

CÉSAR VÁSQUEZ (COORDINADOR)

Comparación química de suelos en distintas coberturas vegetales del PNC mediante métodos de clúster análisis

Pablo Quinteros A.,¹¹ Tripaldi Piercosimo¹¹ y Ansaloni Rafaella¹²

Introducción

La vegetación y el suelo son indicadores importantes de la salud del páramo. La capa vegetal del páramo es importante para la protección del suelo y como hábitat para la fauna nativa (Hofstede *et al.*, 2003). La evaluación de las características del suelo requiere medir sus propiedades físicas y químicas.

El Parque Nacional Cajas (PNC) es uno de los principales suministros de agua para la ciudad de Cuenca, puesto que sus suelos retienen grandes cantidades de líquido vital, especialmente el páramo de almohadillas; los suelos del pajonal resultan importantes en el secuestro de carbono atmosférico, mientras que los suelos de los bosques de *Polylepis* y bosques alto-andinos originan ecosistemas únicos evidenciado en un alto endemismo presente en el PNC; razón por lo cual el estudio de las características físico químicas del suelo resulta importante en la investigación de las interacciones sustrato-vegetal.

El análisis de conglomerados o clúster es una técnica de análisis exploratorio de datos que permite descubrir asociaciones y estructuras en los datos que no son evidentes *a priori*, ordenando objetos en grupos de asociación/similitud de forma que los objetos de un mismo grupo sean muy similares entre sí, y los objetos de clústeres diferentes sean distintos (Figueras, 2001).

El método KNN o k-Nearest Neighbors, basado en el reconocimiento de patrones de criterios de vecindad. Parte de la idea de que una nueva muestra será clasificada a la clase a la cual pertenezca la mayor cantidad de vecinos más cercanos del (reconocimiento de patrones patrón) del conjunto de entrenamiento más cercano a esta (Figueras, 2001).

El objetivo general de este estudio es investigar las relaciones entre las características químicas del suelo (Ca, Mg, Fe, K, Na, pH, conductividad, nitrógeno total, fósforo, y materia orgánica) y el tipo de coberturas vegetales presentes en el PNC (páramo de pajonal, páramo de almohadilla, bosque de *Polylepis* y bosque altoandino), mediante métodos de análisis clúster y clasificación KNN.

11 Universidad del Azuay, Laboratorio de Servicios Ambientales, Cuenca-Ecuador.

12 Universidad del Azuay, Facultad de Ciencia y Tecnología, Cuenca-Ecuador.

Descripción del sitio de estudio

El PNC se localiza entre los 3.200 y los 4.545 msnm., ocupando parte de los territorios de la cordillera occidental del sur de los Andes ecuatorianos. Incluye las cuencas altas de los ríos Llaviucu, Mazán y Soldados, que drenan hacia el Atlántico, y de los ríos Luspa, Sunincocha, Atugyacu, Yantaguhayco, Jerez y Angas, hacia el Pacífico.

En el anexo 1 se encuentra el mapa de áreas representativas de las formaciones vegetales correspondientes al PNC. Las comunidades vegetales estudiadas en la presente investigación se encuentran descritas a continuación.

Bosque alto-andino

Se encuentra entre los 2.900 y 3.400 msnm., cubriendo gran porcentaje del área de las microcuencas del Llaviucu y Mazan; incluyen alrededor de 300 especies de plantas vasculares, entre las que se pueden encontrar (Minga y Serrano): *Ocotea heterochroma*, *Weinmannia fagaroides*, *Escallonia myrtilloides*, *Miconia pustulata*, *Axinaea affinis*, *Miconia denticulata*, *Hedyosmum cumbalense* *Gynoxys* spp, *Badilloa salicina* y *Clethra fimbriata*. La estructura de la vegetación suele cambiar como consecuencia de las alteraciones causadas por la explotación forestal.

Bosques de *Polylepis*

Son bosques que crecen formando pequeños fragmentos caracterizados por su alta especificidad y diversidad biológica concentrada en áreas muy reducidas, resultado de sus características ecológicas únicas; por definición las especies de *Polylepis* son los árboles dominantes en estos bosques, sin embargo hay un gran número de especies arbóreas y arbustivas asociadas con ellas (Kessler, 1996). En el PNC, estos bosques se localizan sobre los 3.300 msnm., en las microcuencas de Luspa y Sunincocha, la dominancia se encuentra alternada entre las especies *Preticulata* y *Pincana*; entre las especies asociadas más frecuentes se encuentran: *Myrsine dependens*, *Miconia salicifolia*, *Sessea crassivenosa*, *Vallea stipularis* y *Gynoxys* spp, esta última puede eventualmente llegar a dominar pequeños doseles (Minga y Serrano).

Páramo de pajonal

La comunidad vegetal más ampliamente distribuida, cerca del 90.6% (CEMAPRIMES-ETAPA, 2003), es el páramo de pajonal, cuya fisionomía y estructura es bastante homogénea; además, crecen en grandes cantidades, pequeños arbustos (Sierra, 1999). Es una formación herbácea, siempre verde, relacionada con temperaturas bajas y condiciones hiper-húmedas cuya fisionomía está dada principalmente por gramíneas, entre las más representativas se encuentran: *Calamagrostis* sp., *Stipa* sp, y otras menos abundantes *Agrostis*, *Festuca*, *Paspalum*, *Poa*, *Cortadeira*. Se pueden encontrar en espacios más abiertos otros gé-

neros, entre otras muchas especies: Bromelias, Asteráceas, *Lycopodium*, *Castilleja*, *Gentiana*, *Geranium*, *Valeriana* (Serrano y Minga).

Páramos de almohadillas

Son áreas denominadas ciénagas o turberas; son lugares inundados donde el suelo presenta condiciones anaeróbicas y se inhibe la descomposición de la materia orgánica. Son suministro de ríos y quebradas (Huttel, 1997), se encuentran, generalmente, en áreas muy pequeñas, dispersos a través del páramo de pajonal. En estas zonas la alfombra de gramíneas es discontinua, y a veces, inexistente. Las almohadillas pueden ocupar una proporción muy importante de la superficie del suelo pero nunca la cubren totalmente; los arbustos son escasos y algunas porciones del suelo a veces están desnudas. Las principales especies son *Plantago rigida*, *P.tubulosa* (Plantaginaceae), *Gentianella cerastoides* (Gentianaceae), *Distichia muescoides* (Juncaceae), y varias especies de *Azorella sp.*, *Geranium sp.*, *Hypochaeris sp.* y *Werneria sp.* (Serrano y Minga).

En la actualidad, sus suelos se han clasificado, según la FAO, como Andosols, que evidencian la presencia de poca ceniza volcánica reciente y una baja sensibilidad a la erosión hídrica, siendo suelos bien drenados (Dercon *et al.*, 1998).

Fase de campo

El trabajo de campo se realizó en el PNC, se recolectaron un total de 31 muestras de suelo, tomadas sobre el horizonte A, a 25 cm de profundidad aproximadamente, excluyendo la capa A0, es decir, la hojarasca y las raicillas.

Para el desarrollo de la investigación se recolectaron muestras de suelos en las diferentes comunidades vegetales correspondientes a: los suelos del bosque alto-andino fueron tomadas en el bosque de la laguna de Llaviuco; para el bosque de *Polylepis*, en el sector de la laguna Toreadora; para el páramo de almohadillas, en el sector de Tres Cruces, Labrado y Soldados; para el páramo de pajonal, en Labrado, Soldados, Totoracocha, Tres Cruces, Miguir y Toreadora. Se colectó mayor número de muestras de páramo de pajonal por poseer mayor cobertura vegetal dentro del PNC.

Las muestras fueron recolectadas en bolsas de plástico y etiquetadas con la siguiente información:

- Descripción de la vegetación circundante
- Altura (msnm.)
- Uso del suelo
- Fecha
- Posición GPS
- Observaciones

Previo a los análisis en el laboratorio, las muestras fueron secadas a temperatura ambiente, en un cuarto ventilado durante el tiempo necesario. Posteriormente, utilizando un tamiz de 2 mm, se filtran las muestras para obtener un material homogéneo.

Fase de laboratorio

- Para realizar los análisis físico-químicos de las muestras se siguieron los siguientes métodos utilizados en el Laboratorio de Servicios Ambientales, de la Universidad del Azuay, descritos por Primo y Carrasco (1973):
- Para la determinación de pH, se utilizó el método potenciométrico con un electrodo de vidrio, utilizando una solución 2:1 (agua : suelo).
- La materia orgánica se determinó por mineralización con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_6$).
- Para la extracción del fósforo se utilizó una solución ácida de NH_4F utilizando el método Bray II.
- Para determinar el nitrógeno total, se utilizó el método Kjeldhal con ácido sulfúrico concentrado y su posterior lectura en el espectrofotómetro ultravioleta-visible.
- Para determinar la capacidad de intercambio catiónico, se realizó la extracción con una solución de $BaCl_2$ y su posterior lectura en el espectrofotómetro de absorción atómica.

Análisis estadístico de los datos físico-químicos

Con los parámetros químicos obtenidos para los suelos se ha construido una base de datos de 31 suelos y 14 parámetros. El estudio estadístico multivariante se ha efectuado en dos etapas. En la primera se ha aplicado el análisis clúster con el fin de obtener informaciones sobre la posible existencia de grupos homogéneos de suelos. En la segunda parte se ha clasificado los suelos de la base de datos frente al tipo de cobertura vegetal mediante algoritmo de clasificación KNN previa una selección de los parámetros significativos realizada con algoritmo genético según Leardi (*et al.*, 1992).

Resultados

Características generales

Los análisis de las 31 muestras de suelos se realizaron en el Laboratorio de Servicios Ambientales de la Universidad del Azuay y cuyos resultados se encuentran en la tabla del anexo 2, junto con los cálculos de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), grado de saturación de bases (G.S.B%), carbono orgánico (%), y la relación C/N; de igual manera los datos obtenidos en el campo se presentan en la tabla del anexo 3.

La composición de las muestras de suelos del PNC se caracteriza por el predominio de materia orgánica en los suelos de los pajonales y de páramo de almohadillas, de igual manera en estas comunidades vegetales el pH es más bajo comparándolo con los bosques de *Polylepis* y alto-andino. En general, ambos tipos de bosque tienen una alta capacidad de intercambio catiónico y alta tasa de saturación de bases.

A partir de la materia orgánica (%) se obtuvo el valor del carbono orgánico, multiplicándolo por el factor Van Bemmelen, que es 1.724. Este factor ha sido utilizado durante muchos años y se basa en la aceptación de que la materia orgánica del suelo contiene 58%

de C orgánico. La bibliografía indica que la proporción de C orgánico en la materia orgánica de un conjunto de suelos es muy variable, por lo que todo factor constante es solo una aproximación (Artigas, 2004). La corteza terrestre contribuye con material mineral mientras que los organismos introducen un componente orgánico en los suelos, originando así el material mineral y la materia orgánica.

Caracterización y clasificación de los suelos

De acuerdo a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelos (FAO, 2008), para la selección de características de diagnóstico, se toma en cuenta las relaciones con los procesos formadores de suelos. En el nivel categórico más alto, las clases se diferencian principalmente de acuerdo al proceso pedogenético primario que ha producido los rasgos de suelo característicos predominantes. En el segundo nivel, las unidades de suelos se diferencian de acuerdo a cualquier proceso formador de suelos secundario que haya afectado significativamente los rasgos de suelo primarios. En ciertos casos, pueden tomarse en cuenta las características del suelo que tengan un efecto significativo sobre el uso.

Existen evidencias de campo, históricas y bibliográficas, que indican que los suelos del PNC son andosoles e histosoles, según la FAO (2008). Entre las evidencias históricas se sabe que hace 26 millones de años se da el apareamiento de la cordillera de los Andes. Luego, hace 15.000 años, la región del PNC experimentó un proceso de glaciación, que excavó una superficie muy irregular permitiendo la presencia de lagunas y humedales en los valles glaciares en forma de "U", formados por el peso y retiro de capas de hielo en eras antiguas (Harden y Borrero, 2005).

En las muestras de suelo se pueden apreciar cristales provenientes de material volcánico antiguo, lo que evidencia la presencia de materiales piroclásticos (Borrero y Harden, 2005); su topografía redondeada dejada por las lenguas glaciales formando valles en forma de "U" se puede apreciar en las figuras 1 y 2.

Las condiciones climáticas tienen marcadas consecuencias sobre la evolución de los suelos; es así que en el PNC, la temperatura baja reduce la actividad biológica y como consecuencia la mineralización de la materia orgánica disminuye, permitiendo su acumulación en grandes cantidades. La humedad presente y constante con las precipitaciones ocultas (neblina, lloviznas, etc.), dan al suelo una humedad permanente permitiendo una evolución rápida (Podwojewski y Poulénard, 2000).

Los vientos localmente fuertes pueden aumentar la evapotranspiración potencial en las zonas cubiertas de páramo, en donde los vientos se añaden a la insolación episódicamente intensa, para conferir características xéricas a la vegetación de condiciones climáticas húmedas (Huttel, 1997).

Figura 1
Se puede apreciar el corte vertical dejado
por una roca provocado en el momento del deshielo



Figura 2
Bosque alto-andino, laguna de Llaviuco, típico valle
en forma de U característico de asentamientos glaciares



Los “andosoles” (del japonés *an*, negro, y *do* suelo), como se aprecia su perfil en la fotografía 3, son típicamente negros provenientes de paisajes de origen volcánico, ocurren en regiones de todo el mundo, cuyo material parental son vidrios y eyecciones volcánicas principalmente cenizas, y otros materiales ricos en silicatos; estos suelos presentan una fuerte fijación de fósforo, no asimilable para las plantas (causada por Al y Fe libres), afectando su falta al desarrollo de las plantas (FAO, 2007).

Tienen una buena tasa de humedad que se debe, más que a la cantidad de lluvia que varía en el PNC entre 500 y 3.000 mm/año, a las constantes precipitaciones ocultas como neblina, lloviznas, etc. Son suelos porosos por lo que su densidad aparente es muy débil (<0.9), la tasa de retención de agua es muy alta y tienen pH ácido que está relacionado con la presencia de gramíneas como *Calamagrostis*, *Festuca spp.* etc. (Podwojeski y Poulénard, 2000)

Los “histosoles” (del griego *histos*, tejido) comprenden suelos formados de material orgánico principalmente, son más conocidos como suelos de turba, de pantano y suelos orgánicos; cuyo material parental proviene de restos vegetales incompletamente descompuestos con o sin mezcla de arcilla, limo o arena. En las tierras altas poseen una alta relación evapo-transpiración. Tienen una lenta mineralización. Los histosoles sin saturación de agua prolongada generalmente se forman en ambientes fríos que son atractivos para el uso agrícola, necesitando ser drenadas y fertilizadas para permitir la producción de cultivos normales. En el ecosistema cumplen función de esponjas al regular el flujo de los cursos de agua y soportar humedales que contienen especies de animales únicas.

Figura 3
Típico horizonte de un andosol del PNC



Además de la caracterización expuesta anteriormente, los suelos pueden presentar ciertas características hísticas, hídricas y perhídricas en su morfología, lo que permite adjuntar estas propiedades a la propuesta de clasificación.

Las características hísticas son superficiales, tienen poca profundidad, material orgánico pobremente aireado, y se encuentran saturados con agua por 30 días consecutivos o más, lo que es evidente en las medidas de la humedad media anual del PNC, de 1.200 mm (PNC, 2009). El límite inferior del contenido de carbono orgánico, varía desde 12 a 18% de carbono orgánico (FAO, 2008).

Las características hídricas se refiere a que tienen dentro de 100 cm de la superficie del suelo, una o más capas con un espesor combinado de 35 cm o más, tienen una retención de agua de 100 por ciento o más (*solo en andosoles*) (FAO, 2007).

Entonces, se pueden clasificar a los suelos estudiados cómo:

- Histic Andosols
- Hidric Andosols
- Perhidric Andosols
- Histic-Hidric Andosol
- Andosols
- Histosols

Análisis de la clasificación por clúster y KNN

Aplicando el método clúster sobre los análisis físico-químicos, se obtuvo un dendrograma presentado en la figura 4, el cual presenta cuatro grupos diferenciados; de izquierda a derecha, el primer y cuarto grupo son bien diferenciados, mientras que el segundo y el tercero presentan estrechas diferencias. En el primer grupo compuesto por tres muestras, corresponden a las muestras de pajonal. En el segundo grupo todas son muestras de pajonal y una muestra de almohadillas. El tercer grupo corresponde a nueve muestras de pajonal y tres muestras de almohadillas. El cuarto grupo se encuentra los de *Polylepis* y los alto-andinos. Se puede observar la similitud que existen entre las muestras de almohadillas y las de pajonal, mientras que la diferencia es más marcada entre las muestras que son de los bosques y las muestras que se encuentran fuera del PNC.

Para confirmar las informaciones cualitativas proporcionadas por el clúster de análisis, se ha aplicado el método de clasificación KNN con la selección previa de los parámetros significativos. El algoritmo genético de selección se aplicó según los valores presentados en la tabla 1.

Figura 4
Dendrograma elaborado sobre los análisis físico-químicos realizados por los métodos tradicionales

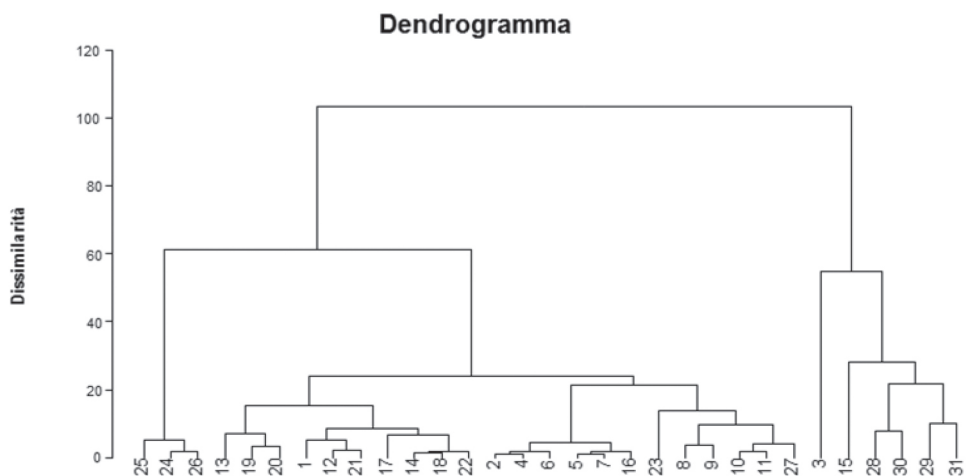
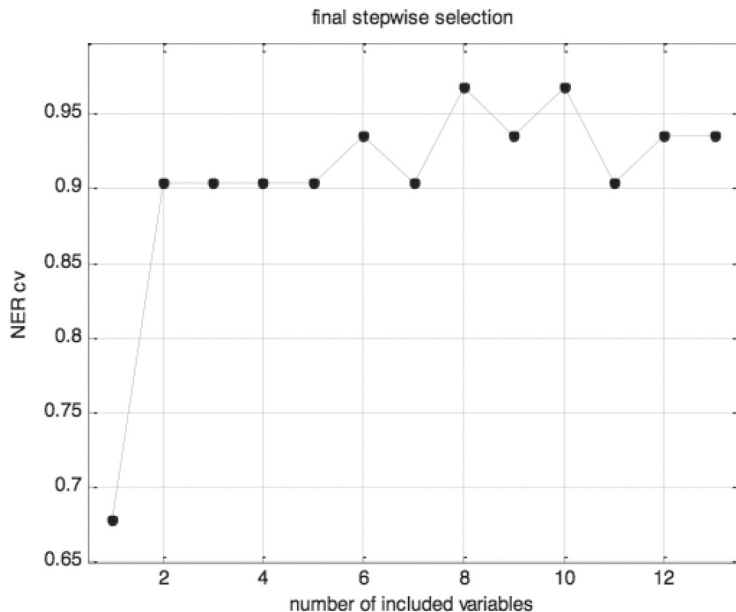


Tabla 1
Descripción de los valores utilizados en el análisis KNN

method:	'knn'
scal:	'auto'
cv_groups:	5
cv_type:	'vene'
num_chrom:	30
startvar:	5
maxvar:	30
probmur:	0.0100
probcross:	0.5000
runs:	100
num_eval:	100
kernel:	'linear'
num_windows:	1
dist_type:	'euclidean'
domax:	0

Luego de la culminación de las iteraciones para desarrollar el modelo de clasificación, se ha encontrado que al aumentar el número de parámetros la calidad del modelo, varía según el gráfico de la figura 5.

Figura 5
Gráfico de la calidad del modelo en función del número creciente de las 13 variables



De la figura 5 se revela que la calidad máxima del modelo de clasificación se obtiene con 8 y 10 parámetros. En este trabajo se ha utilizado el modelo de 10 parámetros, a saber: calcio, nitrógeno total, hierro, fósforo, CIC, relación C-N, pH, conductividad, sodio y carbono orgánico. El parámetro de calidad utilizado es el No Error Rate Cross, validado con 5 grupos de cancelación, lo cual indica una buena capacidad predictiva del modelo.

La matriz de confusión presentada en la tabla 2 se resume la *performance* de la clasificación; los suelos correctamente clasificados están en la diagonal de la matriz.

Tabla 2
Matriz de confusión

clases algoritmo					
c. iniciales	1	2	3	4	Total
1	3	0	0	0	3
2	0	10	1	0	11
3	0	0	11	0	11
4	0	2	0	4	6
Total					31

En la tabla 2, se puede ver que la primera y la tercera clase están correctamente clasificadas, mientras que los suelos de la segunda clase presentan errores de clasificación de aproximadamente 10% y los peores clasificados son los del cuarto grupo; en la tabla 3 se presentan los valores del porcentaje de aciertos para los cuatro grupos.

Tabla 3
Valores del porcentaje de aciertos de la clasificación de los suelos efectuada por KNN

Grupos	% de aciertos
1	1
2	0.9091
3	10.000
4	0.6667
% Total	0.9032

No existen diferencias significativas en la distribución de las muestras entre la clasificación KNN y el método clúster. Se conservan los cuatro grupos principales, con la diferencia que entre los grupos dos y tres, varían tres muestras en su distribución, estas son muestras de pajonal y almohadillas.

Discusión

Caracterización de los suelos

Según el análisis de componentes principales KNN, en la figura 4, se puede observar la similitud que existe entre las muestras de almohadillas y las de pajonal, mientras que las diferencias se encuentran entre estas con las muestras de los bosques y las muestras que se encuentran fuera del PNC. Las similitudes entre las muestras de pajonal y almohadillas puede ser debido a que las almohadillas se encuentran dispersos a través de toda la superficie del pajonal y en áreas muy pequeñas y restringidas (Minga y Serrano), generalmente las almohadillas se localizan en las partes bajas y planas donde se acumula el agua por escorrentía, generando un microclima menos frío en su interior, donde las plantas protegen sus órganos jóvenes (Hofstede *et al.*, 2003), en estos ecosistemas se encuentra gran diversidad de plantas, sin embargo por su cercanía con los pajonales reciben similares aportes de materia orgánica.

Sin embargo, las diferencias que existen entre los pajonales y las almohadillas son debido a la cantidad de agua que se acumula en las partes bajas, causando una lenta descomposición de la materia orgánica. Existe una relación mutua entre agua y la materia orgánica: con mucha agua hay mucha materia orgánica (poca descomposición) y con mucha materia orgánica hay mucha agua (adsorción). Estos complejos a su vez retienen nutrientes dentro de su estructura, para que no puedan ser aprovechadas por la vegetación. Esto pasa específicamente con fósforo, así el suelo del páramo tiene mucha fertilidad, pero no es aprovechable para plantas (Hofstede *et al.*, 2003).

Las diferencias que existen entre el páramo de pajonal y de almohadillas, con los bosques de *Polylepis* y alto-andino, son debidas al diferente aporte de materia orgánica que reciben de las especies características de cada comunidad vegetal, cómo los restos leñosos, la cobertura del bosque y los restos de pajonales, de arbustos pequeños, de rosetones, etc.; creando microclimas diferentes. Así las diferentes características del clima y del suelo, inciden en la vida de las plantas, determinan la distribución de la vegetación a lo largo del eje altitudinal y, consecuentemente, influyen en la diversidad biológica de los páramos (León-Yáñez, 2003).

Las diferencias químicas existentes entre los páramos del primero y segundo grupo de la figura 1, son originadas por la ubicación de las localidades muestreadas, más que por los tipos de vegetación, esto puede ser por que el suelo tiene diferente material parental y a que poseen características climáticas diferentes. Las características de los suelos varían según los micro-ecosistemas generados en cada sitio; no existe diferencia por el tipo de vegetación, exceptuando las diferencias significativas entre los bosques y pajonales.

Algunos sitios de muestreo presentan evidencia de pastoreo y cultivo, generalmente en las tierras andinas se cultivan hasta los 3.800 msnm, actividad a veces reemplazada por la ganadería extensiva (Noni *et al.*, 1992). En varios páramos del país el daño sobre los suelos es muy extenso y profundo, la compactación por vacas y caballos, la pérdida de la cobertura vegetal por ovejas, las quemadas y otras formas de mal uso del suelo del páramo, junto con una gran fragilidad natural del ecosistema que incluye fuertes pendientes y vientos, logran que este de todas maneras haya perdido su capacidad hidrofílica (de captación y distribución de agua) y se vuelva hidrofóbico (que repele el agua), con lo que ya no se infiltra en la esponja y más bien baja sin control llevándose el suelo mismo hacia las tierras bajas, en un proceso rápido de erosión. El gran problema está en que el suelo que perdió su capacidad esponjosa simplemente ya no puede recuperarla: es una esponja de una sola vida (Podwojewski y Poulenard, 2000).

La pérdida de estas características hidrológicas especiales del páramo trae problemas muy graves para la población directa e indirectamente relacionada con él, pero este no es el único servicio ambiental de este ecosistema. El páramo también almacena mucho carbono en sus suelos y así ayuda, de manera pasiva pero importante, a paliar el efecto invernadero (Mena PS/F). Al dañarse los suelos del páramo no solo se daña el servicio hidrológico, sino que se emite mucho dióxido de carbono a la atmósfera, con lo que la concentración de gases de invernadero aumenta.

Para obtener el Carbono orgánico a partir de la materia orgánica se utilizó el factor de conversión Van Bemmelen = 1.724, ha sido incorporado en la mayoría de los países como valor estándar para la conversión de carbono orgánico a materia orgánica. Pero a su vez, tomando en consideración que el factor no es preciso, se ha hecho cada vez más habitual determinar el contenido de carbono orgánico y expresarlo como tal, en porcentaje en peso, sin convertirlo a materia orgánica. La determinación en el laboratorio se basa en la oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio, generalmente sin aplicación de calor externo (Artigas, 2004).

Propuesta de clasificación de los suelos del PNC

Los andosoles son suelos desarrollados a partir de cenizas volcánicas, son particularmente importantes en el Ecuador, según Sourdat y Zebrowski (1992), porque constituyen aproximadamente el 30% del territorio y por el interés agronómico que presentan. Estos presentan gran variedad debido a la diversidad de climas bajo los cuales se formaron. Su pedogenesis depende también de la naturaleza de la edad de los materiales de los que proceden.

El dendrograma presentado en la figura 1, obtenido en el programa Matlab 7.0, muestra 4 grupos diferenciados que se clasifican de acuerdo a sus características químicas con los taxones propuestos por la FAO, de manera que se puede sugerir una clasificación previa de estos suelos con las siguientes características:

Histic-Hídric-Andosol. Presentan ambas características tanto hídricas que se refiere a la humedad y hísticas por la cantidad de materia orgánica presente. Corresponde a las 3 muestras de pajonal de Zhiña, Rañas y Jubones; presentan características diferentes por estar geográficamente más distantes; la materia orgánica entre 30 y 40%, es más alta que la de los grupos 2 y 3, sin embargo se encuentra igual de alta que las muestras de los bosques de *Polylepis* y b. altoandinos. Son suelos cultivados, pastoreados y quemado en el caso de la muestra del río Jubones.

Perhídric-Andosols. Los suelos de este grupo poseen una retención de agua mayor al 100%, es decir, se encuentran inundadas la mayor parte del año. A este grupo pertenecen 11 muestras de pajonal de Soldados, Miguir, Toreadora, Totoracocha, Labrado, y a 1 muestra de páramo de almohadillas de Tres Cruces. El Nitrógeno total porcentual está entre 1 y 3%.

Histic-Andosols. Estos son superficiales, con poca profundidad, material orgánico pobremente aireado, y se encuentran saturados con agua por 30 días consecutivos o más. Corresponde a las 9 muestras de pajonal de la Toreadora, Miguir, Soldados, Labrado, Tres Cruces y Tinajillas, y 3 muestras del páramo de almohadillas de Soldados y Labrado; tienen el pH más bajo que el resto de los grupos con un promedio de 4.18.

Hídric-Andosols. Esta es una característica exclusiva de los andosoles, que tienen dentro de 100 cm de la superficie del suelo, una o más capas con un espesor combinado de 35 cm o más, y una retención de agua de 100 por ciento o más. Corresponde a las muestras del bosque de *Polylepis* y al de bosque alto-andino, presentan características similares en su pH todos están entre 5 y 6. Presentan mayor tasa de intercambio catiónico por grupo en comparación con los otros grupos tiene una distribución más homogénea entre 67 y 76 meq/100g, al igual que el pH.

Conclusiones

El análisis clúster indica la existencia de cuatro grupos de suelos con composición química similar, cualitativamente a cada grupo se puede asignar un tipo de cobertura vegetal.

El método KNN indica que existe relación entre la composición química de los suelos estudiados y su cobertura vegetal.

Existen similitudes entre las muestras de pajonal y las de almohadillas. Pero existen diferencias entre estas y las muestras de los bosques de *Polylepis* y altoandino, debido a las diferencias en el aporte de materia orgánica, y a la velocidad de mineralización de la M. O.

La gran cantidad de materia orgánica no descompuesta completamente, presente en suelos de los páramos, interfiere con los análisis físicos químicos, se deberían aplicar métodos específicos para este tipo de suelos, por ejemplo, para analizar la materia orgánica y el carbono orgánico, es preferible utilizar el método por oxidación de la M.O con Dicromato de Potasio ($K_2Cr_2O_6$) en lugar de la calcinación a 400° C.

De igual manera, la textura se utiliza ampliamente como índice para predecir las propiedades físicas de los suelos y su productividad, en los suelos provenientes de ceniza volcánica la determinación de la textura no es exacta, ni recomendable, porque por la dispersión completa de sus partículas minerales es virtualmente imposible, sobre todo con análisis mecánicos, debido a los materiales no cristalinos y a los restos de materia orgánica no descompuesta que forman agregados estables fuertemente resistentes a la dispersión.

La caracterización de los suelos requiere de la medición de parámetros como la humedad, inclinación, color, la descripción del perfil completo del suelo para su correcta y precisa clasificación, por lo que en este estudio se sugiere una preclasificación de los mismos, para que en posteriores estudios, tomar en cuenta los análisis nombrados anteriormente.

Referencias

Artigas, D.

2004. *Composición del suelo*. Montevideo: Universidad de la República.

Dercon, G. *et al.*

1998 *Zonificación agroecológica del Austro ecuatoriano*. Cuenca: PROMAS.

ETAPA

2003 Plan de Manejo del Parque Nacional Cajas

2009 Enciclopedia del PNC. Recuperado el 27 de febrero de 2012. http://www.etapa.net.ec/PNC/pnc_bibdes.aspx

Figueras, M.

2001 "Análisis de conglomerados o clúster". Recuperado el 5 de agosto de 2012: <http://www.5campus.org/leccion/cluster>

Harden, C. y Borrero, A. L.

2005 *Geomorfología del Parque Nacional Cajas*. Cuenca: Universidad de Cuenca.

Hofstede, R., Segarra, P. y Mena P (eds.)

2003 "Los páramos del mundo. Proyecto atlas mundial de los páramos. Contexto histórico. Los páramos dentro del contexto ecuatoriano". Quito: Global Peatland Initiative/NC-UICN/Eco-Ciencia.

Huttel, Ch.

1997 *Los paisajes naturales del Ecuador, las grandes regiones climáticas y sus formaciones vegetales*. ORSTOM.

IUSS

2007 "Base Referencial Mundial del Recurso Suelo". Primera actualización 2007. Informes sobre recursos mundiales de suelos. N° 103. FAO: Roma. Recuperado el 5 de abril de 2011. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/a0541s/a0541s00.pdf>

Kessler, M.

1996. "Bosques de *Polylepis*. Botánica Económica de los Andes Centrales". M. Moraes, B. Øllgaard, L. P. Kvist, F. Borchsenius y H. Balslev (eds.). Universidad Mayor de San Andrés, La Paz: 110-120.

- Leardi, R., Boggia, R., Terrile, M. y Genetic
1992 "Algorithms as a Strategy for Feature Selection". *J. of Chemom.*, 6: 267-281.
- León-Yáñez, S.
2003. *Páramos ecuatorianos. En la biodiversidad de los páramos*. Quito: GTP/Abya-Yala.
- Mena, P.
s.f. "El estado de salud de los páramos en el Ecuador: alternativas interesantes y pronósticos complicados". Proyecto Páramo Andino y EcoCiencia.
- Mena, P. y Medina, G.
1999 *Los páramos en el Ecuador*. Proyecto Páramo.
- Noni, G., Viennot, M. y Trujillo, G.
1992 *La erosión agrícola de los suelos en el Ecuador*. Quito: Centro ecuatoriano de investigación geográfica.
- Ortiz, B.
1990 *Edafología*. México: Universidad autónoma Chapingo.
- Podwojewski, P. y Poulenard, J.
2000 "Los suelos de los páramos del Ecuador". *Los Suelos del Páramo*. Serie Páramo, 5: 5-26. Quito: GTP/AbyaYala.
- Primo, E. y Carrasco, D.
1981 "Química agrícola I. Suelos y fertilizantes". España: Alhambra.
- Serrano, F. y Minga, D.
s.f. "La diversidad vegetal del Parque Nacional Cajas. Diagnóstico para la elaboración del plan de manejo integral del PNC". Reporte de consultoría para CEMAPRIMES.
- Sierra, R.
1999 "Propuesta Preliminar de un Sistema de Clasificación de Vegetación para el Ecuador Continental". Quito: INEFAN, GEF-BIRF y EcoCiencia.
- Sourdat, M. y Zebrowski, C.
1992 *Los paisajes naturales del Ecuador. Los factores de la pedogénesis y los suelos en Ecuador*. Ecuador: ORSTOM/Centro Ecuatoriano de Investigación Geográfica.

Figura 6
Mapa de áreas representativas de formaciones vegetales del PNC

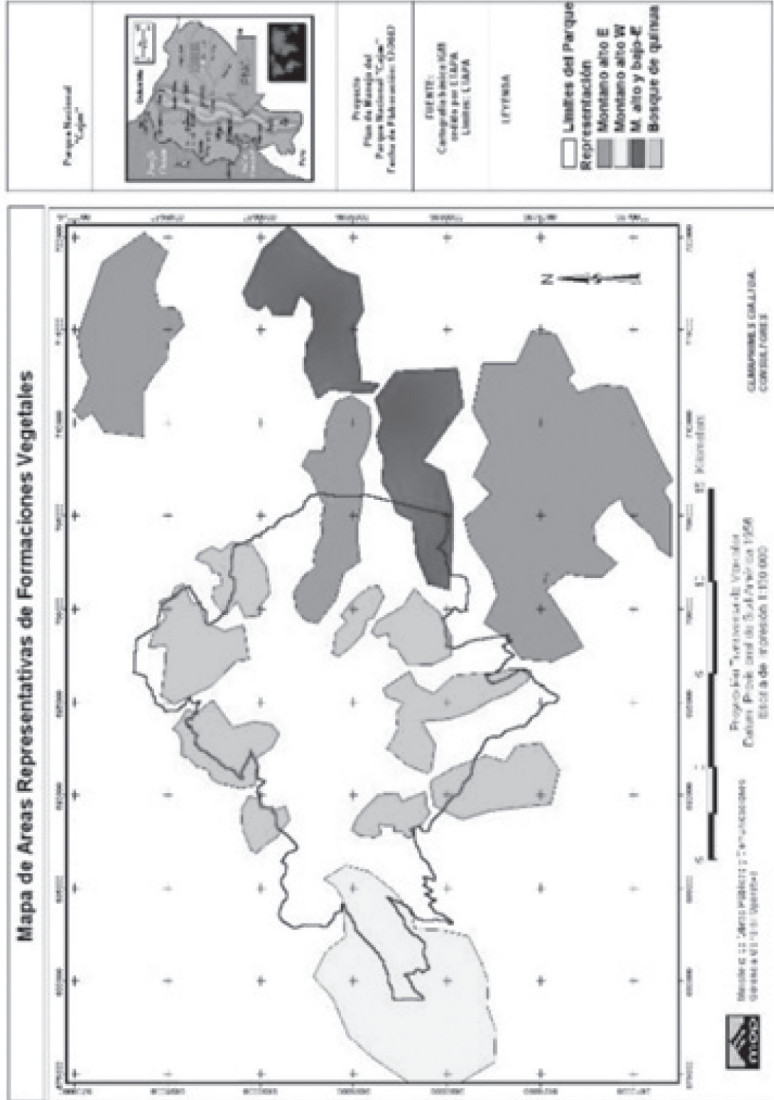


Tabla 3
Tabla de resultados de los análisis químicos realizados por los métodos tradicionales

serie lab muestra	C. vegetal	pH	Conductividad us/cm	Calcio lt/0.08 ppm	Potasio lt/0.07 ppm	Sodio lt/0.1 ppm	Magnesio lt/0.08 ppm	Hierro lt/0.03 ppm	Fósforo lt/0.01 ppm	uración de ha %	C.L.C meq/100g	M. Orgánica %	Carbono %	N. Total %	C/N
m1	almohadillas	3.99	404	618.500	130.981	41.336	195.022	25.463	429.092	13.564	38.372	46.428	26.993	1.508	17.903
m2	almohadillas	3.88	448	361.364	240.874	36.352	83.528	5.357	94.683	5.080	64.259	42.220	24.546	0.980	25.035
m3	pañoal	6.07	706	1132.437	678.331	1.225	296.195	10.621	578.461	5.411	181.596	51.760	30.093	1.633	18.426
m4	pañoal	3.68	242	544.545	239.022	16.534	138.677	8.951	109.692	6.979	65.067	39.759	23.139	1.566	14.773
m5	pañoal	4.19	141	663.763	189.416	0.000	105.841	16.801	16.868	8.867	52.631	45.291	26.332	1.459	18.050
m6	pañoal	3.93	317	594.497	283.423	13.173	93.774	19.809	111.081	5.925	76.289	46.239	26.883	1.256	21.406
m7	pañoal	4.28	55	442.911	129.538	0.000	88.544	17.113	61.679	9.064	36.072	40.707	27.667	1.656	14.293
m8	pañoal	4.78	250	2337.492	114.657	18.721	186.024	0.000	141.947	33.409	43.600	48.008	27.911	0.540	51.721
m9	almohadillas	5.46	87	1757.069	88.963	19.028	85.887	9.563	1.798	30.281	32.312	43.404	25.235	1.485	16.992
m10	almohadillas	4.54	88	205.532	36.586	4.945	54.199	3.846	52.514	14.650	10.851	41.664	24.223	1.382	17.523
m11	pañoal	4.51	72	386.657	26.179	60.877	103.071	15.152	164.055	31.923	9.738	42.044	24.444	0.838	29.157
m12	pañoal	4.49	117	954.547	134.127	28.639	179.791	7.075	367.515	16.496	40.673	46.422	26.990	2.826	9.550
m13	pañoal	4.74	64	376.714	40.389	10.842	76.368	4.167	70.176	20.630	12.886	56.821	33.036	1.249	26.458
m14	almohadillas	4.89	67	624.266	154.989	19.744	115.390	19.653	39.924	10.381	43.793	45.833	26.647	2.747	9.701
m15	almohadillas	5.27	746	4202.251	185.249	43.402	478.310	42.512	458.869	35.275	72.475	36.788	21.389	3.755	5.696
m16	pañoal	3.83	323	583.405	110.388	20.185	73.986	20.560	95.791	12.216	31.842	45.548	26.365	1.388	18.991
m17	pañoal	4.84	697	549.227	130.763	18.064	119.354	19.134	2.889	11.102	37.247	44.375	25.759	3.106	8.307
m18	pañoal	4.2	189	575.356	83.768	19.543	85.944	16.368	26.234	15.453	25.089	48.886	28.422	2.821	10.076
m19	pañoal	4.96	50	1360.204	66.500	47.606	60.273	47.170	25.560	31.267	24.500	51.028	30.016	3.027	9.917
m20	pañoal	4.36	126	584.750	39.418	20.372	55.063	21.185	121.555	26.290	13.542	54.534	31.706	3.259	9.729
m21	pañoal	5.54	133	1029.798	218.020	18.357	233.953	17.331	304.904	12.240	62.908	45.972	26.728	2.863	9.336
m22	pañoal	4.73	91	543.332	51.927	17.665	71.090	17.706	168.748	21.048	16.655	44.253	25.729	2.821	9.121
m23	pañoal	3.82	487	610.056	15.833	19.698	63.731	19.698	418.990	47.957	7.704	41.158	23.929	2.494	9.596
m24	pañoal	4.58	84	420.518	69.794	27.184	837.020	33.862	46.001	34.426	26.952	36.655	21.311	0.271	78.596
m25	pañoal	4.64	63	466.572	100.140	25.818	1109.793	42.500	26.081	31.799	37.181	33.555	19.508	0.145	134.620
m26	pañoal	4.44	109	313.555	87.695	39.138	834.790	52.702	51.346	28.437	31.031	38.710	22.506	0.462	48.682
m27	pañoal	4.39	98	198.937	97.099	29.465	743.299	19.706	21.247	24.257	30.791	36.561	21.256	1.353	15.709
m28	B. Polykaps	5.16	118	2968.766	124.264	390.387	1084.903	<ld	304.934	45.006	57.218	40.911	23.785	0.318	74.788
m29	B. altoandino	5.92	485	2921.835	184.831	1048.233	989.569	1.704	96.971	37.220	74.532	29.244	17.003	2.082	8.168
m30	B. altoandino	5.77	399	2768.054	184.831	474.145	575.633	5.263	15.833	31.054	67.884	50.540	29.384	0.529	89.351
m31	B. Polykaps	5.84	285	2968.766	184.831	356.603	1500.703	13.509	131.755	38.402	75.982	39.560	22.884	2.565	8.972

Tabla 4
Tabla de los datos de campo obtenidos durante el muestreo

Lugar	Fecha	C. Vegetal	Altura m s.n.m.	Descripción Vegetación	Observaciones	Uso del Suelo	Posición GPS UTM E N
soldados-chaucha	09/1021/5	almoahadillas	3838	Tapiz de plantago	plano o ligeramente abombado	no pastoreado	17692996 9678474
soldados-chaucha	09/1021/3	almoahadillas	3818	Tapiz de Plantago, almoahadillado	sobre replano, con estagnación, muy húmedo	no pastoreado	176936027 9678416
soldados-chaucha	09/1021/2	pañonal	3818	Calamagrostis intermedia, Tapiz d no encharcado, bien drenado	denso, contacto de tapiz húmedo, con Cortaderia de humedal	pastoreado (heces de con	123855017 9678435
toreadora	09/1012/2	pañonal	3716	Calamagrostis intermedia, macollet	muy abierto, pobre, en ladera,	pastoreado (heces)	17718242 9643317
soldados-chaucha	09/1021/8	pañonal	3950	Calamagrostis intermedia sp leñosas, arbustivo	probable restos incendio, sobre suelo liviano Suelo desnudo: 5%, 10 % pendiente	poco intervenido	17690522 9678942
labrado	09/1228/4	pañonal	3485	calamagrostis intermedia	pañonal cerrado, rodeado por arbustos y rocas 5%, pendiente S		712488 9689780
labrado	09/1228/2	pañonal	3435	calamagrostis intermedia	humedal		713339 9689318
labrado	09/1228/3	almoahadillas	3431	catula mexicana, cyprus sp.			713063 9689418
labrado	09/1228/1	pañonal	3449	Calamagrostis intermedia, paspal	medianamente intervenido, pisadas y heces de borregos,		713947 9689206
tres cruces	09/1001/1	pañonal	4154	Calamagrostis intermedia (de 40- resto tapiz herbáceo, prostrado,		no pastoreado	695877 9693203
soldados	09/1004/4	pañonal	3500	Calamagrostis intermedia, algunos	bastante denso, atravesado por caminos de ganado.	pastoreado	123855017 9669286
soldados	09/1004/1	pañonal	3250	Calamagrostis intermedia, puyas	bien desarrollado, baja cobertura. Parte alta ladera, herbáceas acaul	signos de fuego, Sin hece	123855017 9678435
soldados	09/1004/2	pañonal	3250	Calamagrostis intermedia	bien desarrollado, con alta cobertura. Parte baja de ladera		60160583 9677750
tres cruces	09/1001/4	almoahadillas	4125	Plantago rigida	Afloramiento rocoso, horizonte inferior limoso.	no pastoreado	696326 96092886
tres cruces	09/1001/3	pañonal	4162	Calamagrostis intermedia	denso, sin leñosas. Suelo orgánico.	no pastoreado	695857 968338
miguir	09/1009/2	pañonal	3750	Calamagrostis intermedia, grande	semiaabierto, claros con abundantes musgos.	pastoreado (heces)	123855017 9678435
toreadora	09/1012/1	pañonal	3698	Calamagrostis intermedia, de gran	muy denso. Bajo la paja, gran cantidad de hepáticas y musgos	pastoreado. Heces de con	54315955 19387205
toreadora	09/1005/2	pañonal	3820	Calamagrostis intermedia, de gran	Suelo profundo, saturado	no pastoreado	17699814 9682283
toreadora	09/1005/1	pañonal	3756	Calamagrostis intermedia, Gyroxy	pocos arbustos, abierto, pie de ladera.	Pastoreado	63141698 20598202
labrado	09/1228/1	pañonal	3541				55525233 21971817
toreadora	09/1009/3	pañonal	3900	Calamagrostis intermedia	muy denso, con pocas leñosas ladera de pequeño cerro.	no pastoreado	17715064 9648368
toreadora	09/1008/1	pañonal	3820	Calamagrostis intermedia	denso, bien desarrollado, pocas leñosas. Ligera depresión al pie de la	no pastoreado	17699814 9682283
cuenca rio jubones	100627/1	pañonal	3205	calamagrostis intermedia,	cultivado disperso anteriormente	pastoreado y quemado	17715801 9641288
entre zhiifa y rafiias	100627/2	pañonal	3198	calamagrostis intermedia, paspatu	cultivo disperso	pastoreado	17715739 9641288
zhiifa	100627/3	pañonal	3314	calamagrostis intermedia	cultivo de papas, cerca de pino	cultivado	17718242 9643317
lineillas	100627/4	pañonal	3437	calamagrostis intermedia, paspalin	pañonal bajo ralo con escasos arbustos	pastoreado, quemado	17717903 9645002
toreadora	100829/1	bosque Polytepis	3885	Polytepis sp.	Polytepis meduro, raíces gruesas, abundante hojarasca, pie de lader	no pastoreado	17713500 9652636
llawtucu (cerca laguna)	100829/2	bosque altoandino	3160	abundante musgo, epilittas, helech	abundantes hojarasca y raíces, húmedo	no pastoreado	17716237 9644706
llawtucu (cerca laguna)	100829/3	bosque altoandino	3259	abundante musgo, epilittas, helech	abundante hojarasca y raíces, pie de ladera, húmedo	no pastoreado	17716324 9645390
toreadora	100829/4	b polytepis, joven	3900	Polytepis sp.	Polytepis joven, raíces gruesas, abundante hojarasca, en ladera, hum	no pastoreado	17714195 9650739

Agradecimientos

Los autores agradecen a los directores del PNC, de manera especial al PhD. Alfredo Martínez por el apoyo brindado a la presente investigación. Al profesor Franco Previtali, por los conocimientos brindados y su desinteresada colaboración en el desarrollo de esta investigación.