, valores bajos de pH, entre otros, hacen que el trabajo con estos suelos requiera de un especial cuidado. Las acciones erosivas, cuando son severas pueden deteriorar o hacer desaparecer al suelo en cortos períodos de tiempo, con lo que se ocasionará graves daños a la flora y entorno ecológico.

Esta investigación hace un estudio de las principales características: físicas, químicas e hidrofísicas, que podrían afectarse por las actividades antrópicas: agricultura, ganadería, turismo, forestación, minería, comparadas con el suelo inalterado (testigo), para visualizar en qué medida alteran la estabilidad del ecosistema páramo, con ello contribuir a la comprensión de la naturaleza y en qué medida estos son negativos para su conservación.

2 Materiales y métodos

Se seleccionaron cuatro zonas, en estos lugares se realiza muestreos del horizonte superficial A, en suelos Andosoles, tanto en sitios alterados como inalterados en similares circunstancias. La presente investigación caracteriza cada una de estas actividades y determina la magnitud de afección que podrían estar causando, por otro lado se determinan las principales características en los suelos tanto en el ámbito (hidro)físico y químico. Posteriormente se realiza el análisis estadístico de las características medidas y se comparan los resultados, para obtener las alteraciones producidas, se lo realiza en sitios como: caminos, zonas agrícolas, ganaderas, turísticas, bosque de pino, invernadero, considerando: el tiempo, posición fisiográfica, tipo de suelo, entre otras.

2.1 Área de Estudio

El área de estudio se localiza en cuatro zonas: Quimsacocha, Parque Nacional Cajas (virgen), Cancán y Buerán (ver Figura 1). Las tres primeras zonas están ubicadas en la provincia de Azuay y Buerán en la provincia de Cañar. En Quimsacocha los sitios están ubicados en las cuencas: Bermejos, Quinuahuayco, Calluancay y Zhuruca, en la parte alta de la cuenca de los ríos Paute y Jubones.

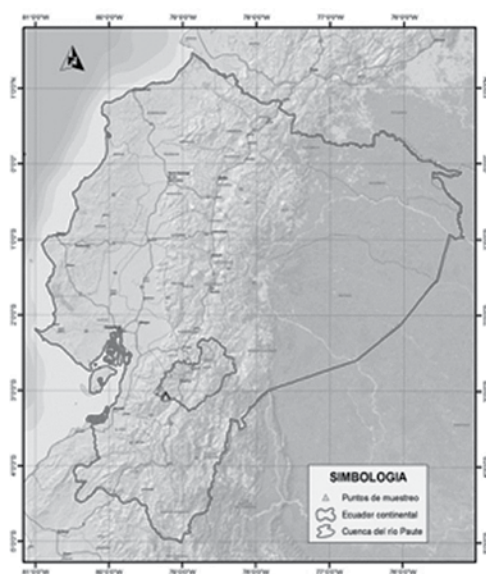
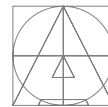
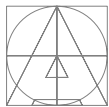


Figura 1: Mapa de ubicación de las zonas de muestreo de suelos.





2.2 Grupo de datos

El grupo de datos consta de 40 sitios ubicados en las zonas antes mencionadas, se evaluaron los sitios alterados comparados con sus respectivos testigos. Además se compara con la línea base, levantada durante tres años por el PROMAS en Quimsacocha, promediando 25 sitios testigo.

Para comparar se divide en tres grupos, con sus respectivos códigos:

1. Alterados vs testigos para el total de datos.
2. Alterados vs testigos por zonas de estudio (ver Tabla 1)
3. Alterados vs testigos por uso del suelo (ver Tabla 2)

	Alterado	Testigo
Zona	Código	Código
Buerán	1albu	2tbu
Cancán	3alcn	4tcn
Quimsacocha	5alq	6tq
Cajas	7alcj	8tlbq

En la Tabla 2 se muestran los sitios alterados vs testigos por uso del suelo, la agricultura y pastos se dividió en dos grupos por las diferencias encontradas en manejo, características del suelo y tiempo.

	Alterado	Testigo
Uso	Código	Código
Agricultura (Buerán)	1ab	1tab
Agricultura (Quimsacocha)	2aq	2taq
Invernadero	3i	3ti
Bosque de pino	4bo	4tbo
Camino	5c	5tc
Arado	6ar	6tar
Corral de llamas	7cl	7tcl
Pastoreo de llamas	8pl	7tcl
Pastos	9p	9tp
Ray grass (Lolium spp.)	91pry	91try
Turismo	98tu	tlb

2.2.1 Sitios con alteraciones antrópicas

En los lugares intervenidos por las actividades antrópicas, se analiza un set de datos correspondiente a 15 sitios: corral de llamas (1), pastoreo de llamas (2), pastoreo de bovinos (2), agricultura_ganadería (1), agricultura (4), invernadero (1), bosque de pino (1), camino (1), turismo (1) y arado por tractor (1)

2.2.2 Sitios testigo

Los sitios testigo seleccionados en la presente investigación son 25: en la zona de Quimsacocha (20 sitios), más el promedio de 25 sitios de la línea base; Cancán (3 sitios) y Buerán (1 sitio)

2.3 Análisis y muestreo de campo

En las zonas de estudio, en el primer horizonte (A) de cada sitio se realizaron pruebas in-situ para determinar la conductividad hidráulica (K_s) por el método de pozo invertido, con tres repeticiones (Mejía, 2011). Adicionalmente, se obtienen tres muestras inalteradas de 100cm³, para los análisis de laboratorio (densidad aparente, puntos de retención en el rango de presiones bajas), en el 2005 Buytaert, Wyseure, De Bièvre, & Deckers, determinaron que el REV (volumen elemental representativo) para Andosoles es igual a 100cm³, y una muestra alterada (1 kilo aproximadamente) para determinar los puntos de retención en el rango de presiones altas y los análisis químicos.

2.3.1 Análisis de Laboratorio

A partir de muestras inalteradas tomadas en anillos de 100 cm³ se determinaron los valores de humedad (θ) correspondientes a pF en el rango de 0 - 2.7. Estos valores se midieron utilizando el método multistep-outflow (Van Dam, Stricker, & Droogers, 1992) (aparato de presión por etapas múltiples). Los contenidos de humedad (θ) para los valores de pF: -3.49 y -4.17 se determinaron en el aparato de membrana a presión utilizando muestras alteradas. Para obtener la curva pF, se realizaron dos repeticiones para los puntos de retención en el rango de presiones bajas como altas.



2.3.2 Caracterización Hidrofísica

Para la caracterización hidrofísica se realizaron mediciones de densidad aparente (DA), conductividad hidráulica saturada (k_s) y curva de pF, con el propósito de describir la curva de retención de humedad del suelo y obtener una curva continua. Por lo que se emplea el modelo de van Genuchten (MVG) para ajustar los datos medidos de θ (van Genuchten, 1980) en base a datos de flujo de salida a partir del experimento en el MULTISTEP y el aparato de membrana para presiones altas.

2.3.3 Caracterización Química

Para la caracterización química se enviaron las muestras al laboratorio certificado de AGROBIO-LAB. Los métodos para los análisis químicos empleados son: pH 1:2.5 H₂O; C.E; Na: pasta saturada; MO: Walkley-Black; Al+H: Olsen modificado, B: Fosfato monocálcico; NH₄, NO₃, SO₄: colorimetría; Ca: PEE/ABL/01; Mg: PEE/ABL/002; P: PEE/ABL/03, K: PEE/ABL/04; Zn, Cu, Fe, M: PEE/ABL/05.

2.4 Análisis estadístico

El análisis estadístico se lo realiza con el programa R 2.13.1 (R Development Core Team, 2011). Para el tipo de distribución de las diferentes variables, se emplea técnicas estadísticas como: pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk, si los datos siguen distribución normal, se realiza análisis de medias (ANOVA), caso contrario test no paramétricos como el Kruskal Wallis; gráficas de caja, histogramas, normalidad.

Con la finalidad de caracterizar el suelo y establecer relaciones entre las variables, se emplean varias técnicas multivariadas como: matriz de correlaciones; análisis de componentes principales (ACP).

El valor de “p” que indica que la asociación es estadísticamente significativa, se considera en 0.05. Una seguridad del 95% lleva implícito una $p < 0.05$.

3. Resultados y Discusión

Las comparaciones tanto de las variables hidrofísicas y químicas entre sitios alterados

vs testigos se realizan para tres sets de datos: Alterados vs testigos (total), alterados vs testigos por zona de estudio y alterados vs testigos por uso de suelo. Finalmente se hace la matriz de correlaciones y el ACP. Las principales variables hidro(físicas) son: DA, K_s , textura y curva de pF y las variables químicas: pH, MO, SB, Ca, CE, NH₄, CIC, K, P, NO₃, Al+H.

Los análisis estadísticos se realizan para los dos primeros grupos, para el tercer grupo (uso de suelo) no se realiza comparaciones estadísticas, debido a que no se cuenta con repeticiones para cada uso, por lo que se procedió a analizar con la ayuda de gráficos box-plot.

3.1 Caracterización hidrofísica

3.1.1 Comparación entre sitios alterados vs testigos

3.1.1.1 Densidad aparente (DA)

Comparando los resultados de densidad aparente entre alterados vs testigos, no presentan diferencias significativas. Pero al analizar los valores de DA alterados vs testigos agrupados por zona, si existen diferencias significativas entre las medianas ($p=0.02$), se evidencia un incremento en la DA en la mayoría de los sitios alterados, así en Buerán (agricultura_ganadería), tiene un incremento de 48% comparado con el testigo y 32% con la línea base; siguen la misma tendencia con menor diferencia las zonas de Cancán y Quimsacocha; excepto en el Cajas (turismo) se observa que los valores de DA son menores a la línea base.

El mayor incremento de DA (48%) en los suelos de Buerán, estos son arados por tractor por un lapso de 20 años, la zona se caracteriza por el cultivo de papa y pastos, se siembra papa por dos años consecutivos y luego disminuye el rendimiento, razón por la cual rotan con pasto por un tiempo de 5 años y siembran nuevamente papa. En la zona de Cancán la diferencia es menor (8%), debido a que este suelo fue arado por tractor hace un año, existe pérdida de la estructura y cambio de color del suelo, por la mineralización de la materia orgánica al quedar expuesto al sol.



Los valores de DA altos en Cancán testigo (0.86 g cm⁻³), podría explicarse por el bajo porcentaje de materia orgánica (13%) comparado con la línea base (23%), debido a que la MO está fuertemente correlacionada con la DA ($r=-0.71$) ver Tabla 3 en la página 120.

La DA se incrementa también en todos los sitios alterados comparados con sus testigos especialmente los que han sido sometidos a usos intensivos como agricultura_ganadería (Buerán) (48%), invernadero en Quimsacocha con 44%; la ganadería intensiva con pasto ray grass 27%. Las menores afecciones se observan en caminos, bosque de pino, turismo, que presentan valores similares a la línea base.

3.1.1.2 Conductividad hidráulica (k_s)

Los datos de K_s alterados vs testigos, no presentan diferencias significativas. Cuando comparamos K_s por zona de estudio, si existen diferencias significativas en las medianas con ($p=0.04$), es mayor en los sitios alterados, así en el Cajas con 83% respecto a la línea base, seguido de Buerán con 65% más que el testigo; es menor en los sitios Quimsacocha (29%) y Cancán (10%). También al comparar por usos, se observa incremento en el invernadero 68%; pastos ray grass con 28%, el único caso que es menor la K_s del alterado es en el camino.

La línea base tiene un promedio $K_s = 0.49 \text{ cm h}^{-1}$. En el 2005 Buytaert et al, demostró que existe diferencias significativas en la K_s comparando una cuenca testigo (Huagrauma) con una alterada (Soroche), siendo mayor en la alterada (31%). También manifiesta que el incremento de la conductividad del suelo, puede acelerar la respuesta hidrológica, resultando en un rápido decrecimiento del flujo base, este proceso puede ser acelerado por el drenaje artificial que se realiza en cuencas cultivadas.

3.1.1.3 Textura

Los resultados de textura del laboratorio presentan alto contenido de arena con un promedio de 66%, que podría deberse a la fuerte unión entre la parte mineral y orgánica (complejos órgano-metálicos) (Van Ranst, 1997). Este tipo de complejos y el contenido de $\text{Al}_{\text{ox}} + \frac{1}{2} \text{Fe}_{\text{ox}}$

que representa el grado de evolución del vidrio volcánico hacia minerales de ordenamiento de rango corto. (Norambuena, Luzio, & vera, 2002) manifiestan que sería el responsable de la dispersión incompleta producida por el método de Bouyoucus, esto estaría provocando anomalías en los resultados de la textura. El contenido de $\text{Al}_{\text{ox}} + \frac{1}{2} \text{Fe}_{\text{ox}}$ ejercería un efecto floculante en el sistema coloidal, por lo que el método solo produciría una dispersión incompleta del suelo, en consecuencia la parte de la fracción arena estaría formada por pseudo agregados de arena y/o limo; Por lo tanto, la textura en campo (método del tacto), sería más adecuada que la reportada por el laboratorio para los Andosoles.

Los puntos en las curvas de retención de humedad, es decir humedad de saturación, capacidad de campo y punto de marchitez, las diferencias son muy evidentes. Así el punto de saturación **pF-0**, los datos alterados vs testigos, presentan diferencias significativas en las medianas ($P = 0.01$). La humedad de saturación es 83%, contenido volumétrico de agua, para los Andosoles inalterados; mientras que para los alterados (77%), es decir existe un 6% menos. Este alto porcentaje se debe a la baja DA y la estructura abierta y porosa, los suelos del páramo tienen una capacidad de retención de agua muy alta (80-90%) en saturación (Buytaert W. , 2004) (Iñiguez, 2003).

La capacidad de retención es atribuida a la presencia de amorfos minerales de arcilla como alófana e imogolita, pero recientes estudios en los suelos del páramo indican que el orden de los minerales rango-corto están casi ausentes en los Andosoles Ecuatorianos del Sur; como el aluminio y hierro relacionados por cenizas volcánicas, están ligadas a la materia orgánica. La acumulación de carbón orgánico, debido al clima frío y húmedo y los complejos organometálicos, da lugar a un comportamiento similar (Poulenar et al, 2001; Buytaert, 2004).

En las zonas de estudio los datos de pF-0, también presentan diferencias significativas en las medianas ($P= 0.008$). En Buerán es más alto el testigo con 83% vs 72%, del contenido volumétrico de agua, existe una diferencia de 11%, y sigue la misma tendencia en las otras zonas, los testigos superan el 80%, excepto Cancán 69%, este último también



presenta el valor más bajo 65% para el alterado, esto podría explicarse por la alta DA. Los alterados del Cajas y Quimsacocha también presentan valores <80% (75% y 78%) respectivamente.

También existen diferencias en el punto de saturación (**pF-0**) entre los alterados vs testigos por uso de suelo, los valores para los testigos superan el 80% del contenido volumétrico de agua, excepto el testigo de Cancán 67%. Los alterados presentan valores inferiores al 80%, excepto el bosque de pino (88%). El valor más bajo está en el arado de Cancán (65%), seguido de: caminos, agricultura_ganadería en Buerán, turismo, pasto mejorado, corral de llamas, invernadero, pastos y agricultura en Quimsacocha, con los porcentajes (71, 72, 75, 76, 77, 77, 79 y 80 %).

Los datos para **pF-2.70**, comparando los sitios alterados vs testigos, existen diferencias significativas entre las medias, con el análisis de varianza (Anova), $Pr (>F) = 0.0169 *$. Los sitios testigo todavía mantienen un contenido alto de agua, con un promedio de 77% y los alterados 72%, existe una disminución en 5%.

En las zonas de estudio también existe diferencias significativas entre las medias (Anova), $Pr (>F) = 0.04027 *$. Los sitios testigo presentan valores de 79 %, excepto Cancán 62%; la mayor diferencia entre los alterados vs testigos, se observa en la zona de Buerán donde se practica agricultura_ganadería por más de 20 años con una reducción en 22% del contenido de humedad; y menores porcentajes en las otras zonas.

También se observa diferencias en los diferentes usos de suelo, los sitios testigo tienen en promedio aproximadamente 79% de volumen de agua, en el siguiente orden están los alterados: caminos, corral de llamas, pastos ray grass, turismo, invernadero, pastoreo, pastoreo de llamas, agricultura en Quimsacocha con los siguientes porcentajes (67, 68, 70, 70, 72, 76, 77 y 77).

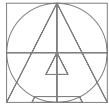
Para pF-4.2 después del análisis de varianza (Anova), se puede concluir que no existe estadísticamente una diferencia significativa entre las medias.

Comparando los sitios alterados y testigos por zona para pF-4.2, con el análisis de varianza

(Anova), se puede concluir que existe diferencias significativas entre las medias, $Pr (>F) = 0.01349 *$ el menor contenido volumétrico de humedad para punto de marchitez, corresponde al alterado de Buerán (agricultura_ganadería) con una reducción en 37%.

Mientras que los alterados de Cancán, Cajas y Quimsacocha presentan valores de humedad más altos que los testigos (19% y 9%). Este incremento puede estar influenciado por factores como la compactación que han sufrido los andosoles en el horizonte A, por las diferentes actividades antrópicas, esta compactación pudo haber provocado que la estructura se dañe haciendo que los macroporos disminuyan de tamaño convirtiéndolos en microporos, con las consecuentes alteraciones en el contenido de humedad, ya que al existir menos macroporos este horizonte tiene una menor capacidad de retención de humedad en punto de saturación hasta capacidad de campo, mientras que los microporos al aumentar en número aumentan la capacidad de retención de humedad en punto de marchitez permanente. También se observa incremento en los alterados vs testigos para punto de marchitez por usos: corral de llamas, turismo, pastoreo, pastoreo ray grass, agricultura en Quimsacocha con (36%, 19%, 16%, 15%, 11%), los restantes tienen menor diferencia.

Se puede concluir que la reducción del contenido total de agua disponible para las plantas $TAW = \text{capacidad de campo} - \text{punto de marchitez}$, comparando los sitios testigos vs alterados, muestran diferencias altamente significativas $p=0.0004$ con 29%, o $0.10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ($TAW = 0.35$ vs 0.25). La diferencia es debido a que los sitios testigo presentan mayor contenido de humedad a pF 2.7, excepto a pF 4.2, que contiene mayor contenido de humedad los sitios alterados, por el incremento de los microporos. Similares resultados fueron encontrados por (Buytaert et al., 2005), para Andosoles la zona de queseras, comparando sitios cultivados con testigos, obteniendo una diferencia de 32% o $0.10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ($TAW = 0.31$ vs 0.21), pero las mismas se deben a la baja capacidad de retención a pF 4.2 de los sitios cultivados. Los mismos autores compararon dos cuencas: Huagrauma (natural) y Sorche (cultivada), no encontraron diferencias estadísticamente significativas para TAW. En el 2002



Buytaert et al., manifiestan que un 20% disminuye la retención de agua debido a la agricultura y 16% en dos años de cultivo, lo que puede tener un impacto en el manejo del agua en la región.

3.2 Análisis de Componentes Principales (ACP) para los parámetros hidrofísicos

Debido a las importantes correlaciones entre varios parámetros hidrofísicos (Tabla 3) y para simplificar la interpretación, se realiza el análisis de componentes principales (ACP).

En total 7 de las 14 propiedades hidrofísicas se consideran. En la Figura 2 se puede observar los resultados del (ACP) y las relaciones existentes entre las variables. El primer componente está conformado por limo, densidad aparente y arcilla, correlacionado negativamente con materia orgánica y pF-2.7, este explica el 77% de la varianza. La MO es la variable más importante para la capacidad de retención de agua, principalmente en los rangos bajos de succión del suelo. La MO presenta una correlación muy alta con la DA ($r = -0.71$), $P = 0.003$; En el 2006 Buytaert, et al., también encontraron correlaciones muy altas entre estas dos variables ($r = -0.55$), $P < 0.001$.

La MO muestra una correlación positiva con el contenido de arena, según los resultados del laboratorio son elevados y no concuerdan con la textura determinada en campo, lo que confirmaría que la metodología utilizada para determinar la textura no es adecuada, esto ratifica los resultados obtenidos en anteriores investigaciones en Promas. En el 2002

Buytaert W., Deckers, Dercon, De Bièvre, Poesen, & Govers, manifiestan que se debería a la presencia de pseudo estructuras en forma de agregados, estas partículas de pseudo arenas sobrepasan la fracción de arcilla, esto podría explicar la correlación negativa entre la retención de agua y la arcilla. Entre la MO y K_s , no se presentan correlaciones significativas, los autores antes mencionados tampoco encontraron y manifiestan que puede ser atribuido a la larga variabilidad de la conductividad hidráulica.

El segundo componente explica un 14% de la varianza, corresponde a pF-4.17. Sumados los dos componentes explican el 91% del total de la varianza.

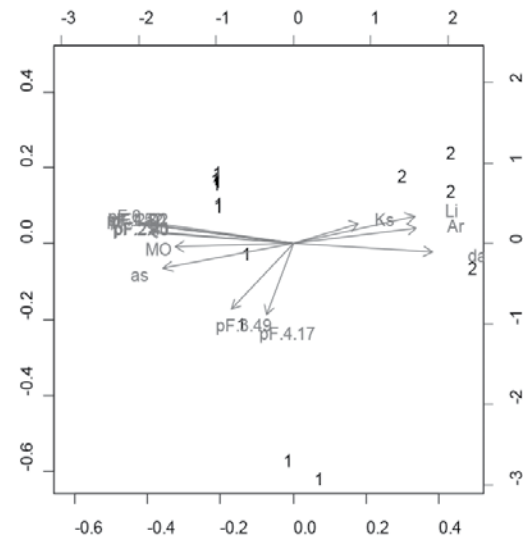


Figura 2: ACP para las características hidrofísicas

Tabla 3. Matriz de correlaciones Spearman (R) de las propiedades hidrofísicas más importantes (n = 40)

	Ar	as	DA	K_s	li	MO	pF-0	pF-1.52	pF-1.80	pF-2.02	pF-2.41	pF-2.70	pF-3.49
as	-												
DA	0.96												
K_s	0.64	-0.63											
li	0.17	-0.22	0.14										
MO	0.73	-0.88	0.48	0.30									
pF-0	-0.76	0.75	-	-	-								
pF-1.52	0.61	0.63	0.71	0.08	0.55	0.61							
pF-1.80	0.59	0.56	0.81	0.32	0.57	0.51	0.9						
pF-2.02	0.53	0.52	0.83	0.32	0.54	0.59	0.97	0.99					
pF-2.41	0.48	0.50	0.82	0.35	0.52	0.66	0.94	0.98	1.00				
pF-2.70	0.45	0.50	0.83	0.34	0.50	0.64	0.94	0.97	0.98	0.98			
pF-3.49	0.44	0.50	0.77	0.38	0.53	0.72	0.91	0.97	0.98	0.98			
pF-4.17	0.45	0.52	0.78	0.37	0.55	0.73	0.90	0.96	0.98	0.98	0.99		
	0.23	0.35	0.31	0.28	0.36	0.27	0.24	0.31	0.33	0.33	0.41	0.42	
	0.16	0.16	0.18	0.24	0.21	0.22	0.03	0.10	0.14	0.15	0.20	0.19	0.84



3.3 Caracterización química

3.3.1 Comparación entre sitios alterados e inalterados

3.3.1.1 Materia orgánica (MO%)

Las medias entre los sitios alterados y testigos, no presentan diferencias significativas, pero agrupados por zonas si, Anova $Pr(>F) = 0.03 *$, es mayor en la zona de Cancán con una disminución del 31% de MO de (13% a 9%), esta pérdida de materia orgánica se produce en un año de arado con tractor y dejado expuesto directamente al ambiente, sin cultivo, ni cobertura vegetal que proteja al suelo, sumados la elevada radiación solar, viento y coloración negra del suelo, que genera una alta evaporación, existe pérdida de la estructura del suelo y cambio de coloración, entre otras propiedades. En esta zona el porcentaje de MO es relativamente bajo comparado con otros sitios investigados que tienen porcentajes sobre el 20%, en el alterado de Quimsacocha existe una pérdida de 16% de MO vs testigo. En Buerán se mantiene los porcentajes de materia orgánica (23%) para el alterado y testigo, a pesar de haber sido dedicada a agricultura y ganadería, debido al aporte de MO, especialmente gallinaza.

También se evidencia una reducción de los porcentajes de MO, en el área de estudio en Quimsacocha cuya extensión es aproximadamente 3000 m² de terreno dedicado a la agricultura, se observa una reducción de 51% vs el testigo y 22% respecto a la línea base, esta pérdida de MO es debido a que en los terrenos evaluados no existe grandes aportes de MO. En la misma zona en el pastoreo por bovinos se reduce en 15%. En los caminos hay una pérdida de 26%. En el invernadero de aproximadamente 200 m², se evidencia una pérdida de MO de 30%. En los pastos mejorados como el ray grass con pastoreo intensivo se realiza grandes aportaciones, por lo que existe un incremento en el porcentaje de MO de 15% vs testigo y 30% con la línea base y no hay diferencias entre bosque de pinos con la línea base.

El contenido de MO generalmente disminuye cuando los Andosoles son cultivados (Higuchi y Kashiwaga, 1993; Moroizumi y Horino, 2002)

citados por Buytaert et al., 2005. La descomposición de la MO del suelo en la región del páramo puede ser una importante fuente de CO² atmosférico (Buytaert W. , et al., 2006), en el 2002 Buytaert et al., manifiestan que debido al cambio de uso del suelo y por ende la pérdida de la vegetación natural, la cual juega un importante rol debido a la capacidad de amortiguamiento del agua. Otro aspecto la capa de materia orgánica "litter" (hojarasca) la cual absorbe grandes cantidades de agua y puede ser muy profunda (20cm), la retención de agua de esta capa orgánica de litter puede ser más de 400% por peso, igual a 15mm.

3.3.1.2 Saturación de bases (SB%)

Existen diferencias significativas entre las medianas (Kruskal-Wallis $p = 0.003$), se incrementa en 50% en los sitios alterados, debido a la aplicación de abonos y fertilizantes, también presentan variabilidad en los datos.

Comparando las medianas entre los sitios alterado vs testigo por zonas de estudio, hay diferencias significativas (Kruskal-Wallis $p = 0.003$), es mayor la saturación de bases en los sitios alterados, en Buerán se incrementa en 40%; Quimsacocha y Cajas un 50%; excepto Cancán, donde existe una diferencia mínima siendo mayor el testigo, confirma lo expuesto, debido a que en este suelo fue arado y no se incorporó fertilización o enmiendas.

Los datos de SB por uso del suelo, es mayor en el invernadero comparado con el testigo en más del 70%, debido a que se incorpora enmiendas y fertilizantes; también en los pastos ray grass se incrementa la SB en 50%.

3.3.1.3 Calcio

El calcio presenta diferencias significativas en las medianas, entre los sitios alterados vs testigos (Kruskal-Wallis $p = 0.0005$), es mayor en los sitios alterados en 50%, debido a la incorporación de enmiendas y fertilizantes.

También existe diferencias significativas en las medianas, entre los alterados vs testigos en las zonas de estudio (Kruskal-Wallis $p = 0.003$), es mayor en los sitios alterados



que los testigos, se incrementa en aproximadamente el 50% en las zonas Buerán y Quimsacocha, comparando los testigos con la línea base son similares, en Cancán los valores del testigo y alterado no presentan diferencias.

Hay diferencias muy altas en el invernadero se incrementó el Ca en 87% vs el testigo, debido a la aplicación de enmiendas y fertilizantes, así como en los pastos ray grass en 78% vs testigo, y en los otros usos como: agricultura, pastoreo, corral de llamas, existe también un incremento de Ca.

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), pH, K, P, NO₃ y Al + H, estos elementos no muestran diferencias significativas entre las medianas.

3.3.1.4 Conductividad eléctrica (CE)

Los datos de (CE) alterados vs testigo, si presentan diferencias significativas entre las medianas (Kruskal-Wallis $p=0.014$), en los sitios alterados la CE se incrementa aproximadamente 30% y 40%. Comparando las medianas de CE en las zonas de estudio, no existen diferencias significativas.

Las mayores incrementos se manifiestan en los usos de invernadero y pastos ray grass, corral de llamas, por el aporte de fertilizantes, y en menores porcentajes para los otros sitios alterados; excepto el bosque de pinos donde la CE es menor que el testigo, pero es similar a la línea base.

3.3.1.5 NH₄

Comparando las medianas entre alterados vs testigo, hay diferencias significativas (Kruskal-Wallis $p = 0.02$), es mayor en los testigos con un incremento 30% a 35% de NH₄.

Analizando los valores de NH₄ por zonas, también hay diferencias significativas (Kruskal-Wallis $p=0.01$), es mayor en los testigo de Buerán con un 55%; Quimsacocha con 30% a 35%; pero lo contrario sucede en Cancán, es mayor en 30% a 40% el alterado vs testigo. Los valores más altos de NH₄ son de la línea

base y el menor valor en la zona agrícola de Buerán.

Analizando por uso el NH₄ se obtiene valores altos en los testigos: bosque de pino, corral de llamas, invernadero, pasto ray grass y caminos. Los menores contenidos de este elemento se presentan en la zona agrícola de Buerán, caminos y turismo.

3.3.2 Análisis de Componentes Principales (ACP) para los parámetros químicos

El ACP para las variables químicas se realiza para simplificar el número de éstas, considerando las correlaciones (Tabla 4), con la finalidad de simplificar la interpretación. En total 11 de las 22 propiedades químicas se consideran.

Figura 3, se observa el ACP para las variables químicas, el componente 1 explica el 52% de la varianza y está conformado por: Saturación de bases (SB), Ca, también están: C, N y CIC correlacionadas negativamente con las dos primeras (ver Tabla 4).

El segundo componente explica el 23% de la varianza y tiene la tendencia hacia el (pH) del suelo, correlacionado negativamente con Al+H, confirma que en estos suelos de origen volcánico, la mayor parte de acidez es debido al aluminio que en presencia de agua genera protones, que sería la principal fuente de acidez de los suelos donde predominan los sistemas de óxidos y los de aluminosilicatos laminares revestidos de óxidos, también un buen porcentaje de la CICE puede ser atribuido al aluminio intercambiable, existiendo para estas dos variables una fuerte correlación positiva. El tercer componente representa un 11%, está conformado por NO₃, El cuarto componente (8%), se encuentra el P. los cuatro componentes juntos explican el 93 % del total de la varianza. También existen importantes correlaciones positivas como: C y Al+H: $P = 0.01$ ($r = 0.49$), esto confirma la presencia de complejos organometálicos; en el 2006 Buytaert, Deckers, & Wyseure, reportan correlaciones $P < 0.001$ ($R^2=0.44$) para estos dos elementos, pero manifiestan que la



presencia de Al libre no es necesariamente una condición de acumulación de carbón orgánico.

Existe correlaciones entre el Al+H y Fe ($r = 0.41$). Arcilla y saturación de bases ($r = 0.78$). Negativamente se encuentran correlacionados la arcilla y C ($r = -0.67$)

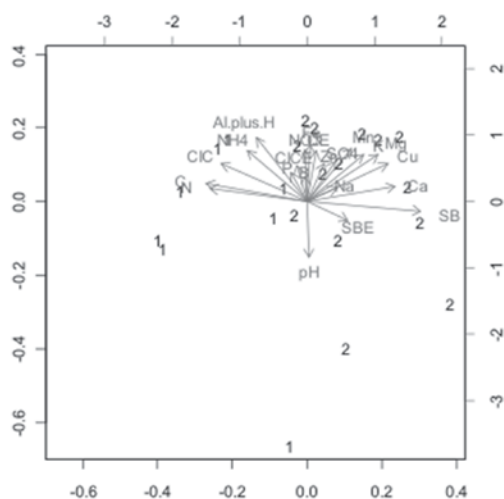


Figura 3: ACP para las características químicas en Andosoles

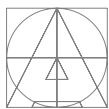
4 Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

- La densidad aparente (DA) no presenta diferencias significativas para el total de los datos. Pero comparando por zonas de estudio si existe diferencias significativas ($p = 0.02$). Es más alto el valor de la DA en la mayoría de los sitios alterados, en Buerán, se observa un mayor incremento 48% vs testigo y 32% con la línea base, estos suelos han sido intervenidos por más de 20 años con agricultura y ganadería; en la zona de Cancán es mayor a 8% el alterado, donde este fue arado con tractor y expuesto a las condiciones ambientales sin cobertura vegetal por un año, en Quimsacocha la diferencia es menor; excepto en el Cajas los valores de DA son menores a la línea base. Las incrementos son similares cuando se compara por uso de suelo, la DA es mayor en el invernadero a 44%, y la ganadería intensiva

Tabla 4: Matriz de correlaciones Spearman (R) de las propiedades químicas (n = 40)

	Al+H	B	C	Ca	CE	CIC	CICE	Cu	Fe	K	Mg	Mn	N	Na	NH4	NO3	P	pH	SB	SBE	S04	Zn	
B	0.04																						
C	0.49	0.07																					
Ca	-0.15	-0.02	-0.33																				
CE	0.23	0.19	0.15	0.41																			
CIC	0.60	0.23	0.84	-0.26	0.30																		
CICE	0.43	0.08	0.19	0.24	0.33	0.29																	
Cu	0.16	-0.02	-0.43	0.65	0.39	-0.19	0.15																
Fe	0.41	0.29	0.07	0.22	0.42	0.17	0.24	0.28															
K	0.28	0.18	-0.15	0.53	0.50	0.05	0.12	0.56	0.47														
Mg	0.27	0.10	-0.20	0.76	0.57	-0.05	0.35	0.66	0.46	0.79													
Mn	0.39	0.29	0.01	0.52	0.37	0.14	0.23	0.59	0.39	0.66	0.71												
N	0.39	0.01	0.88	-0.35	0.25	0.61	0.12	-0.51	0.13	-0.15	-0.23	-0.11											
Na	-0.08	0.39	-0.18	0.11	0.30	-0.10	0.03	0.09	0.30	0.33	0.37	0.03	-0.13										
NH4	0.55	0.29	0.49	-0.24	0.34	0.43	0.16	-0.17	0.74	0.22	0.09	0.19	0.62	0.22									
NO3	0.44	0.22	0.17	0.21	0.53	0.41	0.30	0.60	0.40	0.27	0.36	0.40	0.06	0.10	0.19								
P	0.05	0.05	0.00	-0.08	0.53	0.12	0.21	0.12	0.39	0.12	0.00	-0.12	0.13	0.06	0.34	0.31							
pH	-0.40	-0.46	-0.01	0.03	-0.26	-0.13	-0.19	-0.11	-0.51	-0.33	-0.27	-0.31	-0.03	-0.28	-0.51	-0.14	-0.24						
SB	-0.46	-0.02	-0.70	0.80	0.14	-0.66	-0.02	0.61	0.02	0.43	0.60	0.35	-0.62	0.26	-0.45	-0.01	-0.13	0.10					
SBE	-0.43	0.26	-0.33	0.08	-0.23	-0.46	-0.30	-0.20	0.18	0.23	0.07	0.00	-0.20	0.22	0.05	-0.48	-0.13	-0.35	0.29				
S04	0.25	0.39	-0.02	0.30	0.38	0.08	0.09	0.37	0.36	0.58	0.43	0.64	0.00	0.23	0.28	0.33	0.12	-0.18	0.23	-0.04			
Zn	0.22	0.04	0.03	0.38	0.42	0.08	0.31	0.18	0.49	0.34	0.50	0.44	0.08	0.08	0.39	0.08	0.20	-0.28	0.20	0.05	0.12		



en pastos mejorados 27%, estos dos últimos con 5 años de intervención. El testigo Cancán presenta los valores más altos de DA (0.86 g cm^{-3}), que podría explicarse por el bajo contenido de MO (13%) comparado con la línea base (27%), estas dos variables presentan muy alta correlación ($r = -0.71$), sumado a las quemas y el pisoteo del suelo por equinos, ovinos, bovinos, en esta zona es difícil encontrar un sitio sin intervención.

- La Conductividad hidráulica saturada (K_s) no presenta diferencias significativas comparando el total de los datos. Pero cuando se analiza por zonas de estudio, si presentan diferencias ($p = 0.04$), siempre es mayor la K_s en los sitios alterados vs testigo, la mayor diferencia está en el alterado Cajas con 83% más que la línea base, seguido de Buerán con 65%; menor diferencia en los sitios Quimsacocha (29%) y Cancán (10%). La línea base tiene un promedio $K_s = 0.49 \text{ cm h}^{-1}$. Analizando por uso de suelo también se observan diferencias para el invernadero 68%; el sitio con pastos ray grass (*Lolium sp*) 28%. Buytaert et al. (2005), encontraron diferencias significativas para K_s , comparando una cuenca testigo (Huagrauma) con una alterada (Soroche), siendo mayor en la alterada (31%). El incremento de la conductividad del suelo, puede acelerar la respuesta hidrológica, resultando en un rápido decrecimiento del flujo base, este proceso puede ser incrementado por el drenaje artificial que se practica en cuencas cultivadas.
- Los datos para punto de saturación (**pF-0**), comparando el total de los datos, si presentan diferencias significativas ($P = 0.01$). La humedad de saturación se encuentra en 83%, para los Andosoles testigos y 77% los alterados. Analizando por zona de estudio, también se encontraron diferencias significativas ($P = 0.008$). En Buerán 13% menos contenido de humedad en el alterado. Los testigos superan el 80%, excepto Cancán (67%); el alterado Cancán presenta el valor más bajo (65%), esto podría explicarse por la alta DA. Los alterados del Cajas y Quimsacocha también muestran valores <80% (75% y 78%) respectivamente. Comparando por uso de suelos, los alterados muestran valores inferiores al 80%, excepto el bosque de pino que tiene el valor más alto (88%).
- Comparando el total de datos para **pF- 2.70**, si existe diferencias significativas entre las medias, $Pr = 0.02$. Los sitios testigo todavía mantienen un contenido alto de agua, con un promedio de 77% y los alterados 72%. Por zonas también presentan diferencias significativas $Pr = 0.04$. Los sitios testigo con valores de 79 %, excepto Cancán 62%; la mayor diferencia muestra la zona de Buerán, con una reducción en 22% del contenido de humedad.
- La actividad agropecuaria en Buerán tiene una reducción de 13% del contenido volumétrico a pF-0, 22% se redujo a pF-2.7 y 37% a pF-4.2. Los alterados de Cancán y Cajas presenta un 19% más de humedad a punto de marchitez que los testigos, esto podría explicarse debido a que las afecciones al suelo provocaron que se dañe la estructura, haciendo que los macroporos disminuyan de tamaño convirtiéndolos en microporos, lo que ocasionaría que aumentan la capacidad de retención de humedad.
- La reducción del contenido total del agua disponible para las plantas (capacidad de campo - punto de marchitez), comparando los sitios testigos vs alterados, muestran diferencias altamente significativas ($p = 0.0004$) con 29%, o $0.10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. La diferencia se debe a que los sitios testigo presen-



tan mayor humedad a pF-2.7, y los alterados a pF-4.2, podría ser por incremento de los microporos. Similares resultados fueron encontrados por Buytaert et al (2005), para Andosoles la zona de Queseras, comparando sitios cultivados con testigos, obtuvo una diferencia de 32%, pero ésta se debe a la baja capacidad de retención a pF-4.2 de los sitios cultivados. En el 2002 Buytaert et al., manifiestan que un 20% disminuye la retención de agua debido a la agricultura y 16% en dos años de cultivo, lo que puede tener un impacto en el manejo del agua en la región.

- El Análisis de Componentes Principales (ACP) de los parámetros hidrofísicos. El primer componente está conformado por limo, densidad aparente y arcilla, correlacionado negativamente con la materia orgánica y pF-2.7. Este componente explica el 77% de la varianza. La MO muestra una correlación muy alta con la DA ($r = -0.71$), $P = 0.003$, es la variable más importante para la capacidad de retención de agua, principalmente en los rangos bajos de succión del suelo. En el 2006 Buytaert et al, también reportan correlaciones muy altas entre estas dos variables ($r = -0.55$), $P < 0.001$. En el segundo componente explica el 13% de la varianza, corresponde a pF-4.17, sumados los dos componentes explican el 90% del total de la varianza.
- La materia orgánica no presenta diferencias significativas para el total de datos. Si existen diferencias significativas por zonas de estudio, $Pr = 0.03$. La mayor pérdida de MO se presenta en la zona Cancán (31%), en un año de arado con tractor y dejado expuesto al ambiente, sin cobertura vegetal, en el 2002 Buytaert et al, indica que la materia orgánica juega un importante rol debido a la capacidad de amortiguamiento del agua, otro aspecto muy importante es la capa de hojarasca, que puede retener agua más de 400% por peso, igual a 15mm. Así mismo, en esa zona el porcentaje de MO es relativamente bajo comparado con los otros sitios investigados que superan el 20%. En los sitios de estudio como: invernadero, caminos, agricultura, pastoreo, en la zona de Quimsacocha, existe una pérdida de (15 - 30%) MO, donde no se han incorporado grandes cantidades de MO. En el alterado de Buerán se mantiene los porcentajes de materia orgánica (23%), a pesar de haber sido intervenida por más de 20 años, por actividades agropecuarias, por la incorporación especialmente de gallinaza. En el pastoreo intensivo con pastos mejorados, se incrementa la MO (15-30%).
- La saturación de bases y el calcio superan el 50% en las zonas donde se han incorporado a través de fertilización o enmiendas. El pH no presenta diferencias significativas.
- La alta correlación entre C y Al+H ($r = 0.49$) $P = 0.01$, confirma la presencia de complejos organometálicos, por esta razón los resultados del laboratorio muestran altos porcentajes de contenido de arena, por lo que se podría concluir que el método (Bouyoucus), no sería adecuado para suelos orgánicos. La formación de estas pseudo arenas hacen que aparezca una correlación positiva con la materia orgánica y la retención de agua, también la arena se sobrepone a los contenidos de arcilla por eso se presenta una correlación negativa entre arcilla y MO.
- El Análisis de Componentes Principales (ACP) para las variables químicas, se deduce que, el componente 1 explica el 52% de la varianza y está conformado por saturación de bases (SB), calcio (Ca), correlacionadas negati-



vamente con carbono (C), nitrógeno (N) y capacidad de intercambio catiónico y (CIC). El segundo componente explica el 23% de la varianza y tiene la tendencia hacia a la naturaleza de reacción del suelo (pH), correlacionado negativamente con Al+H, lo cual confirma que en estos suelos de origen volcánico, la mayor parte del acidez es debido al aluminio, también un buen porcentaje de la CICE puede ser atribuido al aluminio intercambiable, existiendo para estas dos variables una fuerte correlación ($r = 0.43$).

4.2 Recomendaciones

- Ampliar la investigación a un mayor número de pares de muestras, esto permitiría una mejor apreciación estadística de los resultados de los análisis.
- Mantener y ampliar el banco de datos de suelos de páramo, ya que permite ajustar los valores de la línea base a una zona más amplia con características pedogenéticas diferentes como el clima y la topografía.
- La presente investigación muestra un evidente cambio en la distribución del tamaño de los poros, más no en la porosidad total de las muestras analizadas, se recomienda realizar análisis utilizando microfotografía, para estimar de una mejor manera esta variación.
- Investigar un método adecuado para determinar la textura en los suelos del páramo, ya que el método de Bouyoucus, no parecería ser correcto para estos suelos.
- Propiciar la estabilidad de la materia orgánica en el suelo para mantener la naturaleza intrínseca de los Andosoles e Histosoles, que como se conoce tienen características muy particulares, especialmente relacionadas a la retención de humedad. Siendo el contenido de materia orgánica en estos suelos elevado, esto indica la particular característica para retener el C, la alteración de los mismos conduciría a la disminución de esta reserva, que sería liberada directamente hacia el medio ambiente.
- Delimitación de todas las áreas de páramo que se encuentren intervenidas de acuerdo a su grado de afección o estado de salud ecológico tomando como referente el presente estudio.

Referencias bibliográficas

- Hofstede, R., Coppus, R., Mena, P., Wolf, J., & Sevink, J. (18 de 03 de 2002). Recuperado el 8 de 11 de 2010, de <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/25541/1/articulo1.pdf>
- Guerrero, E. (2009). Implicaciones de la minería en los páramos de Colombia, Ecuador y Perú.
- Medina, G., Recharte, J., Suárez, E., & Bernal, F. (1997). Perspectivas para la conservación de los páramos en el Ecuador. Quito.
- Mejía, S. (2011). Procedimiento de Selección y Validación de Métodos de Ensayo Laboratorio de Hidrofísica de Suelos. Cuenca, Ecuador.
- Van Dam, J., Stricker, J., & Droogers, P. (1992). Inverse method for determining soil hydraulic functions from one-step outflow experiments.
- R Development Core Team. (2011). R Foundation for Statistical Computing. Recuperado el 17 de 07 de 2011, de <http://www.R-project.org/>
- Van Ranst, E. (1997). Tropical Soils: Geography, Clasification, Properties and Management. Gent, Belgium.
- Norambuena, P., Luzio, W., & vera, W. (01 de 2002). <http://www.scielo.cl/>. Recuperado el 03 de 07 de 2011, de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s0365-28072002000100015&lng=es&nrm=iso



Buytaert, W. (2004). The properties of the soils of the south Ecuadorian páramo and the impact of land use changes on their hydrology.

Iñiguez, V. (2003). Balance hídrico de microcuencas de páramo. Cuenca.

Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, j, y otros. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos.

Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre, B., & Deckers, J. (2005 b). The effect of land use changes on the hydrological behavior of Histic Andosols in south Ecuador.

Buytaert, W., Deckers, J., Dercon, G., De Bièvre, B., Poesen, J., & Govers, G. (2002). Impact of land use changes on the hydrological properties of volcanic ash soils in South Ecuador.

Buytaert, W., Deckers, J., & Wyseure, G. (2006). Regional variability of volcanic ash soils in south Ecuador: The relation with parent material, climate and land use.