

AGRÁRIA

Revista Brasileira de Ciências Agrárias

ISSN (on line) 1981-0997

v.7, n.3, p.456-464, jul.-set., 2012

Recife, PE, UFRPE. www.agraria.ufrpe.br

DOI:10.5039/agraria.v7i3a1736

Protocolo 1736 - 16/08/2011 • Aprovado em 15/02/2012

Luz C. García Cruzatty^{1,2,3}

Juan E. Schlatter Vollmann¹

Caracterización de suelos a lo largo de un gradiente altitudinal en Ecuador

RESUMEN

En Ecuador la calidad y cantidad de la información sobre suelos es puntual, requiriéndose información más amplia que sirva para la toma de decisiones en los procesos de producción forestal y agrícola. Este trabajo analiza las características de los suelos de origen volcánico, desde las tierras altas de la Sierra hasta las tierras bajas tropicales de la región Litoral, a lo largo de un gradiente altitudinal, con el fin de contribuir a una síntesis que permita identificar el conocimiento disponible y la necesidad de estudios para completar la información. Fueron seleccionados 7 suelos, distribuidos a lo ancho de Ecuador, de acuerdo con la variación climática, manteniéndose en general el origen del material. El clima es el factor más importante que influye en el desarrollo del suelo, relacionado a la altitud, aunque también la distancia a los volcanes constituye un factor importante, en especial en los cambios texturales. La oferta nutritiva está ligada a las variaciones altitudinales y a la textura del suelo. Los suelos de la Región Sierra son más arenosos, menos evolucionados, presentan mayores reservas minerales pero son más ácidos que los del Litoral, debido a que presentan mayor cantidad de materia orgánica acumulada, producto del clima frío, y una consecuente menor suma de bases y mayor nivel de aluminio de intercambio.

Palabras-clave: suelos volcánicos, Cordillera de los Andes, textura, clima

Soil characterization along an altitudinal gradient in Ecuador

ABSTRACT

In Ecuador, the quality and quantity of information of both climate and soils is very general, so greater precision for decision making processes is required in forest and agricultural production. This review examines the characteristics of volcanic soils from Ecuador, along an altitudinal gradient. Soils were analyzed in seven locations, including sites in the Coastal and Sierra regions. These sites were selected trying to include places with contrasting weather conditions but maintaining similar soil parent material. It was concluded that the climate is the most important factor that influences soil development, which is related to altitude, although the distance from the volcanoes is an important factor, especially in textural changes. The nutrient supply is linked to changes in altitude and soil texture. The soils of the Sierra region are younger, richer in sand and silt, and accumulate more organic matter due to the colder climate, but are also more acidic, poorer in exchangeable bases and higher in aluminum.

Key words: volcanic soils, elevation, texture, climate

1 Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Programa Doctorado en Ciencias Forestales, Casilla 567, Valdivia, Chile.
Teléfono: (63) 221058. Fax: (63) 221227.
E-mail: luz.garcia@postgrado.uach.cl;
jschlatt@uach.cl

2 Becaria del Programa MECESUP

3 Becaria del SENESCYT

INTRODUCCIÓN

El clima del país Ecuador, presenta una gran variedad con cambios considerables a distancias cortas, y esta variación responde a una diversidad de factores, tales como: el gradiente altitudinal, la dirección de las cadenas montañosas, la distancia al Océano Pacífico, las corrientes marinas y los vientos (Pourrut et al., 1995). La interacción de estos factores resulta en una amplia diversidad ecológica de este país; pero sin duda el factor más importante para variación del clima en el Ecuador es la altitud del territorio, definida por la cordillera de los Andes (Pourrut et al., 1995, Zehetner et al., 2003). Si se considera que partiendo del nivel del mar la temperatura desciende aproximadamente un grado por cada 200 metros de altura, el clima tiene una fluctuación de aproximadamente 31 grados, ya que el nivel de sus tierras va desde 0 metros hasta 6310 metros sobre el nivel del mar (máxima altura en las cumbres del Chimborazo) (Pourrut et al., 1995).

Los suelos de este país tienen en consecuencia características muy variables, como efecto del cambio climático, a pesar que el material de origen, predominantemente volcánico, es relativamente homogéneo (Noni et al., 1985). Menos importante para la diferenciación del suelo es la edad de los materiales y la distancia a los volcanes (Beinroth et al., 1985).

Los suelos volcánicos, por su productividad, representan un recurso importante para la agricultura en diferentes regiones del mundo. Estos suelos cubren alrededor del 0,84% de la superficie terrestre mundial (Takahashi & Shoji, 2002). Las grandes áreas de estos suelos se encuentran en Chile, Perú, Ecuador, Colombia, América Central, Estados Unidos, Japón, Kamchatka, y Nueva Zelanda (Neall, 2006). El 31% del territorio ecuatoriano tiene suelos de origen volcánico, formados a partir de materiales piroclásticos, y asociados a la actividad de varios volcanes, especialmente los siguientes: Cotopaxi, Tungurahua, Sangay y Reventador (Colmet-Daage et al., 1967; Winckfl, 1982).

A lo largo de algunas regiones del Ecuador se han estudiado las propiedades y procesos pedogenéticos de los suelos (Buytaert et al., 2006; Schawe et al., 2006; Zehetner et al., 2003), pero estos estudios fueron realizados de manera puntual, haciendo falta un documento que contenga los datos de los principales suelos que ocurren en Ecuador, lo que debiera entenderse como un subsidio para estudiar y planificar la utilización de la tierra.

El desarrollo de los cultivos depende principalmente de la calidad del sitio, es decir de las condiciones de clima y suelo, para lograr una alta producción. La disponibilidad de información tanto del clima como de los suelos constituye una condición indispensable para las decisiones de uso del suelo y de manejo de bosques y cultivos. En Ecuador la calidad y cantidad de la información en este aspecto es local, requiriendo e información más amplia acerca de los suelos que sirva de fundamento para la toma de decisiones en los procesos de producción forestal y agrícola. Este trabajo analiza las características de los suelos de origen volcánico, desde las tierras altas de la Sierra hasta las tierras bajas tropicales de la región Litoral, a lo largo de un gradiente altitudinal, con el fin de contribuir a una síntesis que permita

identificar el conocimiento disponible y la necesidad de estudios para completar la información.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio

El área analizada corresponde a una gradiente altitudinal (3840 – 80 msnm) (Figuras 1 y 2) desde la Sierra del Ecuador a la Costa. Los suelos de la Sierra analizados se encuentran en la Cordillera de los Andes, en la provincia de Pichincha, y van desde los 3840 a los 1500 msnm. Según el sistema de clasificación de climas de Pourrut et al. (1995) esta área corresponde al clima ecuatorial de alta montaña, cuya principal característica es la gran variación diaria de la temperatura en comparación a una baja variación estacional; la temperatura media depende de la altitud (Figura 2).

Los suelos evaluados en la región costera están ubicados desde los 280 a los 80 msnm, en las provincias de Esmeraldas y Los Ríos. De acuerdo a Pourrut et al. (1995) esta región



Figura 1. Localización de sitios evaluados y principales ciudades, Ecuador

Figure 1. Location of the evaluated sites and major cities, Ecuador

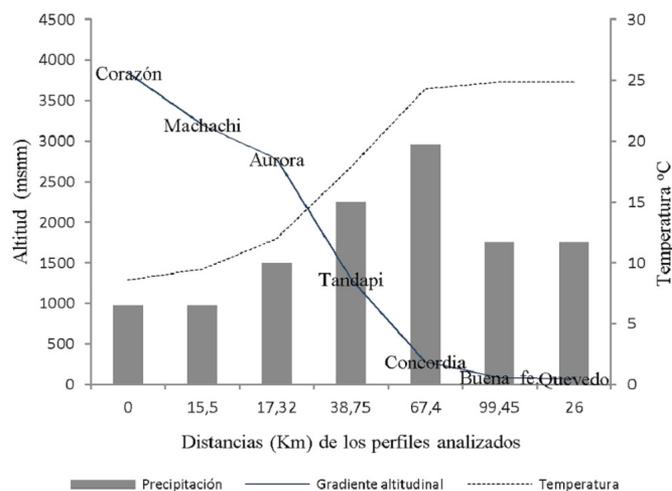


Figura 2. Precipitación y temperatura en el gradiente altitudinal (3840 - 80 msnm), Ecuador

Figure 2. Precipitation and temperature in the altitudinal gradient (3840-80 m asl), Ecuador

Tabla 1. Condiciones ambientales de las diferentes zonas de estudio según el Instituto de Hidrología y Meteorología del Ecuador (INAMHI, 2010)**Table 1.** Environmental conditions in different areas of study according to the Institute of Hydrology and Meteorology of Ecuador (INAMHI, 2010)

Lugar	Corazón	Machachi	La Aurora	Tandapi	Concordia	Buena Fe	Quevedo
Coordenadas	0°32'10"S/ 78°38'40"W	0°31'00" S/ 78°37'10"W	0°28'00" S/ 78°42'40"W	0° 25'00" S/ 79°02'20"W	00°04'55"N/ 79°23'22"W	0°50'00" S/ 79°28'50"W	1°02'30" S/ 79°28'21"W
Humedad relativa* (%)	76	76	78	88	87	82	82
Precipitación media anual* (mm)	976,5	976,5	1495,7	2253,5	2958,3	1759,4	1759,4
Materiales parentales	Múltiple ceniza y depósito de pumicita	Ceniza y depósitos de pumicita a la interperie	Múltiple ceniza fina y gruesa y depósitos de pumicita	Ceniza y depósitos de piedra pómez	Varios depósitos de cenizas	Múltiples depósitos de cenizas recientes sobre un depósito de cenizas muy antiguo	Múltiples depósitos de cenizas recientes sobre un depósito de cenizas muy antiguo
Vegetación característica	Stypaishu (pasto del páramo)	Cushionplant	Gramíneas	Gramíneas, bosques mixtos	Árboles tropicales	Cacao, árboles tropicales	Cacao, café, Laurel, fernansánchez, y otros árboles tropicales

* Promedios de los últimos 10 años (2000-2009), Instituto de Meteorología e Hidrología del Ecuador (<http://www.inamhi.gov.ec>), 1 No hay datos de precipitación y Humedad Relativa de El Corazón y Buena Fe, por lo que se ha tomado como referencia la estación meteorológica más cercana: Machachi y Quevedo, respectivamente

tiene un clima tropical megatérmico húmedo a muy húmedo; en donde las precipitaciones van de 1000 a 3000 mm al año (Figura 2 y Tabla 1).

Geomorfología y geología del área de estudio

La característica geomorfológica más importante del Ecuador es la presencia, en su parte central, de la Cordillera de los Andes que atraviesa el país de norte a sur, originando la división fisiográfica del país, quedando al oeste la región Litoral en donde se yuxtaponen colinas y grandes llanuras, y al este los relieves bastante monótonos de la cuenca amazónica (Winckfl, 1982).

A continuación se detallan las características geomorfológicas y geológicas generales de las regiones Costa y Sierra del Ecuador, enfatizando las áreas que incluyen los suelos evaluados en el presente estudio.

La región Litoral o Costa

La región Litoral se extiende al oeste de la Cordillera de los Andes. Su relieve presenta dos características importantes: el Golfo de Guayaquil y la cordillera Chongón-Colonche que recorre 95 km de la costa ecuatoriana en sentido este-oeste formado por un cinturón de cerros que se extienden desde el oeste de Guayaquil. La cordillera de la Costa presenta relieves bastante fuertes y macizos formados sobre el complejo volcánico Cretácico (basaltos, diabasas, andesitas, pyroxenitas). Además, en su constitución ha influido la erosión diferencial que ha excavado las rocas blandas: arcillas y limolitas, dejando las facies más resistentes: areniscas y conglomerados.

La región interandina o Sierra

La Cordillera de los Andes constituye una imponente barrera montañosa de 100 a 120 kilómetros de ancho, con vertientes externas muy abruptas de alrededor de 3500 a 4000 metros de desnivel y con dos direcciones predominantes: NE-SO al norte de Quito y al sur de Alausí y N-S en su parte central.

En la parte norte de la frontera con Colombia hasta Alausí el paisaje general está compuesto por dos cordilleras meridiana, paralelas con altitudes medias de 4000 a 4500 metros separadas por la depresión intra-andina cuyas altitudes varían de 1600 a 3000 metros (Sauer, 1971; Winckfl, 1982). La cordillera occidental está constituida por el complejo volcánico cretácico

y la cordillera oriental se desarrolla sobre facies metamórficas levantadas por la orogénesis andina. La primera pertenece a una serie calco-alcalina-andesita-dacita, mientras que en la Cordillera Oriental corresponde a la serie de andesita-dacita-riodacita (Hörmann & Pichler, 1982; Stern, 2004).

Estas cordilleras están coronadas por dos filas paralelas de grandes volcanes que han emitido enormes cantidades de piroclastos, coladas y lahares, andesíticos y dacíticos que han cubierto toda la parte norte de la Sierra. También la cobertura muy extensa de lapillis y cenizas en la parte oriental de la región costera y en el piedemonte amazónico está correlacionada con esta fase. En la parte central de la Sierra, entre las cordilleras occidental y central, aparecen altiplanos formados por numerosos valles, constituye una serie de cuencas deprimidas intra-andinas, que se trata de graben o fosas de origen tectónico rellenas con una alternancia de sedimentos fluvio-lacustres, localmente fluvio-glaciares cuaternarios (areniscas, arenas, conglomerados, arcillas) y de origen volcánico (coladas, lahares, proyecciones, cineritas, cenizas cementadas o cangahua) (Winckfl, 1982).

Toma de datos

Los datos analizados en este documento fueron tomados de archivos del "Proceedings of the Sixth International Soil Classification Workshop, Chile and Ecuador" (Beinhort et al., 1985), y comparados con otros que se recopilaron para complementar los trabajos anteriores. Fueron analizados los suelos de siete localidades a lo largo del gradiente de elevación entre 3840 y 80 msnm. Los sitios fueron seleccionados tratando de incluir localidades con condiciones climáticas contrastantes pero manteniendo constante el origen del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características granulométricas del suelo

La Tabla 2 presenta el contenido de arcilla, limo y arena de los suelos en el gradiente altitudinal, entre los 3840 y los 80 msnm, que corresponden a los sitios ubicados cerca del volcán Corazón y la ciudad de Quevedo, respectivamente. Se observa que a medida que disminuye la altitud aumenta el contenido de limo y arcilla, lo que revela que por la lejanía a los volcanes, la ceniza presente en estos lugares consiste en los fragmentos más

Tabla 2. Características granulométricas y morfológicas de los suelos en el gradiente altitudinal (3840-30 msnm), Ecuador**Table 2.** Granulometric and morphological characteristics of soils in the altitudinal gradient (3840-30 m), Ecuador

Lugar	Profundidad (cm)	Horizonte	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Textura	Color (1)	Estructura (2)	Densidad (g cm ⁻³)
Corazón 3840 msnm	0-26	A1	2,3	31,7	66,0	Franco arenoso	10YR2/1	wB S A	1,03
	26-63	A2	1,7	35,5	62,8	Franco arenoso	10YR2/1	wB S A	1,11
	63-92	A3	1,1	28,6	70,3	Franco arenoso	N2/0	wB S A	0,93
	92-134	2C	0,2	4,4	95,4	Arena gruesa, rica en pumicita (45%)	10YR 5/4	S S	
	134-184	3AB	2,0	49,5	48,5	Franco limoso	10YR 2/1	wB A	1,15
Machachi 3200 msnm	0-21	AP	4,9	35,4	59,7	Franco arenoso fino	10YR 2/1	B S A	
	21-47	A1	5,0	34,3	60,7	Franco arenoso fino	10YR 2/2	wB S A	1,25
	47-75	A2	2,5	26,1	71,4	Franco arenoso pedregoso	N 2/2	wB S A	1,11
	75-84	2C1	0,8	3,7	95,5	Arena gruesa rica en pumicita (45%)	10YR 7/4	S S	
	84-115	3AB1	6,1	42,3	51,6	Franco arenoso fino	10YR 2/1	wB S A	1,29
La Aurora 2780 msnm	0-24	A1	2,1	39,1	58,8	Franco	10YR 2/2	wB S A	1,08
	24-45	A2	1,8	27,1	71,1	Franco arenoso	10YR 2/2	wB S A	1,07
	45-63	2BW	0,6	3,0	96,4	Arena gruesa rica en pumicita	10YR 4/3	S S	
	63-83	2C1	0,9	1,7	97,4	Arena gruesa rica en pumicita /30%	10YR 2,5	S S	
	83-150	2C2	0,9	1,3	97,8	Arena gruesa rica en pumicita (50%)	10 YR 7/2	S S	
Tandapi 1500	0-25	A1	3,9	46,5	49,6	Franco	10YR 2/1	B S A	0,94
	25-57	A2	4,6	47,5	47,9	Franco	10YR 2/1	wB S A	1,07
	57-84	A3	3,0	34,4	62,6	Franco arenoso	N 2/0	wB S A	1,06
	84-120	2C1	1,5	3,0	95,5	Arena gruesa rica en pumicita (25%)	10 YR 4/3	S S	
	120-133	3AB1	2,7	33,6	63,7	Franco arenoso	10 YR 3/2	wB A	1,16
La Concordia 280 msnm	0-7	A	4,0	56,6	39,4	Franco	10YR 3/3 y 10YR 2/1	wB S A	0,94
	7-27	BW1	2,0	53,0	45,0	Franco limoso	10 YR 4/3	wB S A	0,84
	27-54	BW2	1,7	42,5	55,8	Franco limoso	10 YR 4/3	wB A	0,95
	54-79	2AB	1,2	35,6	63,2	Franco	10 YR 3/2 y 10YR 4/4	wB A	0,95
	79-100	2BWB	1,1	41,7	57,2	Franco	10 YR 4/3 y 10 YR 3/2	wB A	0,97
Buena Fe 120 msnm	0-10	A1	7,0	53,5	39,5	Franco	10YR 2/2	B S A	1,02
	10-52	BW	3,3	40,1	56,6	Franco	7,5 YR 3/2	B S A	0,83
	52-83	2AB	3,4	48,0	48,6	Franco	10YR 2/2	B A	0,87
	83-102	3BTB1	13,0	51,8	35,2	Franco limoso	10 YR 3/2	B S A	0,94
	102-130	3BTB2	27,1	40,2	32,7	Franco arcilloso	7,5 YR 3/2	B S A a P M	1,51
Quevedo 80 msnm	0-30	A1	10,0	59,5	30,5	Franco	10YR 2/1	B S A	0,94
	30-55	BW	13,1	56,2	30,7	Franco limoso	7,5 RY 3/2	B S A	1,27
	55-77	2BTB1	36,5	43,5	20,0	Franco arcilloso	10YR 2/2	B S A a P M	1,46
	77-107	2BTB2	70,0	19,7	10,3	Arcilla	10YR 2/2	P M	1,42
	107-165	2BTB3	84,8	11,8	3,4	Arcilla	7,5 RY 3/4	P M	1,37

(1) Munsell

(2) Bloque sub angulares (BSA), Bloque sub angulares débiles (wBSA), Suelo suelto (SS), Bloque angular (BA), Prismas moderados (PM)

pequeños transportados por el viento y por los ríos. Schawe et al. (2006) también encontró la misma tendencia en un estudio realizado a lo largo de una gradiente climática en Bolivia.

En los suelos analizados en la región interandina (3840-1500 msnm) existe un mayor contenido de arena en todas las localidades, a lo largo del perfil, mientras el contenido de limo oscila entre 31.7- 46.5 % en los tres primeros horizontes del suelo, con valores muy bajos en el cuarto horizonte (1.7-4.4%), rico en pumicita (25%), pero vuelve a subir en el quinto horizonte que es parte de otro estrato volcánico más antiguo, en las diferentes localidades evaluadas a excepción de la Aurora. Estos suelos presentan texturas franco arenosas en las tres primeras capas de suelo evaluadas, a excepción de Tandapi, que está más alejado y a menor elevación y presenta un suelo franco (Tabla 2).

Al contrario, los suelos de la región Litoral (280-80 msnm) presentan un mayor contenido de arcilla y limo, superiores al 60%, cuya tendencia es aumentar a medida que desciende la altitud. Los porcentajes de limo y arcilla en la Concordia tienden a disminuir con la profundidad del suelo, variando de 60,6 a 36,8% del primer al cuarto horizonte. Por el contrario, la cantidad de limo y arcilla aumenta con la profundidad en los suelos evaluados en Buena Fe (60,5-67,3 %) y Quevedo (69,5-96,3%), como efecto de un estrato de sedimentos volcánicos

más antiguos cubiertos por cenizas más recientes (Tabla 2). En estos sitios los suelos presentan textura franca (Concordia) y franca a franco arcillosa (Buena Fe y Quevedo) (Tabla 2).

Carbono y contenido de humedad

El carbono total del suelo permite estimar la materia orgánica en éste, así también inferir sobre las reservas nutritivas y ciertas características del régimen hídrico (Benavides, 2000). El humus que resulta de la descomposición de la materia orgánica aportada por la flora y fauna, contribuye a fortalecer la estabilidad de la estructura, y a aumentar la porosidad facilitando los intercambios de gases y agua (Brady & Weil, 2004; Geissert & Ibáñez, 2008). En los sitios evaluados, el contenido de la materia orgánica disminuye hacia altitudes menores (Figura 2). Esto concuerda con otros estudios realizados en el Ecuador y se debe a que con el aumento de cada 10 °C de temperatura, la tasa de descomposición se duplica (Schawe et al., 2006, Hart & Perry, 1999; Zehetner et al., 2003; Kane et al., 2005).

Buytaert et al. (2006) y Tonneijck et al. (2006) indicaron que, al disminuir la altitud, las diferencias climáticas, especialmente el aumento de temperatura y precipitación favorecen la descomposición de la materia orgánica. Esta relación es de gran importancia porque entre las reservas de

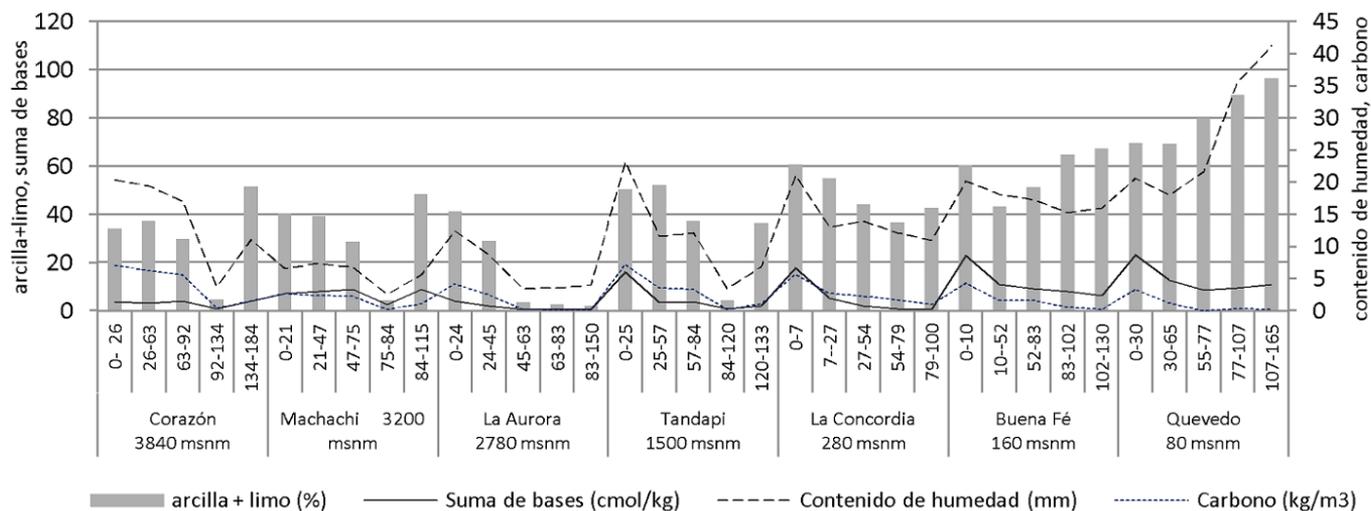


Figura 3. Relación entre contenido de limo y arcilla (%) con la suma de bases (cmol_c kg⁻¹), contenido de humedad (%), y carbono (kg m⁻³)

Figure 3. Relationship between silt and clay content (%) with the sum of bases (cmol_c kg⁻¹), moisture content (%), and carbon (kg m⁻³)

materia orgánica y la cantidad de agua que el suelo pueda retener existe una alta correlación. El análisis de los suelos considerados en este estudio, muestra una alta capacidad de retención de agua en los sitios a 3840 y 1500 msnm (20,4 y 23,2 mm en la primera capa), que con contenidos de limo y arcilla de 34 y 50,4% respectivamente, presentan la mayor cantidad de carbono encontrado en este estudio (7,15 y 7,24 kg m⁻³) (Figura 3).

Así podemos afirmar que existe una fuerte relación entre el clima y las reservas de carbono del suelo, lo que favorece la capacidad de retención de agua y la oferta nutritiva (Prado 2007; Olsson et al., 2009).

Sin embargo, en los suelos estudiados, la capacidad de agua aprovechable es mayor en las localidades a menor altura, lo cual está relacionado principalmente con el mayor contenido de limo y arcilla, además de condiciones topográficas más favorables (Figura 3).

La relación entre el contenido de humedad de un suelo y la textura se evidencia en la baja capacidad de agua aprovechable que se presenta en los horizontes que tienen un bajo contenido de limo y arcilla, y que está relacionado con una mayor porosidad gruesa en suelos de textura arenosa. Es el caso de los horizontes H4 analizados en El Corazón y Machachi que registran contenidos de agua de 3,8 y 2,6 mm, cuya proporción de limo + arcilla es de 4,6 y 4,5% respectivamente (Figura 3). Al contrario, el suelo que presenta el mayor contenido de limo y arcilla también presenta la mayor capacidad de agua aprovechable, que corresponde al perfil evaluado en Quevedo, cuyos valores oscilan de 20,6 mm en el horizonte H1 con un porcentaje de limo + arcilla de 69,5%, hasta los 41,2 mm en el horizonte H5 con un de limo + arcilla de 96,6%.

Estructura del suelo

La estructura al igual que la textura afecta profundamente muchos procesos en el suelo, incluido los movimientos de agua y aire, como resultado de las interacciones entre las arcillas y los grupos funcionales de la materia orgánica (Porta et al., 2003; Brady & Weil 2004). Los suelos evaluados en la Sierra presentan estructuras débiles de bloques sub angulares,

de diferentes tamaños, en los horizontes con textura franco arenosa y de grano suelto en los arenosos, lo que favorece la aireación, pero significa menos retención de agua. En el litoral los suelos son más evolucionados, especialmente en el subsuelo. Quevedo presenta un quinto horizonte, más arcilloso que incluso presenta estructura prismática, lo que en general desfavorece el drenaje y la aireación en el subsuelo (Tabla 2).

Los suelos volcánicos, en general, se caracterizan por una densidad aparente baja; en los sitios evaluados, en el primer horizonte fluctúa entre 0,94 y 1,08 g cm⁻³ (Figura 4A); la densidad es mayor en las zonas bajas del Litoral ecuatoriano, especialmente en los horizontes profundos, lo que estaría relacionado con el mayor contenido de arcilla y limo y una estructura más cerrada. Los valores de densidad bajos reflejan que los suelos son porosos, bien drenados y con buena penetración radicular, lo cual es una característica especial de los suelos volcánicos, entre otros debido a la presencia de materiales amorfos (Nanzzyo, 2002).

Según Thompson & Troch (2002) la mayor parte de las variaciones en la densidad son efecto del volumen total de poros. En general, los suelos con textura fina tienen mayor porosidad total y menor densidad que los suelos arenosos. Sin embargo, en este caso los sedimentos arenolimosos de los materiales volcánicos más jóvenes son todos de baja densidad y más porosos, pero los sedimentos más antiguos, más finos, son de estructura más cerrada y presentan más densidad. Además, señalan que la materia orgánica hace descender la densidad del suelo de dos maneras: por un lado, es mucho más ligera que la materia mineral y lo más importante, incrementa la estabilidad de los agregados del suelo. En este estudio la correlación carbono-densidad es negativa (R = 0,23), pues a mayor presencia de carbono, disminuye la densidad de los suelos (Figura 4b), corroborando lo anterior citado por Thompson & Troch (2002).

Nutrientes y Reacción pH

La disponibilidad de los macronutrientes (calcio, magnesio, sodio, potasio) fue variable entre los sitios evaluados, pero también entre horizontes superficiales y subsuperficiales.

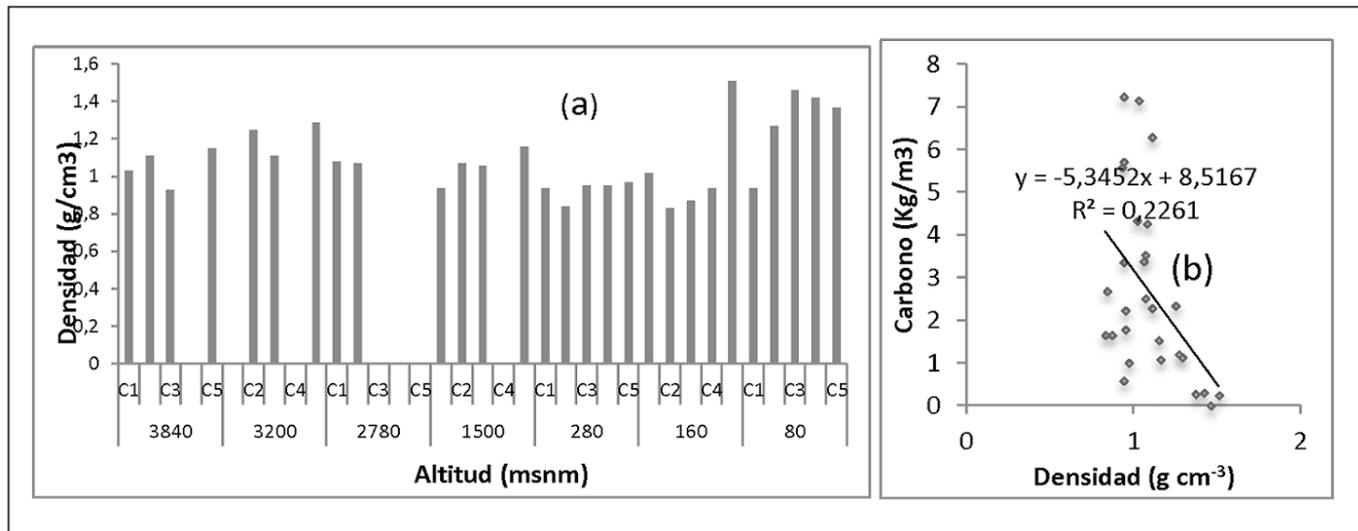


Figura 4. Variación de la densidad (g cm^{-3}) en el gradiente climático (3840-80 msnm) (a) y su relación con el contenido carbono (kg m^{-3})(b), Ecuador

Figure 4. Variation of bulk density (g cm^{-3}) in the climatic gradient (3840-80 m asl) (a) and its relationship with the carbon content (kg m^{-3}) (c), Ecuador

Existe una clara tendencia de incremento de calcio, magnesio, y potasio a menores altitudes, lo cual está relacionado con el mayor contenido de limo y arcilla. El contenido de calcio, en las primeras capas, varía de $2,4 \text{ cmol kg}^{-1}$ en el perfil evaluado a 3840 msnm hasta $19,0 \text{ cmol kg}^{-1}$ en la localidad de Quevedo a 80 msnm; así mismo el magnesio se encuentra en un rango de $0,8$ a $2,1 \text{ cmol kg}^{-1}$; el Potasio de $0,4$ a $1,6 \text{ cmol kg}^{-1}$ (Figura 5).

El bajo nivel de intercambio que presentan los suelos interandinos es producto de una mayor proporción de arena y limo por lo cual la superficie específica de intercambio de iones es baja (Benavides, 2000).

Cuando el suelo presenta una suma de bases inferior a 5 cmol kg^{-1} se considera que es de baja oferta nutritiva, de 5 - 12 cmol kg^{-1} es de oferta media, y más de 12 cmol kg^{-1} es de alta oferta (Bertsch, 1998). Según lo cual los suelos

evaluados en el Litoral: La Concordia, Buena Fé y Quevedo; serían considerados de alta oferta nutritiva, ya que obtuvieron valores de $17,8$, $23,1$, $23,2 \text{ cmol kg}^{-1}$ respectivamente. Los suelos de la región Interandina serían considerados como: Machachi de oferta media con un total de $7,3 \text{ cmol kg}^{-1}$; mientras que los suelos de El Corazón y la Aurora serían de baja oferta al presentar $3,8$ y $4,0 \text{ cmol kg}^{-1}$ respectivamente, y Tandapi de alta oferta con 16 cmol kg^{-1} (Figuras 3 y 5). En todos los sitios evaluados la cantidad de cationes disminuye con la profundidad, a excepción de Machachi que presenta un aumento de los cationes en los segundo, tercer y quinto horizontes.

El análisis de pH del suelo caracteriza a los suelos de la región Sierra (3840-1500 msnm) como ligeramente ácidos ($5,4$ - $5,8$) a excepción de los analizados en La Aurora que

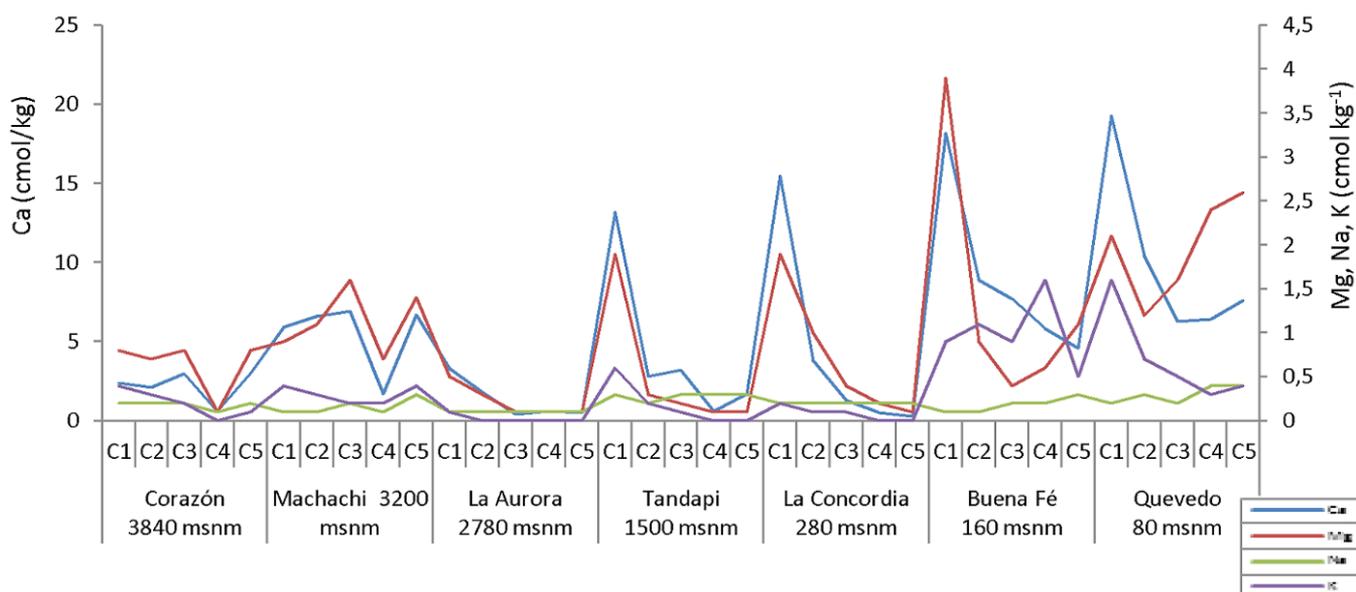


Figura 5. Cantidad ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) de cationes (Ca, Mg, Na, K) en el gradiente climático, Ecuador

Figure 5. Quantity ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) of cations (Ca, Mg, Na, K) in the climatic gradient, Ecuador

presenta pH 6; este grado de acidez estaría relacionada con la menor cantidad de bases presentes en estos suelos (Figura 6B). Mientras los suelos de la región Costa, también ligeramente ácidos, tienen un pH que oscila de 6,0 a 6,5 (Figura 6A).

No hay diferencias importantes del pH en los distintos horizontes; sin embargo, a lo largo del gradiente altitudinal la acidez es ligeramente mayor en la primera capa de los perfiles analizados (Figura 6C); según Benavides (2000) esto se debe al efecto de la materia orgánica y la meteorización.

Los suelos de textura más gruesa, pobres en arcillas y más ácidos en la Sierra presentan una menor suma de bases, lo que debe ser explicado por los siguientes motivos:

- las partículas minerales de estos suelos, principalmente de las fracciones arenas y limo, están poco meteorizadas, lo que se debe a su mayor juventud y ubicación en un clima mucho más frío.

- La menor rapidez de meteorización de los minerales se explica por temperaturas más bajas y esto causa una

menor liberación de bases. Aunque las precipitaciones son moderadas, estas lixivian en parte estos elementos con el agua de percolación, disminuyendo los cationes en los intercambiadores.

- También la materia orgánica, que tiene mayor probabilidad de ser acumulada en el suelo en estos sitios, por la descomposición más lenta en climas fríos, produce ácidos húmicos que ayudan a lixiviar los cationes de los intercambiadores.

De acuerdo a Brady & Weil (2004) la acumulación de materia orgánica tiende a acidificar el suelo de dos maneras: forma complejos solubles con cationes nutrientes no ácidos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+), facilitando las pérdidas de estos cationes por filtración, y adicionando iones H^+ porque contiene numerosos grupos funcionales ácidos de los cuales estos iones se pueden disociar. Como resultado, el complejo de intercambio (y por tanto también la solución del suelo) experimenta un dominio cada vez mayor de cationes ácidos (H^+ y Al^{3+}), y debido a esta serie de eventos, los procesos que producen iones H^+ acidifican los suelos en regiones húmedas donde la filtración es extensa. Esto sustenta los resultados expuestos en este documento ya que se presenta una mayor cantidad de aluminio en los suelos interandinos, pero tiende a disminuir a menores altitudes (Figuras 6A y 6C).

Los valores de aluminio de 1,5 a 0,2 cmol kg^{-1} en el gradiente climático (3840-80 msnm) tienen una tendencia decreciente a menores altitudes. De acuerdo a los rangos que maneja el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Ecuador (INIAP) para evaluar la concentración de aluminio en los suelos, se considera: en la Sierra bajo $< 0,5$, medio 0,5–1,0 y alto $> 1,0$ cmol kg^{-1} ; en la costa bajo $< 0,3$, medio 0,3–1,0 y alto $> 1,0$. Según lo cual los suelos interandinos del Corazón (3840 msnm) se consideran con alta concentración (1,5 cmol kg^{-1}), y la Aurora (2780 msnm) y Tandapi (1500 msnm) presentan un contenido medio de aluminio (0,6 cmol kg^{-1}); los suelos litorales presentan contenidos bajos de aluminio: Concordia (280 msnm) 0,4 cmol kg^{-1} , Buena Fé (160 msnm) 0,3 cmol kg^{-1} y Quevedo (80 msnm) 0,2 cmol kg^{-1} (Figuras 6A y 6C).

El aluminio es constituyente principal de muchos minerales del suelo (aluminosilicatos y óxidos de aluminio), incluyendo las arcillas. Cuando los iones H^+ se adsorben en una superficie de arcilla, normalmente no permanecen como cationes intercambiables por mucho tiempo, en lugar de eso atacan la estructura de los minerales, liberando iones Al^{3+} en el proceso. Los iones Al^{3+} se adsorben en las zonas de intercambio catiónico en el coloide y, a su vez, estos iones intercambiables Al^{3+} están en equilibrio con el Al^{3+} disuelto en la solución del suelo. Los iones Al^{3+} solubles e intercambiables cumplen dos funciones decisivas en la acidez del suelo. En primer lugar, el aluminio es altamente tóxico para la mayoría de los organismos y es responsable de muchos de los impactos perjudiciales de la acidez del suelo en las plantas. En segundo lugar, los iones Al^{3+} tienen una fuerte tendencia a la hidrólisis, desintegramos las moléculas de agua en iones H^+ y OH^- . El aluminio se combina con los iones OH^- , dejando que el H^+ reduzca el pH de la solución del suelo, y por esta razón, Al^{3+} y H^+ en conjunto son considerados cationes ácidos (Delhaize & Ryan, 1995; Mossor-Pietraszewska, 2001; Rout et al., 2001; Brady & Weil 2004).

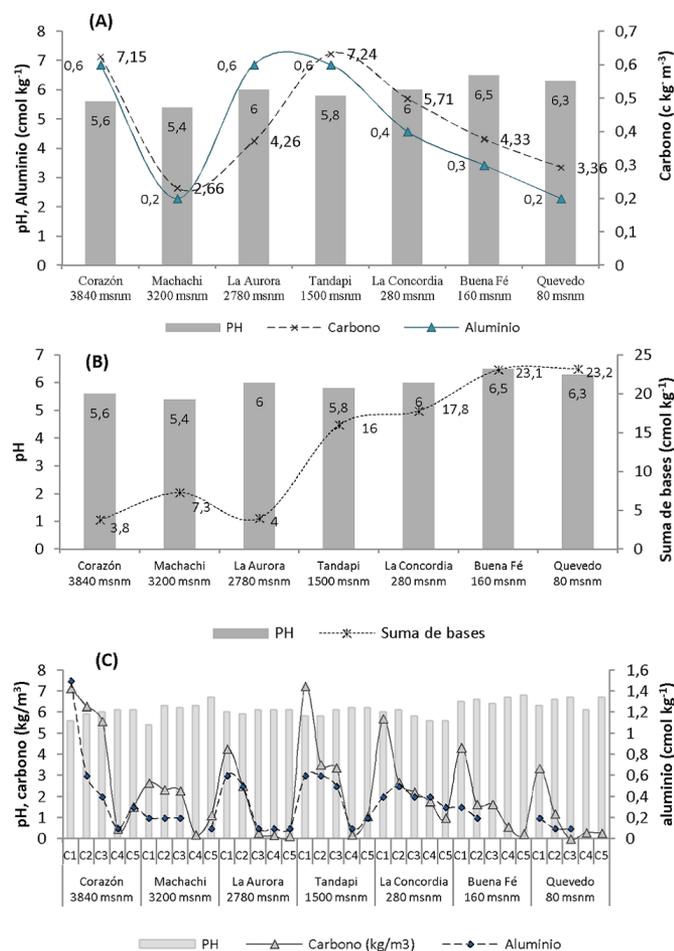


Figura 6. Relación entre el pH (H_2O) con el carbono (cmol kg^{-1}) y aluminio intercambiable (cmol kg^{-1}) (A), contenido de bases (cmol kg^{-1}) (B) (C1). Relación entre el pH (H_2O) con el carbono (cmol kg^{-1}) y aluminio intercambiable (cmol kg^{-1}) (C) (C1, C2, C3, C4, C5) climático gradiente (3840-80 m), Ecuador

Figure 6. Relationship between pH (H_2O) and carbon (cmol kg^{-1}) and aluminum exchangeable Al (cmol kg^{-1}) (A), content of bases (cmol kg^{-1}) (B) (C1). Relationship between pH (H_2O) and carbon (cmol kg^{-1}) and exchangeable Al (cmol kg^{-1}) (C) (C1, C2, C3, C4, C5) climatic gradient (3840-80 m), Ecuador

Las bajas concentraciones de aluminio en las tierras del Litoral ecuatoriano (280- 80 msnm) favorecerían las actividades agrícolas; mientras que los valores altos y medios de este elemento en las localidades interandinas del Corazón, La Aurora y Tandapi, respectivamente, estarían entre los limitantes más importantes de la agricultura andina, tanto porque disminuyen la disponibilidad de nutrientes y porque inhiben el crecimiento de las raíces; pues se ha observado que el exceso de aluminio interfiere la división celular en las raíces, así como el proceso de absorción y utilización de algunos nutrientes.

La secuencia de suelos seleccionados entregan una visión interesante de la variación de los suelos en el gradiente analizado, que orienta sobre sus principales diferencias, sin embargo es necesario aumentar el número de sitios, especialmente en las altitudes intermedias entre los 300–2500 msnm. para completar este análisis. Así también sería interesante estudiar otros cortes transversales por el país, que incluya suelos tanto con influencia volcánica así como sin efecto volcánico, para lograr un mejor dominio entre relieve, gradiente climática, origen de los suelos y características y propiedades de estos.

CONCLUSIONES

El origen de los suelos volcánicos muestran patrones relativamente similares en diferentes regiones del Ecuador; sin embargo, las condiciones ambientales específicas de cada sitio, en un gradiente altitudinal, ha dado lugar a diferentes factores y procesos que han influido en la formación del suelo, así el clima es considerado el factor más importante en el desarrollo de los suelos estudiados.

Hay un marcado efecto de la distancia de los volcanes, fuente de los sedimentos piroclásticos que han dado origen a los suelos. Mientras mayor es la distancia menor es el tamaño de las partículas sedimentadas. El tipo y tamaño de las partículas que constituyen los suelos, muestran significativas variaciones a lo largo del gradiente altitudinal.

En los sitios altos de las laderas volcánicas, las bajas temperaturas y las condiciones de humedad han favorecido, en general, la acumulación de materia orgánica, mientras que en las zonas bajas las altas temperaturas y mayores precipitaciones facilitan la rápida descomposición de ésta y han acelerado el desarrollo pedológico.

La oferta nutritiva de los suelos presenta importantes variaciones en el gradiente altitudinal, que están relacionadas con las características texturales. Los suelos evaluados en el Litoral: La Concordia, Buena Fé y Quevedo son más ricos en coloides y presentan alta oferta; mientras los suelos de la región Interandina pobres en coloides minerales fluctúan entre una oferta media (Machachi) y una oferta baja (Corazón y la Aurora). Tandapi, en una posición intermedia, presenta una oferta alta.

La reacción más ácida de los suelos, observados en la región de la Sierra, estarían relacionados con suelos menos meteorizados, más ricos en materia orgánica y aunque con precipitaciones medias presentan mayor lixiviación de bases.

LITERATURA CITADA

- Beinroth, F.H., Luzio L., W.; Maldonado P., F.; Eswaran, H. In: International Soil Classification Workshop, Chile and Ecuador. Part III: Tourguide for Ecuador, 6., 1984, Santiago. Proceedings... Santiago, Chile: Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, 1985. 188p. <http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNAAAX097.pdf>. 18 Mar. 2011.
- Benavides C., R. E. Caracterización de sitios con *Pinus radiata* D. Don en un transecto altitudinal con suelos vitrans de los páramos del Cotopaxi, Ecuador. Valdivia: Universidad Austral de Chile, 2000. 83 p. Tesis grado Ingeniero Forestal.
- Bertsch, F. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, CR: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, 1998. 157 p.
- Brady, N., Weil, R. Elements of the nature and properties of soil. New Jersey: Prentice Hall, 2004. 559p.
- Buytaert, W.; Deckers, J.; Wyseure, G. Regional variability of volcanic ash soils in south Ecuador: The relation with parent material, climate and land use. *Catena*, v.70, n.2, p.143-154, 2006. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816206001573>>. 17 Mar. 2011. doi:10.1016/j.catena.2006.08.003.
- Colmet-Daage, François; K. C. de; Delaune, M.; Sieffermann, G.; Gautheyrou, J.; Gautheyrou, M.; Fusil, G.; Koukoui, M. Caractéristiques de quelques sols d'Equateur dérivés de cendres volcaniques. 3^e partie. Comparaison de l'évolution de quelques sols des régions tropicales chaudes et tempérées froides d'altitude. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, v. 7, n. 4, p. 495-560, 1967. <http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/cahiers/PTP/18399.PDF>. 10 Jan. 2011.
- Delhaize, E.; Ryan, P.R. Aluminum toxicity and tolerance in plants. *Plant Physiology*, v.107, n.2, p.315-321, 1995. <<http://www.plantphysiol.org/content/107/2/315.full.pdf>>. 18 Mar. 2011.
- Geissert, D.; Ibáñez, A. Calidad y ambiente físico-químico de los suelos. In: Manson, R.H.; Hernández-Ortiz, V.; Gallina, S.; Mehlreter, K. (Eds.). *Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: Biodiversidad, manejo y conservación*. México: INECOL/INE-SEMARNAT, 2008. p.213-221.
- Hart, S. C.; Perry, D. A. Transferring soils from high- to low-elevation forests increases nitrogen cycling rates: climate change implications. *Global Change Biology*, v.5, n.1, p.23-32, 1999. <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-2486.1998.00196.x/pdf>>. 17 Mar. 2011. doi:10.1046/j.1365-2486.1998.00196.x.
- Hörmann, P.K.; Pichler, H. Geochemistry, petrology and origin of the Cenozoic volcanic rocks of the Northern Andes in Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 12, n.3–4, p.259–282, 1982. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377027382900294>>. 15 Abr. 2011. doi:10.1016/0377-0273(82)90029-4.
- Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología, EC - INAMHI. Anuario Meteorológico. <http://www.inamhi.gov.ec>. 20 Nov. 2010

- Kane, E. S.; Valentine, D. W.; Schuur, E. A. G.; Dutta, K. Soil carbon stabilization along climate and stand productivity gradients in black spruce forests of interior Alaska. *Canadian Journal of Forest Research*, v.35, n.9, p.2118–2129, 2005. <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.1139/x05-093>>. 15 Abr. 2011. doi:10.1139/x05-093.
- Mossor-Pietraszewska, T. Effect of aluminium on plant growth and metabolism. *Acta Biochimica Polonica*, v.48, n.3, p. 673-686, 2001. <http://www.actabp.pl/pdf/3_2001/673-686.pdf>. 22 Mar. 2011.
- Nanzyo, M. Unique properties of volcanic ash soils. *Global Environmental Research*, v.6, n.2, p.99–112, 2002. <<http://www.airies.or.jp/publication/ger/pdf/06-2-11.pdf>>. 15 Jan. 2011.
- Neall, V.E. Volcanic soils. In: *Encyclopedia of Life Support Systems: Land use and land cover*. Paris: Encyclopedia of Life Support Systems, 2006. v. 7. p.23-45.
- Noni, G. de, Nouvelot, J. F.; Trujillo, G. Erosion and conservation of volcanic ash soil in the highlands of Ecuador: A case study. In: Beinroth, F.H.; Luzio L., W.; Maldonado P., F.; Eswaran, H. (Eds.). *International Soil Classification Workshop, Chile and Ecuador, Part I: Papers, 6.*, 1984, Santiago. *Proceedings...* Santiago, Chile: Sociedad chilena de la Ciencia del Suelo, 1985. p.263-274.
- Olsson, M.T.; Erlandsson, M.; Lundin, L.; Nilsson, T.; Nilsson, Å.; Stendahl, J. Organic carbon stocks in Swedish Podzol soils in relation to soil hydrology and other site characteristics. *Silva Fennica*, v.43, n.2, p.209–222, 2009. <<http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf43/sf432209.pdf>>. 10 Mar. 2011.
- Porta, J.; López-Acevedo, M.; Roquero, C. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 3.ed. Madrid: Mundi-Prensa, 2003. 960 p.
- Pourrut, P., Gómez, G.; Bermeo, A.; Segovia, A. Factores condicionantes de los regímenes climáticos e hidrológicos. In: Pourrut, P. (Ed.). *Estudios de Geografía. El agua en el Ecuador. Clima, precipitaciones, escorrentía*. Quito: ORSTOM/Colegio de Geógrafos del Ecuador/Corporación Editora Nacional, 1995. p: 7-12.
- Prado B.; Duwig, C.; Hidalgo, C.; Gómez, D.; Yee, H.; Prat, C.; Esteves, M.; Etchevers, J. D. Characterization, functioning and classification of two volcanic soil profiles under different land uses in Central Mexico. *Geoderma*, v.139, p. 300–313, n.3-4, 2007. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706107000523>>. 17 Mar. 2011. doi:10.1016/j.geoderma.2007.02.008.
- Rout, G.R.; Samantaray, S.; Das, P. Aluminium toxicity in plants: a review. *Agronomie*, v.21, n.1, p.3-21, 2001. <http://www.agronomy-journal.org/index.php?option=com_article&access=doi&doi=10.1051/agro:2001105&Itemid=129>. 18 Jan. 2011. doi:10.1051/agro:2001105.
- Sauer, W. *Geologie von Ecuador*. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1971. 316 p.
- Schawe M.; Glatzel S.; Gerold G. Soil development along an altitudinal transect in a Bolivian tropical montane rainforest: Podzolization vs. hydromorphy. *Catena*, v.69, n.2, p.83–90, 2006. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816206001044>>. 22 Mar. 2011. doi:10.1016/j.catena.2006.04.023.
- Stern, C.R. Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geologica de Chile*, v.31, n.2, p.161–206, 2004.
- Takahashi, T.; Shoji, S. Distribution and classification of volcanic ash soils. *Global Environmental Research*, v.6, n.2, p.83–97, 2002. <<http://www.airies.or.jp/publication/ger/pdf/06-2-10.pdf>>. 18 Jan. 2011.
- Thompson M.; F. Troch. *Soil and Fertility*. 4.ed. New York, USA: Mc. Graw-Hill Back Company, 2002. 627 p.
- Tonneijck, F. H.; Plicht, J. van der; Jansen, B.; Verstraten, J. M.; Hooghiemstra, H. Radiocarbon dating of soil organic matter fractions in Andosols in northern Ecuador. *Radiocarbon*, v. 48, n.3, p.337–353, 2006. <<https://journals.uair.arizona.edu/index.php/radiocarbon/article/view/2880/2643>>. 17 Abr. 2011.
- Winckfl, A. *Relieve y geomorfología del Ecuador*. Quito: CEDIG/ ORSTOM, 1982. 19p. (Documentos de Investigación, 1).
- Zehetner, F.; Miller, W.P.; West, L.T. Pedogenesis of volcanic ash soils in Andean Ecuador. *Soil Science Society of America Journal*, v. 67, n.6, p.1797-1809, 2003. <<https://www.soils.org/publications/sssaj/articles/67/6/1797>>. 17 Mar. 2011. doi:10.2136/sssaj2003.1797.