

INVESTIGACIONES

MINERALOGÍA Y GÉNESIS DE ALGUNOS SUELOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS DE CHILOÉ CONTINENTAL, CHILE¹

Mineralogy and origin of some volcanic ash soils of continental Chiloé, Chile

Eduardo Besoain M.², Mario Peralta P.³ y Silvana Massaro M.⁴

ABSTRACT

Four Andisols from volcanoes Hornopirén and Hualaihué or Apagado, located in continental Chiloé, X Region (41° 53' S) were studied. The soils are located on the slopes of the volcanoes, on a very steep elevation covered with dense rain forest. The local climate averages 4 000 – 5 000 mm annual rainfall and a mean annual temperature of 10 °C. The soils were described morphologically and their chemical, physical and mineralogical properties were determined. The horizons are deep and their textural variation suggests various eruptions. All the soils were characterized by a thick dark A horizon with high organic matter content (12-25% organic carbon), high to moderate water retention at 1 500 kPa, high phosphate retention values (> 90%), with the exception of the subsurface horizon of Pululil soil. The content of volcanic glass is very high (59-88%) and tends to increase with the depth of the profile; most of the glass contains bubbles. Soil colloids are allophanic, but at the surface Al, Fe-humic complexes predominate. Opaline silica is also found in A-horizons of all pedons. The soils satisfy the andic properties and belong to the Order of Andisols and Sub-Order of Udands.

Key words: Andisols, volcanic ash, alophane.

INTRODUCCIÓN

Frente a la Isla Grande de Chiloé, en la provincia de Palena, X Región, Chiloé Continental, entre el estuario de Reloncaví y el canal Cholgo, se encuentran los volcanes Apagado o Hualaihué (41° 53' S), Hornopirén (41° 53' S) y Yate (41° 48' S) que han tenido fuerte actividad holocénica. Esta actividad, que prevaleció probablemente durante gran parte del Pleistoceno, ha

acumulado considerables depósitos de cenizas, escorias y lápillis de diferentes edades y de composición predominantemente basáltica a andesítico-basáltica. Tales depósitos han originado suelos sobre los cuales los antecedentes disponibles son escasos, por varias razones, como la falta de caminos, densa vegetación y excesiva precipitación. Sin embargo, con anterioridad, Peralta *et al.* (1979) habían iniciado el estudio de suelos del volcán Apagado. Existe un trabajo más reciente sobre el aporte de los volcanes de la cordillera andino-patagónica a los suelos argentino-chilenos entre los paralelos 42° y 44° S, en los que se incluyó un suelo proveniente de las cenizas del volcán Hornopirén (López *et al.*, 1994). Sobre los suelos originados por la actividad del volcán Yate hay escasa información (Kühne *et al.*, 1985).

¹Recepción de originales: 16 de febrero de 1999 (reenviado).

²Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación La Platina, Casilla 439/3, Santiago, Chile.

³Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Casilla 1004, Santiago, Chile.

⁴Fundación Chile, Casilla 773, Correo Central, Santiago, Chile.

La zona en referencia se encuentra en la provincia de Palena, frente a la Isla de Chiloé y se ubica en la vertiente occidental de la Cordillera de Los Andes. Es una región montañosa, abrupta, sobre la que se sitúan los volcanes separados 12 a 15 km uno de otro. Se encuentra cubierta por bosques sub-antárticos, en un clima muy húmedo, bajo una precipitación de 4.000 a 5.000 mm anuales, baja luminosidad y temperatura media anual de 10 °C. La vegetación corresponde a una pluviselva rica en especies de hoja perenne, incluyendo principalmente coigüe (*Notophagus dombeyi*), mañío (*Podocarpus nubigenus*), tepa (*Laurelia serrata*), notro o ciruelillo (*Embothrium coccineum*), olivillo (*Aetoxicon punctatum*), tepu (*Tepualia stipularia*), canelo (*Drimys winteri*), alerce (*Fitzroya cupressoides*), ulmo (*Eucryphia cordifolia*), luma (*Amomyrtus luma*).

Bajo tales condiciones más o menos homogéneas de clima, material parental y vegetación, el tiempo constituye un factor de formación de relevante importancia.

Diversos estudios geológicos (Notsu *et al.*, 1987; López-Escobar *et al.*, 1991; López-Escobar *et al.*, 1993) indican que los centros volcánicos de ese sector están referidos no sólo a la subducción de la placa oceánica de Nazca bajo la plataforma continental sudamericana, sino que están fuertemente controlados por la extensa falla de Liquiñe-Ofqui que se extiende por más de 800 km entre los paralelos 38 y 47° S (Hervé, 1984). Los volcanes se sitúan al oeste de dicha falla.

El volcán Apagado o Hualaihué (1.106 m.s.n.m.) está emplazado en una estructura calderiforme pleistocena constituyendo un pequeño cono de cenizas basálticas a andesítico-basálticas, asociadas a grandes depósitos de escoria. Andesitas y basaltos son porfiríticos, siendo la plagioclasa el fenocristal más común. La masa fundamental consiste en microcristales de plagioclasa, clinopiroxenos (pigeonita), opacos y vidrios (Tagiri *et al.*, 1985).

El volcán Hornopirén (1.572 m.s.n.m.) es un estratovolcán que forma un cono de cenizas relativamente pequeño, incluyendo un flujo de lava central y constituye un cono casi perfecto. La petrografía de los piroclásticos está conformada por basaltos porfiríticos y andesitas basálticas, cuya masa fundamental es plagioclasa, clinopiroxenos, olivino, apatita, opacos y vidrio. El volcán Hornopirén está situado a 15 km al noreste del volcán Hualaihué (Tagiri *et al.*, 1985).

El presente trabajo informa sobre las características morfológicas, químicas, físicas y mineralógicas de cuatro pediones asociados a los volcanes Hornopirén y Hualaihué. El objetivo principal es precisar la naturaleza de los suelos y las implicancias de alteración de las cenizas parentales en las condiciones bioclimáticas prevaletientes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los suelos

Los suelos en estudio son 4 perfiles provenientes de eyectas de los volcanes Apagado (suelos Ñico y Pululil) y Hornopirén (suelos Hornopirén I y II). Los primeros fueron descritos por Peralta *et al.* (1979); de los suelos del volcán Hornopirén, descritos por Colmet-Daage *et al.* (1991, comunicación personal), sólo hemos dispuesto horizontes del solum. La localización geográfica de los suelos se muestra en la Figura 1 y una representación esquemática de los perfiles en la Figura 2. Las propiedades morfológicas se presentan en el Cuadro 1.

El suelo Ñico fue colectado a 10 km al oeste de Contao, en el camino hacia el volcán Apagado, en la ladera sur del volcán. El suelo Pululil se describió en el predio Pichicolo, a 40 km al sureste de Contao, por el camino de Contao a Hornopirén. El suelo Hornopirén I se colectó en la ladera sur del volcán, subiendo por la pendiente del cono; el suelo Hornopirén II fue colectado en la carretera austral a 5 km al norte de Río Negro/Hornopirén, a pocos kilómetros del volcán.

En los suelos volcánicos, un argumento genético importante es saber la edad de los suelos, lo que en este caso desconocemos ya que no existen determinaciones radiométricas. Sin embargo, de acuerdo a los contenidos de arcilla, el estado de alteración de las arenas (feldespatos, vidrios, inosilicatos), el contenido de óxidos de Fe y su baja cristalinidad, se presume que se trata de suelos jóvenes cuya edad no supera, probablemente, los 1.500 a 3.000 años. Entre ellos, los suelos del volcán Hornopirén parecen ser más nuevos que los del volcán Apagado.

Determinaciones analíticas

Las muestras se secaron al aire y se tamizaron bajo 2 mm. La granulometría fue determinada por el método de la pipeta (Kilmer y Alexander, 1949), previa ultrasonificación (300 W cm^{-2}) y dispersión con hexametáfosfato-Na.

El carbono orgánico (CO), pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC), bases de cambio y humedad fueron determinados según la metodología de Sadzawka (1990). La densidad aparente (DA) se obtuvo a partir de terrones no disturbados recubiertos con parafina (Blake y Hartge, 1986). El contenido de agua a 1.500 y 33 kPa se efectuó en muestras tamizadas $< 2 \text{ mm}$ y la retención de agua como diferencia entre ellas. Los tratamientos de disolución selectiva con oxalato, ditionito y pirofosfato (Fe_o , Al_o , Si_o , Al_p , Al_d , Fe_p) se efectuaron por la metodología de Sadzawka (1990); la retención de fosfato, por el procedimiento de Blakemore *et al.* (1987) y el contenido de alofán/imogolita de acuerdo a la metodología de Parfitt y Henmi (1982).

La arcilla fue separada desde muestras mantenidas húmedas; para ello se eliminó la materia orgánica (MO) mediante H_2O_2 , entonces la

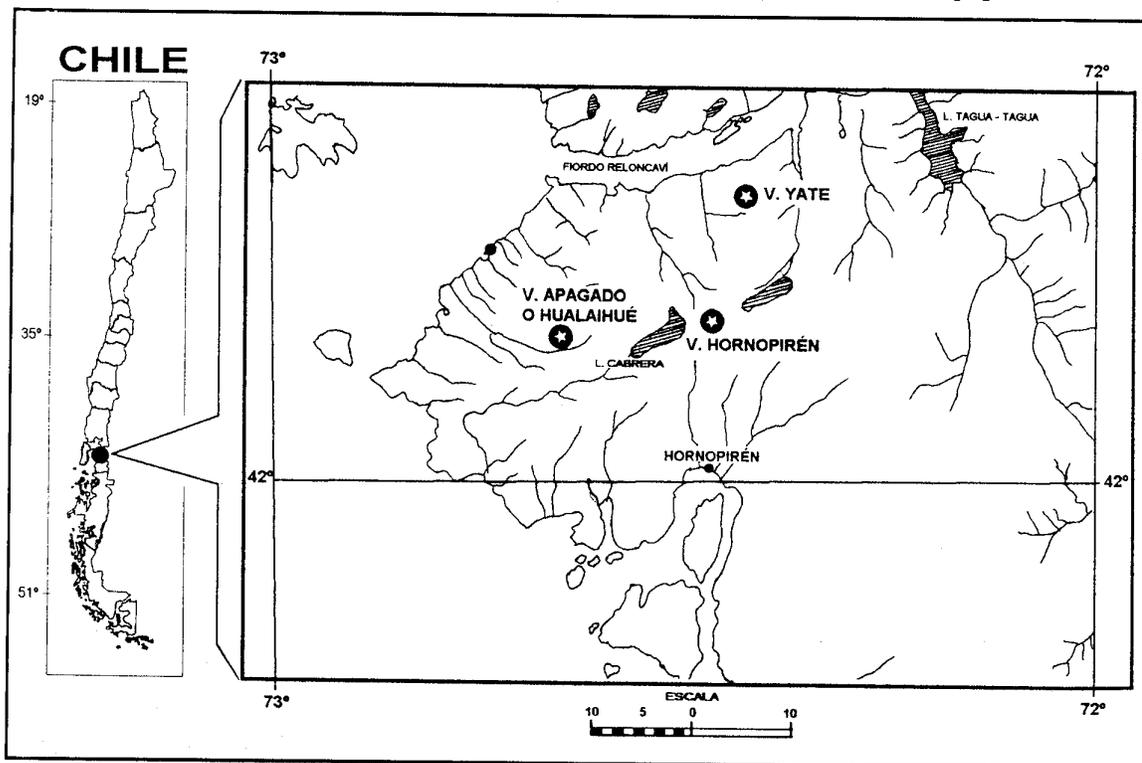


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio con los tres volcanes de la región: Hualaihué o Apagado, Hornopirén y Yate.

Figure 1. Geographical location of the area studied showing the position of the three volcanoes of the region: Hualaihué (or Apagado), Hornopirén and Yate.

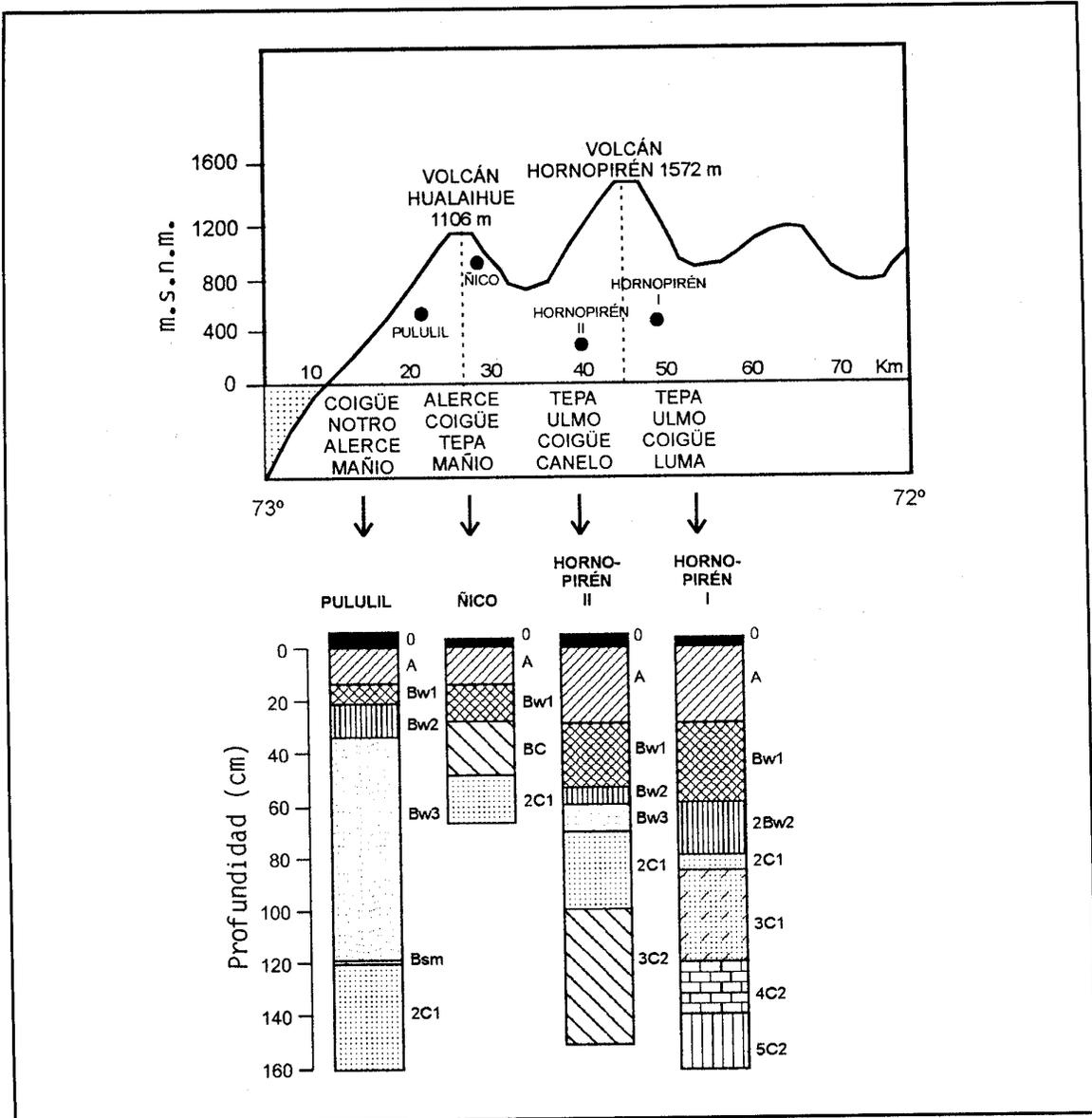


Figura 2. Esquemas de los perfiles estudiados: profundidad de horizontes, alturas y flora asociada.
Figure 2. Schematic sketch of the profiles studied; horizon depths, altitudes, and associated flora.

arcilla se dispersó con agua desionizada a pH 4 (HCl) o a pH 10 (NaOH) y ultrasonificadas (300 W cm^{-2}) durante 2 minutos. La arcilla se extrajo por centrifugación por el método de Jackson (1972).

El análisis mineralógico de la arcilla ($< 2 \mu\text{m}$) incluyó determinaciones de: a) difracción de

rayos X (Mg, Mg-glicerol, K, K-550 °C); b) espectroscopía-FT-IR (celdas de absorción de KBr con relación sal:muestra de 300:1, invaquo, comprimidas a 10^4 kg cm^{-2}). En las arcillas de los suelos Níco y Pululil, a fin de precisar la identidad de una reflexión alrededor de 7 \AA , se adicionaron análisis termo-diferenciales (termopares de Pt-Pt/Rh; calentamiento a $10 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$;

sensibilidad 1 mV, atmósfera inerte de N₂). Además, las arcillas de los suelos Hornopirén se observaron mediante microscopio electrónico de transmisión (TEM) con aumento constante de 20.000 X, sin sombreado y soporte de colodión.

Las arenas (2-0,05 mm) se extrajeron por tamización y se estudiaron por microscopía óptica y difracción de rayos X. El contenido de vidrios volcánicos se determinó por digestión con HF (Lowe y Green, 1992).

El grado de alteración química de estos suelos fue tentativamente evaluado aplicando el criterio de Shoji *et al.* (1993b) para suelos de Japón. Para ello se usó una ecuación lineal, $Y = 0,000705X + 0,57$, siendo X la edad normalizada a 10 °C en años, e Y el contenido de Al extraído con oxalato (Al_o).

RESULTADOS

Las características morfológicas de los perfiles se presentan en el Cuadro 1. Se ve que todos los horizontes tienen matices dominantes amarillo-rojos 5YR a 7,5 YR, con valores bajos de croma y brillo. Ello significa que los suelos son oscuros, un hecho que es consecuencia del alto contenido orgánico. Algunos horizontes tales como, 2C1 de Ñico y Bw2 de Pululil, tienen tintes amarillo oliva (5Y 6/8) y pardo oliva (2,5Y 4/4), o aún negro (10YR 2/1) como el horizonte 2C1 del suelo Pululil, constituido por escoria volcánica. Todos los epipediones son muy oscuros, especialmente el horizonte 0 y poseen un sistema radicular muy abundante que se extiende a horizontes inferiores.

La estructura de los horizontes del solum de todos los suelos es granular o de bloques, y la consistencia friable; la mayoría de los horizontes tienen la cualidad de ser untuosos y jabonosos, no plásticos ni adhesivos, como lo son los suelos alofánicos.

Las texturas dominantes son franco limosas, franco arcillo limosas, franco arcillo arenosas y

arenosas, y los límites de separación entre los horizontes de los pediones son netos, planos, aunque algunos son ondulados.

Las propiedades químicas de los suelos se muestran en el Cuadro 2. Los valores de pH-H₂O varían entre 5,1 (fuertemente ácido) en la superficie a 6,2 (ligeramente ácido) en profundidad, excepto el suelo Ñico cuyo pH disminuye en el solum. En ello influye el elevado contenido orgánico de los horizontes superficiales, y el incremento de los vidrios básicos basálticos coloreados en profundidad. Los valores de pH-KCl son alrededor de una unidad más baja que los de pH-H₂O, lo que indica un déficit de carga positiva neta en los suelos. Al respecto, Wada (1985) ha señalado que en suelos que contienen abundancia de complejos Al-húmicos no aparece carga (+).

Todos estos suelos tienen elevados contenidos de carbono orgánico en los horizontes superficiales: 13 y 12% en los suelos Ñico y Pululil, y 25 y 18% en los suelos Hornopirén I y II, respectivamente. Estos últimos valores se asocian a otros de densidad aparente muy bajos: 0,44 y 0,42 Mg m⁻³. El contenido de C-orgánico también alcanza elevados valores en profundidad, un hecho que se relaciona especialmente con procesos de migración orgánica y no con horizontes enterrados. Un criterio similar es sostenido por Kühne *et al.* (1985), para suelos volcánicos de este sector.

La retención de fósforo en los suelos Hornopirén es muy alta y en todos los horizontes supera el 90%. En el suelo Ñico la retención de P en los tres primeros horizontes sobrepasa el 90%, pero en el horizonte 2C1 baja al 83%. En el suelo Pululil, con la excepción del horizonte A, con una retención de P de 92%, en los horizontes Bw1, Bw2 y Bw3 esta cae a valores de 70, 48 y 40%, respectivamente, un hecho que se relaciona con el incremento en el contenido de arena de estos horizontes (66,9; 63,1 y 79,1%, respectivamente) y a la disminución correlativa del Al-activo (Cuadro 2).

Cuadro 1. Propiedades morfológicas de los suelos

Table 1. Morphological properties of soils

Horizonte	Profundidad (cm)	Color (húmedo)	Textura	Estructura	Consistencia (húmedo)	Untuosidad	Arraigamiento	Límite inferior	Vegetación ¹
Pedión 1: Hornopirén I									
0	2-0 ²								
A	0-30	7,5YR 3/2	Fl	G	Fr	mUJ	mA	CP	Tepa, Ulmo, Coigüe,
Bw1	30-60	5YR 3/2	Fl	G	Fr	mUJ	mA	P	Lenga, Luma, Quila,
2Bw2	60-80	7,5YR 3/2	Fl	Ba	Fr	UJ	mA	P	Canelo, Alerce,
2C1	80-85	7,5YR 5/2	Ar	Ba	Fr	IJ	E	P	Musgos, Helechos
3C1	85-120	10YR 3/2	Ar	gSi	Fr	IU	mE	P	
4C2	120-140	10YR 3/2	Ar	gSi	Fr	no	no	P	
5C2	140-160	10YR 3/2	Ar	gSi	Fr	no	no	P	
[Lat. 41°47'S Long. 77°30'W; Pendiente = 40%; Temp. aire 9°C; Elevación = 300 m.s.n.m.; Pp anual = 4.500 mm]									
Pedión 2: Hornopirén II									
0	5-0 ²								
A	0-30	7,5YR 3/2	Fl	B	Fr	mUJ	mA	NP	Similar a
Bw1	30-55	10YR 3/2	Fl	B	Fr	UJ	mA	Pa	Hornopirén I
Bw2	55-60	5YR 4/4	Far	B	Fr	no	mA	Pa	
Bw3	60-70	7,5YR 4/2	Ar	B	Fr-Fi	no	A	Pa	
2C1	70-100	7,5YR 6/4	Ar	B	Fr-Fi	no	E	Pa	
3C2	100-150	10YR 2/1	Ar	B	Fr	no	no	NP	
[Lat. 41°49'S Long. 72°30'W; Pendiente = 30%; Temp. aire = 9°C; Elevación = 150 m.s.n.m.; Pp anual = 4.500 mm]									
Pedión 3: Ñico (Volcán Apagado)									
0	4-0								
A	0-15	5YR 3/2	Faar	BsA	Fr	noP, noA	mA	NO	Coigüe, Alerce,
Bw1	15-28	5YR 2/2	Fal	BsA	Fr	noP, UJ	Mod	D	Mañío, Notro, Canelo,
BC	28-48	5YR 3/4	Al	gSi	Fr	noP, UJ	Mod	D	Helechos, Musgos
2C1	48-88	5Y 6/8	Fal	B	Fr-Fi	noP, noA	no		
[Lat. 41°53'S Long. 72°06'W; Pendiente = 60%; Temp. aire 9°C; Elevación = 960 m.s.n.m.; Pp anual = 4.000 mm]									
Pedión 4: Pululil (Volcán Apagado)									
0	5 -0								
A	0 -14	5YR 2/2	Fl	G	Fr	noP, noA	mA	NP	Similar a Ñico
Bw1	14 -22	2,5Y 3/2	Faar	noes	Fi	1P, 1P1, U	mA	Pa	
Bw2	22 -35	2,5Y 4/4	Faar	noes	Fr-Fi	1P, 1P1, U	A	NP	
Bw3	35 -120	10YR 4/4	Far	noes	Fr	noP, noA	E	Pa	
Bsm	120 -121,5	2,5YR 3/3	-	-	mD	-	no	0	
2C1	121,5-160	10YR 2/1	Ar	noes	mFr	noP, noA	no	-	
[Lat. 41°50'S Long. 72°35'W; Pendiente = 30-40%; Temp. aire = 9°C; Elevación = 640 m.s.n.m.; Pp anual = 4.000 mm]									

Símbolos: Textura: Faar = franco arcillo arenoso; Fal = franco arcillo limoso; Al = arcillo limoso; Fl = franco limoso; Far = franco arcilloso; Ar = arena.

Estructura: G = granular; B = bloques; Ba = bloques angulares; Bsa = bloques subangulares; gSi = grano simple; noes = no estructurado.

Consistencia: Fr = friable; Fi = firme; D = duro; mD = muy duro.

Adhesividad, Untuosidad: U = untuosa; J = jabonosa; noP = no plástica; noA = no adhesiva; 1P = levemente pegajosa; IU = levemente untuosa; IJ = levemente jabonosa; mUJ = muy untuosa y jabonosa; no = no untuosa ni jabonosa.

Arraigamiento: mA = muy abundante; A = abundante; mE = muy escaso; E = escaso; no = sin raíces; Mod = moderado.

Límite inferior: C = claro; P = plano; a = abrupto; N = neto; O = ondulado; D = difuso.

¹Tepa (*Laureliopsis philippiana*), ulmo (*Eucryphia cordifolia*), coigüe (*Nothofagus dombeyi*), canelo (*Drimys winteri*), quila (*Chusquea quila*), luma (*Amomyrtus luma*), alerce (*Fitzroya cupressoides*), mañío (*Podocarpus nubigenus*), notro (*Embothrium coccineum*), lenga (*Nothofagus pumilio*).

²Materia orgánica parcialmente descompuesta.

Cuadro 2. Propiedades químicas de los suelos

Table 2. Chemical properties of the soils

Prof. (cm)	Hori- zonte	pH		C-orgá- nico %	CIC ←----- cmol kg ⁻¹ -----→	Bases de cambio				Sat. de bases %	Reten- ción P %	"Edad" de alte- ración de epipe- diones ^a (años)
		KCl	H ₂ O			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺⁺			
Pedión 1: Hornopirén I (Volcán Hornopirén)												
0-30	A	4,5	5,2	25,0	77,3	16,3	9,4	1,7	0,4	35,6	91	200-450
30-60	Bw1	4,7	5,7	10,8	60,5	3,7	1,6	0,4	0,5	10,2	99	
60-80	2Bw2	5,1	6,1	8,1	26,3	2,6	0,9	0,3	0,5	16,2	99	
Pedión 2: Hornopirén II (Volcán Hornopirén)												
0-30	A	4,6	5,7	18,0	59,4	4,3	3,5	0,9	0,7	15,9	98	700
30-55	Bw1	5,2	6,0	9,3	37,6	1,9	0,9	0,2	0,4	9,2	99	
Pedión 3: Ñico (Volcán Apagado)												
0-15	A	4,7	5,4	12,3	48,0	0,4	0,2	0,1	0,2	2,0	95	3.000
15-28	Bw1	4,8	5,4	8,2	38,3	0,1	0,1	-	0,1	1,0	97	
28-48	BC	4,4	5,3	7,2	37,4	0,2	0,1	-	0,1	1,0	100	
48-68	2C1	4,4	5,1	1,8	17,2	0,1	-	-	-	1,0	83	
Pedión 4: Pulumil (Volcán Apagado)												
0-14	A	4,4	5,2	13,0	56,4	1,4	1,4	0,2	0,1	5,5	92	2.500
14-22	Bw1	5,0	5,8	6,8	36,9	0,8	0,7	0,1	0,1	4,6	70	
22-35	Bw2	5,2	5,3	3,6	24,9	0,6	0,5	-	-	4,4	48	
35-120	Bw3	5,5	6,2	1,4	13,1	0,4	0,4	-	-	5,3	40	
120-121,5	Bsm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

^aEn base a criterio de Shoji *et al.* (1993a: 1993b).

La CIC en los suelos Hornopirén I y II es alta y varía entre 77,3 y 26,3 cmol kg⁻¹. En los suelos Ñico y Pulumil, la CIC es más baja y varía entre 48 y 13,1 cmol kg⁻¹. En todos estos suelos, los valores más altos de CIC y de saturación de bases se encuentran en los horizontes superiores, asociados a los mayores contenidos orgánicos.

La suma de las bases de cambio es mucho mayor en los suelos Hornopirén (27,5-3,4 cmol kg⁻¹) comparados con la suma de las bases de los suelos Ñico y Pulumil (3,1 - 0,1 cmol kg⁻¹), pero en todos predomina el Ca²⁺ y Mg²⁺ de intercambio. La saturación de bases en los suelos Hornopirén varía desde 35,6 a 9,2 cmol kg⁻¹, siendo

mucho menos en los suelos Ñico y Pulumil, con valores fluctuantes entre 5,5 a 1,0 cmol kg⁻¹.

Las propiedades físicas de los suelos se presentan en el Cuadro 3. Las observaciones de campo indican que en todos los suelos el contenido de humedad es muy alto y usualmente los perfiles se encuentran sobresaturados. Por ejemplo, las determinaciones del contenido de agua de campo en los horizontes A de los suelos Hornopirén I y II alcanzan a 345 y 239% respectivamente (López *et al.*, 1994). En referencia a los valores de retención de agua a 33 y 1.500 kPa esta varía ampliamente entre 224 y 27% y, desde 168 a 12%, respectivamente, siendo mucho mayores

los valores de retención de los suelos Hornopirén respecto a aquellos de los suelos Ñico y Pululil. Sin duda, la composición granulométrica y especialmente el contenido orgánico son los factores que influyen fuertemente la capacidad de retención de agua de los suelos.

El contenido de arcilla es mayor en horizontes B (22,2 - 28,5%), que en los horizontes superficiales y en los horizontes C, excepto en el suelo Hornopirén II en el cual el contenido de arcilla es mayor en el horizonte A (25,3%). Mayores contenidos de arcilla en horizontes B indican estados de alteración más avanzados que en horizontes de la superficie, un hecho en el que, aparte de la edad de los depósitos, debe haber participación de la elevada precipitación en la alteración física de las cenizas.

La densidad aparente de los suelos varía entre 0,42 a 0,94 Mg m⁻³ y es mayor en los horizontes inferiores (Cuadro 3). El bajo valor de la densidad aparente es provocado por el elevado contenido orgánico y la presencia de componentes no-cristalinos en los suelos. Tales constituyentes son considerados responsables de bajos valores de densidad aparente en Andisoles de Japón (Shoji *et al.*, 1993b). Los suelos Hornopirén tienen, en general, valores de densidad aparente más bajos (0,42-0,67 Mg m⁻³) que los suelos Ñico y Pululil (0,48 - 0,94 Mg m⁻³).

Disolución Selectiva

El resultado de los análisis de disolución selectiva se presentan en el Cuadro 4. La diferencia entre los contenidos de Al_o y Al_p representan la

Cuadro 3. Propiedades físicas seleccionadas de los suelos

Table 3. Selected physical properties of the soils

Prof. (cm)	Horizonte	Tamaño de partículas			Densidad aparente Mg m ⁻³	Retención de agua		
		Arena ←-----%-----→	Limo -----%-----	Arcilla -----%-----		33 kPa ←-----%-----→	1500 kPa -----%-----	Diferencia -----%-----
Pedión 1: Hornopirén I (Volcán Hornopirén)								
0-30	A	42,6	38,9	18,5	0,44	224	168	56
30-60	Bw1	45,4	32,4	22,2	0,48	170	128	42
60-80	2Bw2	61,6	24,6	13,8	0,67	110	78	32
Pedión 2: Hornopirén II (Volcán Hornopirén)								
0-30	A	39,5	35,2	25,3	0,42	167	120	47
30-55	Bw1	62,2	25,6	12,2	0,58	118	74	44
Pedión 3: Ñico (Volcán Apagado)								
0-15	A	47,7	43,0	9,3	0,48	84	61	23
15-28	Bw1	38,3	38,3	22,4	0,66	61	41	20
28-48	BC	17,8	64,9	17,3	0,72	78	48	30
48-68	2C1	24,0	66,9	9,1	nd	37	17	20
Pedión 4: Pululil (Volcán Apagado)								
0-14	A	46,5	40,1	13,4	0,56	62	39	23
14-22	Bw1	66,9	26,4	6,7	0,68	44	21	23
22-35	Bw2	63,1	8,4	28,5	0,76	45	26	19
35-120	Bw3	79,1	14,0	6,9	0,94	27	12	15
120-121,5	Bsm	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
121,5-160	2C1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd

nd = no determinado.

fracción de Al-alofánica/imogolítico (Parfitt y Henmi, 1982) y la diferencia entre el Fe_o y el Fe_p se identifican con el Fe-ferrihidrico. En los suelos del volcán Hornopirén, el contenido de Al_p es mayor que el de Al_o , lo que indica que son los complejos Al-húmicos y no el alofán/imogolita los componentes que dominan la fracción coloidal.

Este hecho se ha observado en otros lugares, por ejemplo, en una toposecuencia de suelos volcánicos altamente orgánicos de Ruanda, a 2.700 m.s.n.m., Nizeyimana *et al.* (1997) detectaron contenidos de Al_p superiores a los de Al_o , con predominio de complejos Al-húmicos. Por el contrario, en los suelos Níco y Pululil el valor de Al_o supera el de Al_p , lo que indica que hay más Al-activo componente de especies no-cristalinas, respecto a los complejos Al-húmicos. Del mismo modo, en los suelos Hornopirén el Fe_o es inferior al contenido de Fe_p , lo que indica la presencia de complejos Fe-húmicos. Existen dudas, sin embargo, sobre la eficiencia del oxalato para extraer Fe-húmico y ferrihidrita, y del pirofosfato para extraer Fe-húmico (Wada *et al.*, 1986; Mizota y van Reeuwijk, 1989). En los suelos Hornopirén coincidiendo con contenidos de alofán bajos, los valores de Si_o son también bajos: 0,16-0,50%. Tales resultados evidencian que en suelos recientes, un elevado contenido de C orgánico inhibe la formación de alofán/imogolita (efecto "anti-alofán"), ya que el Al liberado por la alteración de las cenizas se asocia, no con el Si sino con componentes húmicos formando complejos Al, Fe-húmicos. El Si sobrante origina, preferentemente, sílice opalina.

El tratamiento con ditionito-citrato extrae Fe y Al desde los complejos húmicos, de óxidos hidratados no-cristalinos y también desde óxidos cristalinos como goethita, ferrihidrita y hematita. En los suelos Hornopirén los valores de Fe_d fueron, en general, mayores que los de Fe_o pero inferiores a la suma $Fe_o + Fe_p$, un hecho que indicaría que junto a complejos Fe-húmicos podría haber presencia de minerales de Fe-cristalinos.

Por su parte, en los suelos Hornopirén el Al_d siempre es mayor que el Al_o (1,0-2,9%) un hecho que señala la importancia de las formas de Al-húmicas por sobre las Al-alofánicas.

En referencia al contenido de alofán en los suelos, determinado a partir de los valores de Si extractable con ácido-oxalato (Si_o), presentó valores variables. En los suelos Hornopirén el contenido fluctuaba entre 1 a 4%, en cambio en los suelos Níco y Pululil, el alofán variaba desde 4 a 10%, y desde 3 a 4%, respectivamente.

Se ha utilizado la relación de actividades Fe_o/Fe_d como un índice del grado de cristalinidad o "edad" de los óxidos (Mizota y van Reeuwijk, 1989). En los Andisoles jóvenes esta relación es más alta ($> 0,75$) y más baja en los más antiguos. Sin embargo, las diferencias entre los suelos son pequeñas y no permiten adscribir grandes diferencias de edad ya que, en promedio, el valor de Fe_o/Fe_d fue de 0,35 y 0,6, para los suelos de los volcanes Hornopirén y Apagado, respectivamente.

Si en estos suelos se calcula el contenido de ferrihidrita ($5Fe_2O_3 \cdot 9H_2O$) mediante la proporción de Childs (1985): ferrihidrita (%) = Fe_o (%) x 1,7, este estaría entre 0,1 a 2,9%, que son valores frecuentes en los Andisoles (Cuadro 4). Sin embargo, aunque se estima que el contenido de Fe_o es prácticamente específico de la ferrihidrita (Carlson y Schwertmann, 1981), el oxalato podría disolver también magnetita, lepidocrocita y feroxihita (Parfitt y Childs, 1988).

Mineralogía de las arenas

La mineralogía de las arenas se presenta en el Cuadro 5. Las arenas del volcán Hornopirén están constituidas fundamentalmente por vidrios (67-80%) muy vesiculares, pardo claros junto a otros negros o rojizos, así como abundantes fragmentos escoriáceos negros. En algunos cristales de olivino y plagioclasa se observan burbujas; además, los cristales de plagioclasa, albita/anortita, exhiben marcada zonación. Augita es

Cuadro 4. Análisis de disolución selectiva¹Table 4. Selective dissolution analysis¹

Prof. (cm)	Hori- zonte	Al _o	Al _p	Si _o	Fe _o	Fe _p	Al _d	Fe _d	$\frac{Al_o - Al_p}{Si_o}$	Alofán %	Fe _o / Fe _d	Al _o + 1/2Fe _o %	Al _p / Al _o	Ferrhidrita %
Pedión 1: Hornopirén I (Volcán Hornopirén)														
0-30	A	0,41	0,80	0,16	0,57	1,00	1,06	1,38	2,6	1,1	0,41	0,7	1,92	1,0
30-60	Bw1	1,35	2,46	0,37	0,51	1,16	2,73	1,58	3,6	2,6	0,32	1,6	1,82	0,9
60-80	2Bw2	1,46	1,44	0,50	0,51	0,66	1,74	1,10	2,9	4,0	0,50	1,7	0,98	0,9
Pedión 2: Hornopirén II (Volcán Hornopirén)														
0-30	A	1,06	1,81	0,27	0,79	1,67	2,88	2,47	3,9	1,9	0,32	1,4	1,70	1,3
30-55	Bw1	0,98	1,36	0,32	0,42	0,96	2,77	2,21	3,0	2,3	0,20	1,2	1,38	0,7
Pedión 3: Ñico (Volcán Apagado)														
0-15	A	2,85	1,15	0,66	0,66	0,32	1,66	0,94	2,5	4,8	0,70	3,2	0,40	1,1
15-28	Bw1	2,26	1,27	0,50	0,65	0,58	1,62	1,32	2,0	3,6	0,50	2,6	0,56	1,1
28-48	BC	5,08	1,06	1,47	0,07	0,05	1,53	0,16	2,7	10,4	0,43	5,1	0,21	0,1
48-68	2C1	1,51	0,09	0,79	0,84	0,03	1,13	0,32	1,8	5,6	0,10	1,9	0,06	1,4
Pedión 4: Pululil (Volcán Apagado)														
0-14	A	2,39	1,35	0,48	0,60	0,44	1,39	0,92	2,1	3,4	0,60	2,7	0,56	1,0
14-22	Bw1	1,46	0,23	0,60	1,70	0,07	0,53	2,09	2,0	4,3	0,80	2,3	1,16	2,9
22-35	Bw2	0,87	0,10	0,44	0,46	0,03	0,25	0,55	1,7	3,1	0,80	1,1	0,11	0,8
35-120	Bw3	0,70	0,08	0,40	0,38	0,03	0,20	0,48	1,5	2,8	0,80	0,9	0,14	0,6
120-121,5	Bsm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

¹Al_o, Fe_o, Si_o corresponde a Al, Fe y Si extractables con ácido-oxalato; Al_p y Fe_p constituyen el Al y Fe extractable con pirofosfato-Na; Al_d y Fe_d es el Al y Fe extractables con dittonio-citrato.

Cuadro 5. Composición mineralógica de la fracción arena¹**Table 5. Mineralogical composition of the sand fraction**

Prof. (cm)	Hori- zonte	Ol	CPi	OPI	An	Ap	Opacos	Cuarzo	α-Cr	Opl	FPI	FK	Vidrio	Fr L	Fr P
		←-----Coeficientes de frecuencia ² -----→											←-----%-----→		
Pedión 1: Hornopirén I (Volcán Hornopirén)															
0-30	A	1	2	1			1		1	2	1		76	92	8
30-60	Bw1	1	2				1		1	2	2	1	80	95	5
60-80	2Bw2	2	3			1	1		1		2	1	74	86	14
Pedión 2: Hornopirén II (Volcán Hornopirén)															
0-30	A	1	2	1			1	1	1	2	1	1	75	90	10
30-55	Bw1		1				1		1		1	1	67	92	8
Pedión 3: Ñico (Volcán Apagado)															
0-15	A	1	1	1			1	1		2	1	1	65	94	6
15-28	Bw1	1	3				1	1	1	1	1	1	69	88	12
28-48	BC	1	2				1	2	1		1	1	83	90	10
48-68	2C1	2	1				1	2	1		1	1	88	92	8
Pedión 4: Pululil (Volcán Apagado)															
0-14	A	1	2	1			1		1	2	1	1	59	90	10
14-22	Bw1		3		1		1	tr	1	1	1	1	67	92	8
22-35	Bw2		2	1			1	1	1	1	1	1	62	88	12
35-120	Bw3		1				1		1		1	1		84	16
120-121,5	Bsm														

¹Resultado de análisis por microscopía óptica y difracción de rayos X.

²Coeficientes de frecuencia: 5 = dominante; 4 = abundante; 3 = común; 2 = presente; 1 = escaso.

Ol = olivino; CPi = clinopiroxenos; OPI = ortopiroxenos; An = anfíboles; Ap = apatita; α-Cr = α-cristobalita; Opl = opal; FPI = plagioclasa; FK + feldespato-K; Fr P = fracción pesada ($d > 2,8$); FrL ($d < 2,8$).

el piroxeno monoclinico más común y su contenido disminuye en profundidad, en tanto que el olivino aumenta, especialmente en el suelo Hornopirén II (Cuadro 5). El contenido de la fracción pesada ($d > 2,8$) de estos suelos, varía entre el 5 y 14%, y en los horizontes 2Bw2 y Bw1 de los suelos Hornopirén I y II alcanza a 14 y 8%, respectivamente. Fitoopalitos en forma de cilindros perfectos o como láminas aserradas son abundantes en las muestras superficiales.

Las arenas de los suelos Ñico y Pululil del volcán Apagado están formadas esencialmente por vidrios oscuros y claros (59 a 88%), mezclados con abundantes fragmentos de escoria negra vesicular. En la fracción pesada, que varía entre 6 y 16%, el contenido de olivino es escaso pero constante y, al igual que en las arenas de los

suelos Hornopirén, hay predominio de augita y algo de hiperstena.

La Figura 3a y 3b presenta los diagramas de difracción de rayos X de las arenas de estos suelos confirmando la presencia de augita (2,99Å; 2,53Å; 2,96Å...), algo de hiperstena (2,88Å; 2,56Å...), olivino (2,7Å; 2,51Å; 2,46Å...), además de plagioclasa (albita/anortita): 3,18Å; 3,12Å, 4,04Å...) y feldespato-K (3,24Å; 2,18Å...). La presencia de magnetita (2,53Å) es general en todas las arenas.

Mineralogía de las arcillas

Las arcillas de los suelos del volcán Hornopirén fueron estudiadas mediante difracción de rayos X (RX), microscopía electrónica de transmisión

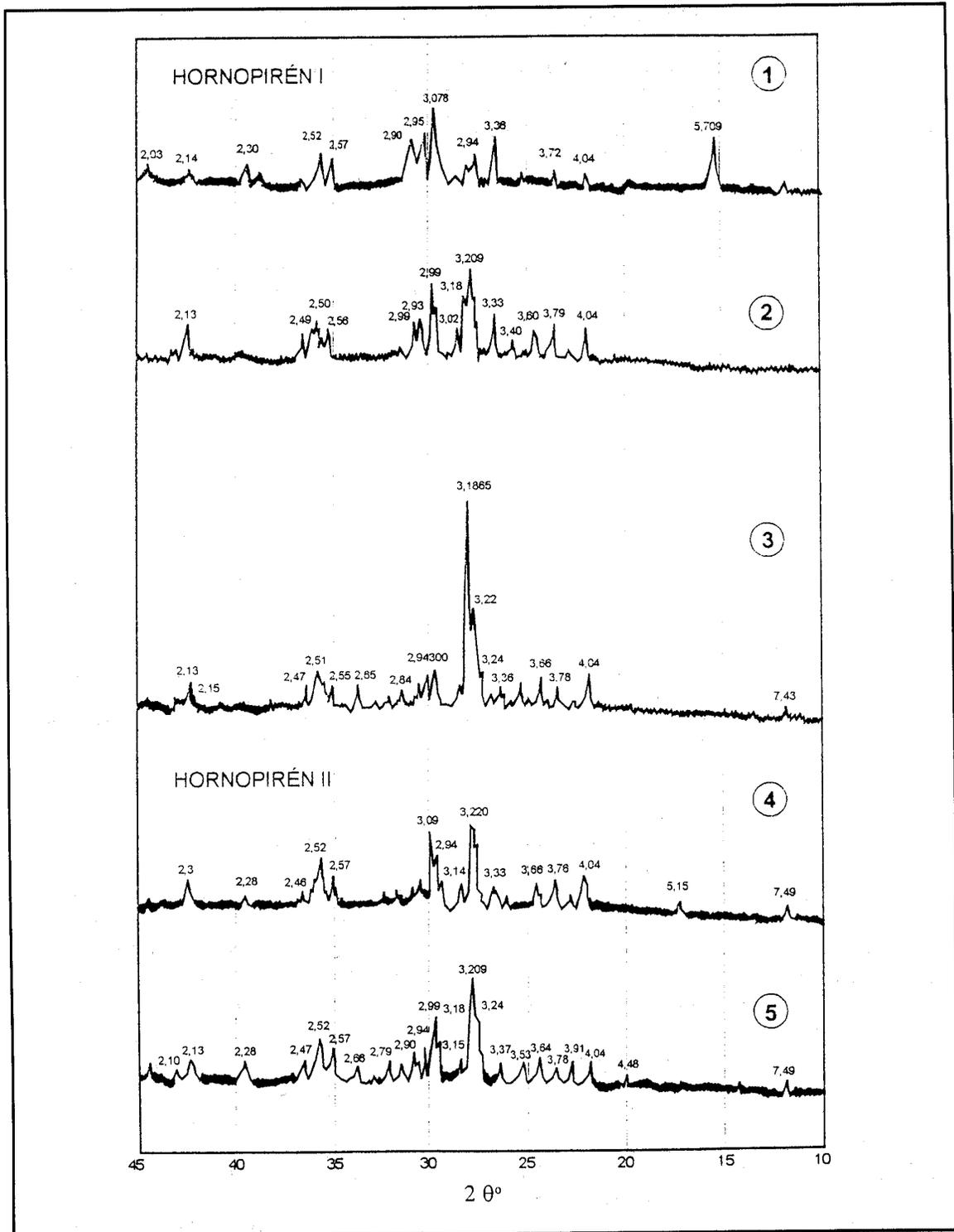


Figura 3a. Difractogramas de la fracción arena (2.000 – 50 µm) de los suelos del volcán Hornopirén.
 Figure 3a. X-ray diffraction patterns of the sand fraction (2.000 – 50 µm) of soils from Hornopirén volcano.

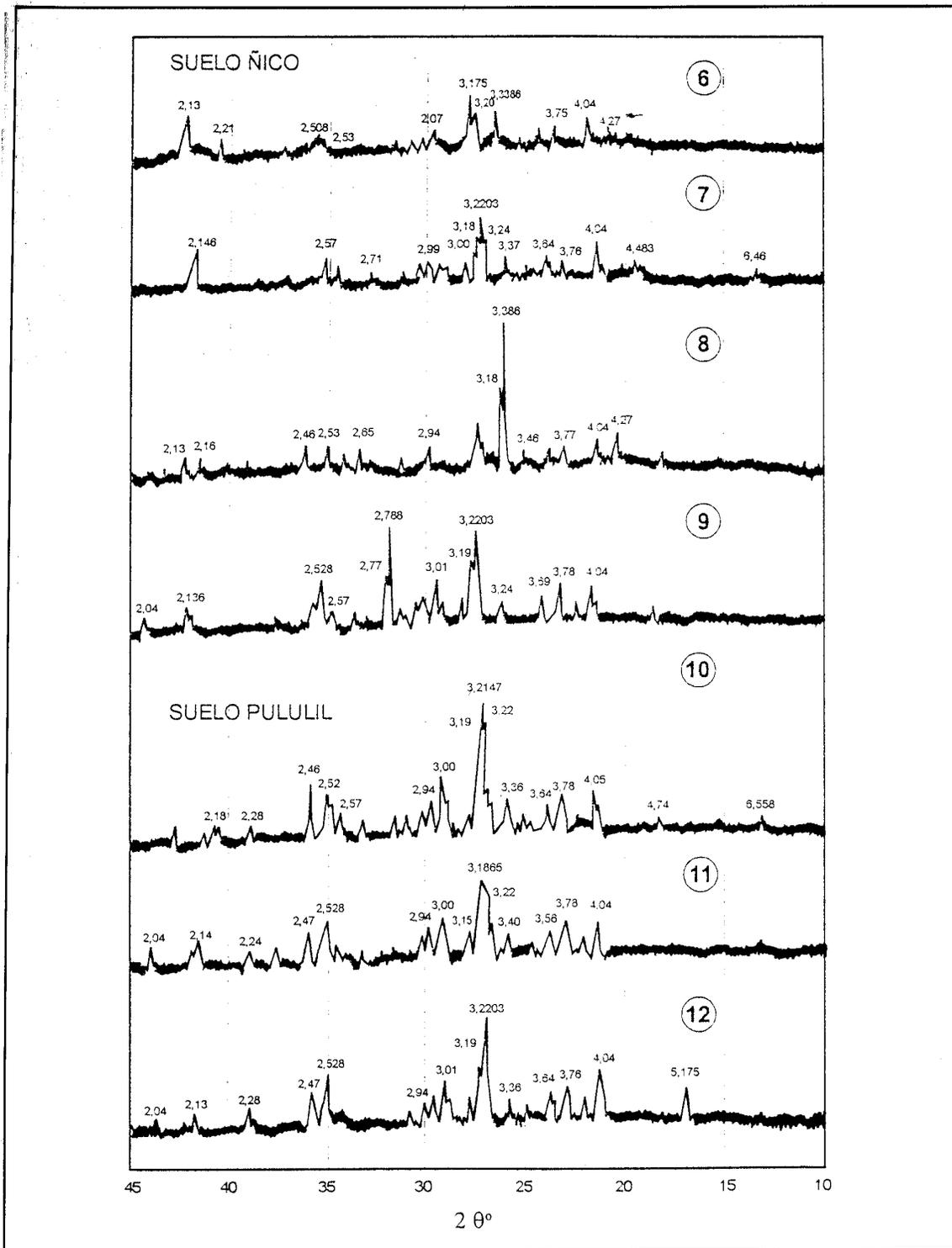


Figura 3b. Difractogramas de la fracción arena (2.000 – 50 μm) de los suelos Ñico (6-9) y Pululil (10-12).
 Figure 3b. X-ray diffraction patterns of the sand fraction (2.000 – 50 μm) of Ñico (6-9) and Pululil (10-12) soils.

(ME) y espectroscopía infrarroja (FT-IR). La composición se muestra en el Cuadro 6.

Los difractogramas (Figura 4a) son pobres en reflexiones, lo que revela su naturaleza eminentemente no-cristalina. En todas las muestras se observan líneas de plagioclasa (3,20Å; 4,04Å), así como otras débiles alrededor de 14,25Å. Estas últimas desaparecen por calentamiento a 550 °C, no se expanden por solvatación con glicerol y parecen corresponder a pequeñas cantidades de un mineral 2:1 cloritizado, existiendo duda si es una esmectita o una vermiculita.

Los espectros IR de las arcillas de los suelos Hornopirén (Figura 5a) presentan junto a bandas de sílice opalina (800; 1095 cm⁻¹), otras de alofán (3443; 963 cm⁻¹). Es posible que el desplazamiento de la banda Si-O, a frecuencias tan bajas como 963 cm⁻¹ pueda haberse originado en un alofán con fuerte despolimerización de la sílice (Besoain, 1985). Algunos hombros a 915 cm⁻¹ son característicos del enlace Al-OH de filosilicatos, un hecho que se relaciona con la reflexión de rayos X a 14,25Å en las arcillas de estos suelos. Todos los espectros presentan fuertes bandas de absorción a 1.700 y 1.620 cm⁻¹, atribuibles a vibraciones asociadas a grupos orgánicos carbo-

Cuadro 6. Composición mineralógica de la fracción arcilla (< 2 mm)¹

Table 6. Mineralogical composition of the clay fraction (< 2 mm)

Prof. (cm)	Horizonte	Q	Pl	α-Cr	Aug	Gibb	Goeth	Al	V/Es	Opl	Clor	Al-Or	Ferrih
←----- Coeficientes de frecuencia ² ----->													
Pedión 1: Hornopirén I (Volcán Hornopirén)													
0-30	A		1	1			1	2		1	1	5	
30-60	Bw1		1	1		1	1	3	tr	1	1	4	
60-80	2Bw2		1	1	1	1	1	5			1	?	
Pedión 2: Hornopirén II (Volcán Hornopirén)													
0-30	A		1	1			1	2	1	1	1	5	
30-55	Bw1		1	1	2	1	1	5		1	1	2	
Pedión 3: Ñico (Volcán Apagado)													
0-15	A	1	1	1		1	1	2	2	1		5	
15-28	Bw1	1	1	1	2	2	1	3	2	1		4	
28-48	BC	1	1	1		2	1	5	2				
48-68	2C1	1	1	1	1	3	1	5	3				
Pedión 4: Pululil (Volcán Apagado)													
0-14	A		1		1		1	3		1			
14-22	Bw1	1	1		2		1	5		1			
22-35	Bw2		tr		tr		1	5					
35-120	Bw3		1		1		1	5	?				
120-121,5	Bsm	3	3				5**	3					1

¹Composición mineralógica integrada a partir de difracción de rayos X, fotometría IR (FT-IR), análisis térmico diferencial.

²Coeficientes de frecuencia: 5 = dominante; 4 = abundante; 3 = común; 2 = presente; 1 = escaso.

Q = cuarzo; Pl = plagioclasa; α-Cr = α-cristobalita; Aug = augita; Gibb = gibbsita; Goeth = goethita y otros óxidos de Fe; Al = alofán; V/Es = interestratificado vermiculita/esmectita; Opl = opal; Clor = clorita; Al-Or = complejos órgano-Al; Ferrih = ferrihidrita.

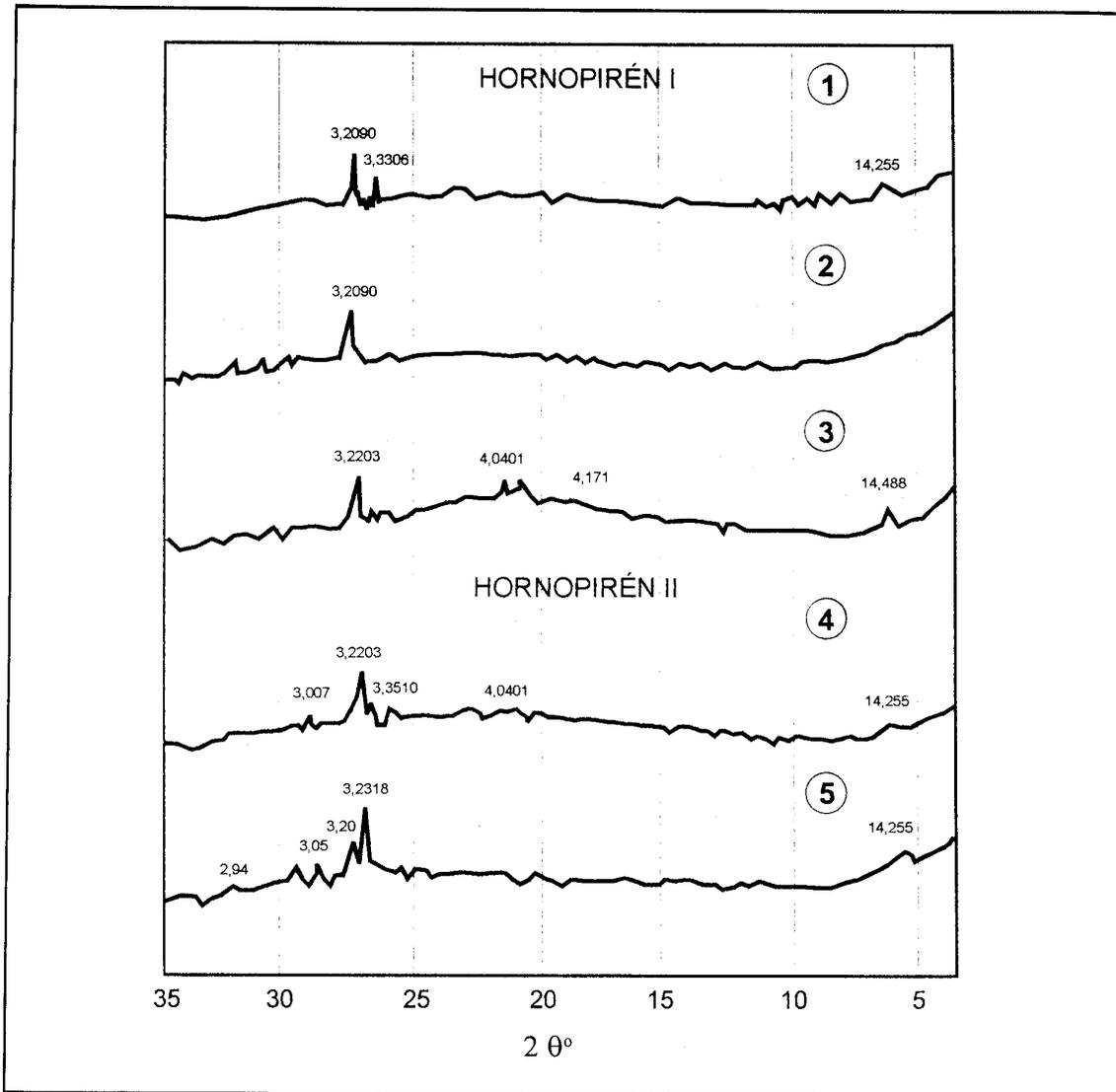


Figura 4a. Difractogramas de las arcillas (< 2 μm) de los suelos Hornopirén I (1-3) y Hornopirén II (4-5).
 Figure 4a. X-ray diffraction patterns of the clay (< 2 μm) from the soils of Hornopirén I (1-3) and Hornopirén II (4-5).

xilo y aromáticos, COOH y C = C, respectivamente, y se estima son bandas usuales en los Andisoles húmicos (Yonebayashi y Hattori, 1989). Las bandas a 1.720 cm^{-1} incrementan su intensidad con la profundidad, un hecho que sugiere que en estos suelos los ácidos húmicos constituyen fases móviles. La banda alrededor de 1200 cm^{-1} se atribuye a vibraciones de deformación C-O y OH de grupos COOH (Yonebayashi y Hattori, 1989; Shoji *et al.*, 1993b).

Microfotografías electrónicas de las arcillas de los suelos Hornopirén (Figura 6) muestran dominancia de alofán e imogolita. El alofán se presenta en forma de esférulos más o menos aglomerados, con diámetro aparente de 100 a 200 Å. Simultáneamente, algunas microfotografías muestran la presencia de finas fibras, aparentemente protoimogolita, soportando, la mayoría, esférulos alofánicos en su superficie, lo que también se ha observado en arcillas de

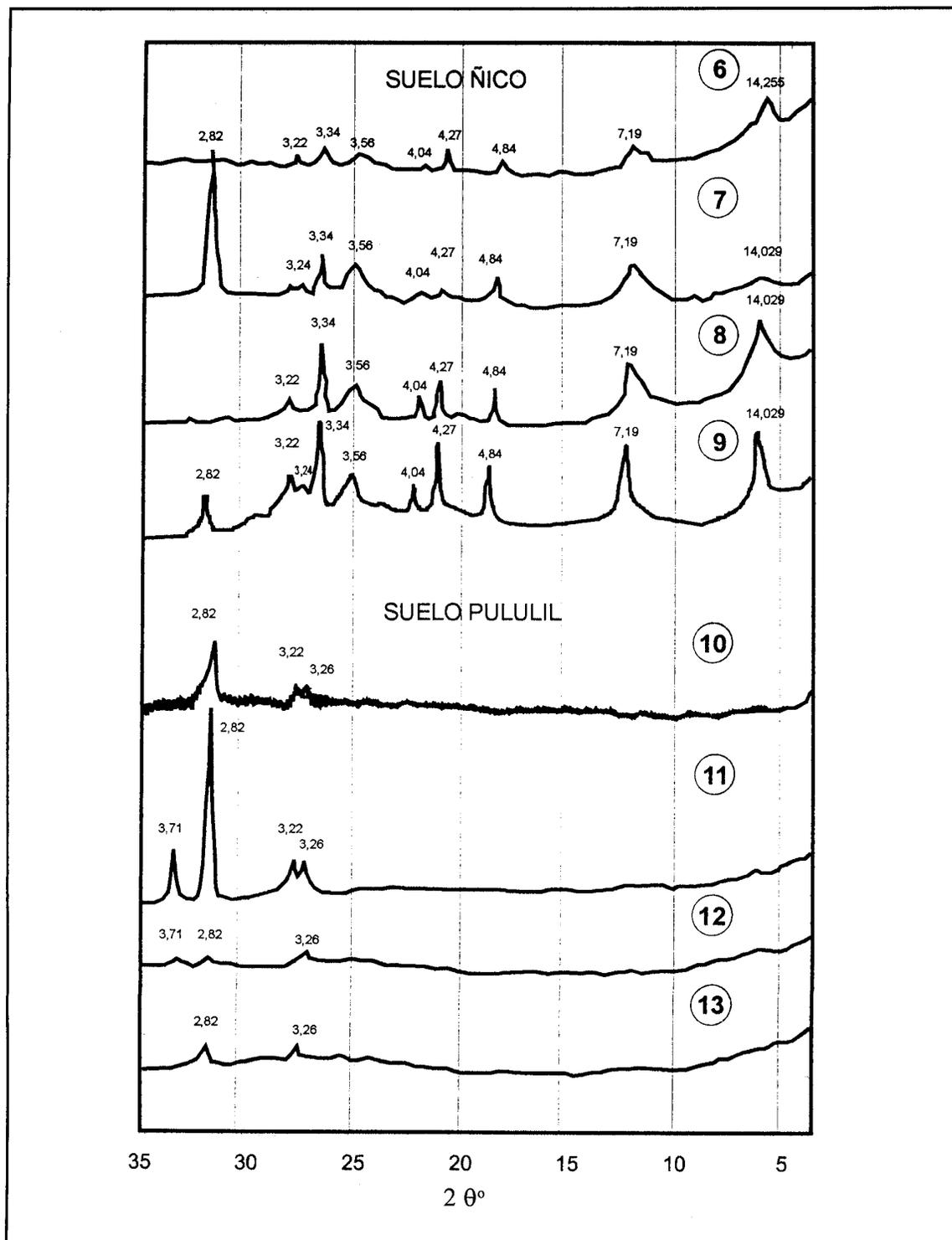


Figura 4b. Difractogramas de las arcillas (<math>< 2 \mu\text{m}</math>) de los suelos Ñico y Pululil provenientes del volcán Hualaihué o Apagado.
 Figure 4b. X-ray diffraction patterns of clay (<math>< 2 \mu\text{m}</math>) of Ñico and Pululil soils from Hualaihué or Apagado volcanoes.

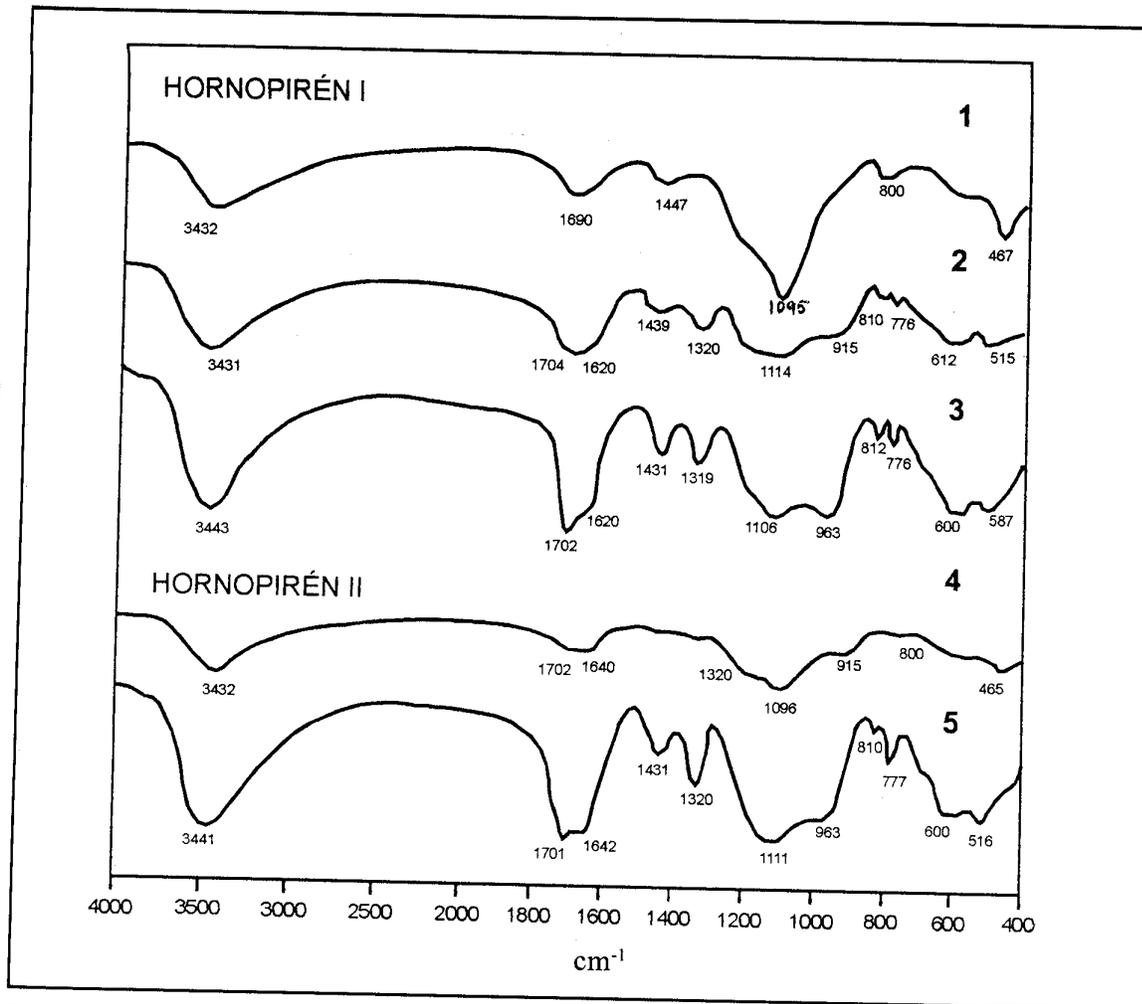


Figura 5a. Espectros infrarrojos (FT - IR) de arcillas (< 2 μm) de los suelos del volcán Hornopirén.
 Figura 5a. Infrared spectrum (FT - IR) of clays (< 2 μm) from the soil of Hornopirén volcano.

otros Andisoles chilenos jóvenes (Besoain, 1968). Otras fotografías (6c) muestran fibras de imogolita mejor desarrolladas. En muestras de los horizontes A (Figura 6a) se ve la presencia de frústulas de diatomeas más o menos intactas, un hecho que se relaciona con las condiciones de elevada humedad y baja temperatura que prevalece en el ambiente de desarrollo. La presencia de diatomeas, fitoopalitos y sílice opalina está también relacionada a la abundante formación de complejos húmicos en los horizontes A, a la supersaturación con Si en la solución del suelo y a la disminución consecuente de la actividad de Al con la sílice.

Las arcillas de los suelos Ñico y Pululil se estudiaron mediante difracción de rayos X, fotometría-IR y análisis térmico diferencial (ATD).

Los difractogramas de las arcillas del suelo Ñico (Figura 4b) muestran un fuerte incremento en la intensidad de las reflexiones con la profundidad del perfil. En tanto el difractograma de la arcilla del horizonte A muestra reflexiones pobres y débiles y predominio de componentes no-cristalinos, la arcilla del horizonte 2Cl es eminentemente cristalina. En todas las muestras se observan reflexiones a 14,02Å; 7,19Å; 4,84Å; 3,56Å. La desaparición del peak de 14Å y 7Å

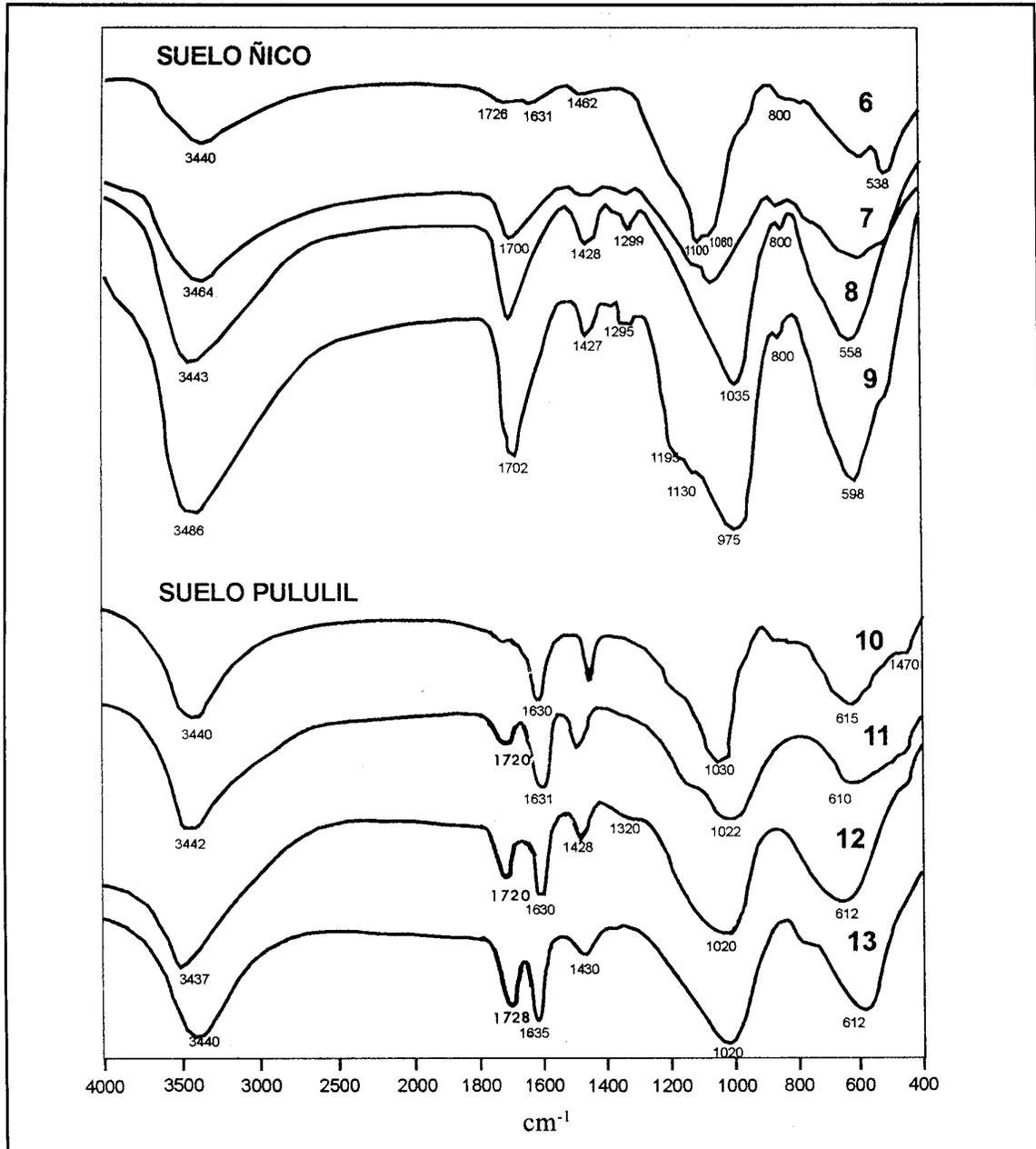


Figura 5b. Espectros infrarrojos (FT – IR) de arcillas ($< 2 \mu\text{m}$) de los suelos Ñico y Pululil, del volcán Hualaihué o Apagado.
 Figure 5b. Infrared spectrum (FT – IR) of clays ($< 2 \mu\text{m}$) of Ñico and Pululil soils from Hualaihué (or Apagado) volcano.

por calentamiento a $550 \text{ }^\circ\text{C}$ y la no-expansión del peak a 14 \AA por glicerolación confirman la presencia de un mineral en relación 2:1 cloritizado, asociado a otro caolínítico. Todas las muestras contienen gibbsita ($4,8 \text{ \AA}$), plagioclasa ($3,2 \text{ \AA}$; $4,04 \text{ \AA}$) y probablemente α -cristobalita.

Los difractogramas de las arcillas del suelo Pululil (Figura 4b) indican que son no-cristalinas; los difractogramas presentan escasas reflexiones destacando sólo las de plagioclasa ($3,2 \text{ \AA}$) y feldespato-K ($3,26 \text{ \AA}$). Débiles interferencias a

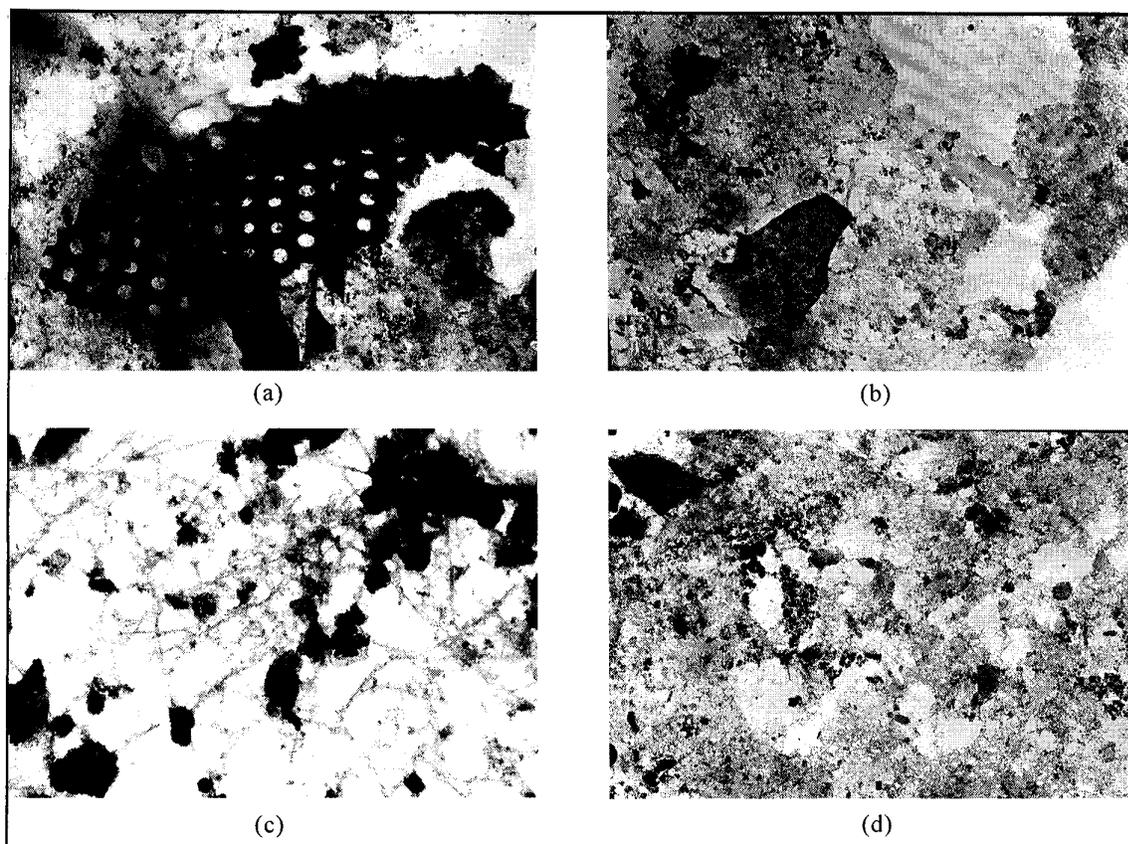


Figura 6. Microfotografías electrónicas. (a) valva de diatomea poco alterada con algo de alofán y fragmentos de vidrio (Hornopirén I, Horizonte A); (b) globoides de alofán aglomerados asociados a fibras incipientes de imogolita (Hornopirén I, Horizonte 2Bw2); (c) fibras de imogolita bien desarrolladas asociadas a alofán (Hornopirén II, Horizonte Bw1); (d) alofán asociado a imogolita, vidrio y probablemente un filossilicato (Hornopirén II, Horizonte Bw1).

Figure 6. Electronic microphotograph. (a) Slightly altered diatom valve with allophane and glass fragments (Hornopirén I, A-horizon); (b) agglomerated rounded allophanic particles associated with embrionic imogolite fibers (Hornopirén I, 2Bw2-horizon); (c) well developed imogolite fibers associated with allophane (Hornopirén II, Bw1-horizon); (d) allophane associated to imogolite, glass and probably to a phyllosilicate (Hornopirén II, Bw1 - horizon).

14Å podrían señalar vestigios de un mineral 2:1, esmectítico o clorítico.

El difractograma de la muestra del horizonte plácico Bsm (no se muestra) sugiere que componentes no-cristalinos asociados a cuarzo (4,27Å; 3,3Å), plagioclasa (3,20Å) y ferrihidrita (2,5Å) son dominantes. El calentamiento de esta muestra a 300 y 500 °C exhibe el desarrollo de líneas débiles de hematita (2,7Å; 2,50Å; 1,82Å), producto de la deshidratación de los óxidos de Fe.

Los espectros-IR de las arcillas de los suelos Ñico y Pululil (Figura 5b) presentan algunas diferencias. Todos son alofánicos (3.440; 975-1.000 cm^{-1}) y la mayoría muestra una banda a 800 cm^{-1} de sílice opalina. Sin embargo, las arcillas del suelo Ñico muestran fuertes bandas de absorción a 1.720, 1.430 y 1.200 cm^{-1} , que son bandas orgánicas asociadas a la presencia de grupos carboxílicos y aromáticos. Al igual de lo que ocurre con las arcillas de los suelos Hornopirén, la banda de absorción a 1.720 cm^{-1} incrementa su intensidad con la profundidad

del perfil, un hecho que sugiere que en estos suelos ha habido una translocación de componentes húmicos móviles. Las arcillas del suelo Pululil también muestran las bandas a 1.720 cm^{-1} pero considerablemente atenuadas, además de otras a 1.430 cm^{-1} que parecen corresponder al espectro de la lignina.

Los termogramas diferenciales de las arcillas de los suelos del volcán Apagado (Figura 7) indican, con excepción del horizonte BC del suelo Ñico, la dominancia de alofán en todos los horizontes: fuerte endotérmico alrededor de $150\text{ }^\circ\text{C}$ y otro exotérmico próximo a $800\text{ }^\circ\text{C}$. Además, todos los termogramas muestran una reacción endotérmica a alrededor de $300\text{ }^\circ\text{C}$ de gibbsita, $\alpha\text{-Al(OH)}_3$ y en algunos, como los horizontes Bw1 y A de los suelos Ñico y Pululil respectivamente, un pequeño endotérmico a $400\text{ }^\circ\text{C}$ que sugiere la presencia de goethita, $\alpha\text{-FeOOH}$ en baja proporción. Finalmente las arcillas de los horizontes Bw1 y sobre todo el BC del suelo Ñico, exhiben endotérmicos a 510 y $520\text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente, asociados probablemente a la presencia de un mineral 2:1 cloritizado.

Implicaciones de Alteración

Dependiendo del régimen de humedad, en la medida que la actividad volcánica constituye un depósito de ceniza (tiempo cero), el proceso de alteración comienza de inmediato. Como se trata de un depósito no-consolidado, formado esencialmente por partículas de vidrio vesicular, de superficie específica elevada y alta capacidad de retención de agua e intensa liberación de nutrientes, se favorece una rápida colonización vegetal. Por ejemplo, luego de la erupción del volcán Hudson en 1991 en los Andes Patagónicos de Chile, con cobertura de más de 80.000 km^2 y espesores de cenizas de centímetros a metros, la recuperación vegetal era completa al cabo de sólo meses a algunos años (Besoain *et al.*, 1995; Bitschene y Mandía, 1995).

En las tefras recién depositadas, la materia orgánica rápidamente inicia la producción de áci-

dos orgánicos que deprimen el pH y estimulan la liberación de bases que se eliminan del sistema. En este ambiente pedogenético rico en MO, se favorece la formación de complejos Al, Fe-húmicos, manteniéndose bajos los pH. El humus compete preferentemente por el Al para formar complejos, de modo que el Al sobrante para coprecipitar con la sílice y formar minerales silico-alumínicos es muy escaso. Es por ello que la estabilización orgánica del Al en el horizonte superficial es un proceso "anti-alofán", que inhibe la formación de alofán/imogolita y estimula la formación de sílice opalina (Besoain, 1985). Los horizontes A de los suelos tienen contenidos orgánicos elevados (CO: 12-25%), alta hidratación y pH H_2O ácidos (5,2-5,7), condiciones que favorecen la formación de complejos Al-Fe-húmicos (Cuadro 2). Ello explica en parte el bajo contenido de alofán/imogolita en los horizontes superficiales (2,8% promedio), como consecuencia de la competencia orgánica por captar Al y Fe.

En los horizontes B disminuye la materia orgánica y el pH aumenta de 5,4 a 6,0, de modo que el Al disponible puede combinarse con el Si solubilizado para formar aluminosilicatos. Como se ve en el Cuadro 4 el contenido de alofán varía entre 2,3 a 10,4% (4,3% promedio). En referencia a la génesis del alofán en Andisoles, Ugolini y Dahlgren (1987, 1991) consideran que en horizontes B inferiores el alofán se forma principalmente por alteración *in situ* con fuerte participación del ácido carbónico. Al aumentar el pH sobre 5 este ácido se disocia; el anión HCO_3^- no quela el Al por lo que este catión puede hidrolizarse y polimerizarse entre pH 5 y 7. El Si soluble, lixiviado desde los minerales primarios de los horizontes superiores, desciende a horizontes B y se combina con el Al polimerizado para formar alofán/imogolita.

Shoji *et al.* (1982), Parfitt y Kimble (1989) y Shoji *et al.* (1993b), otorgan gran importancia a la acidez en la formación de alofán/imogolita; con pH $\text{H}_2\text{O} < 4,9$ se forman preferentemente complejos Al, Fe-húmicos, en tanto que con pH

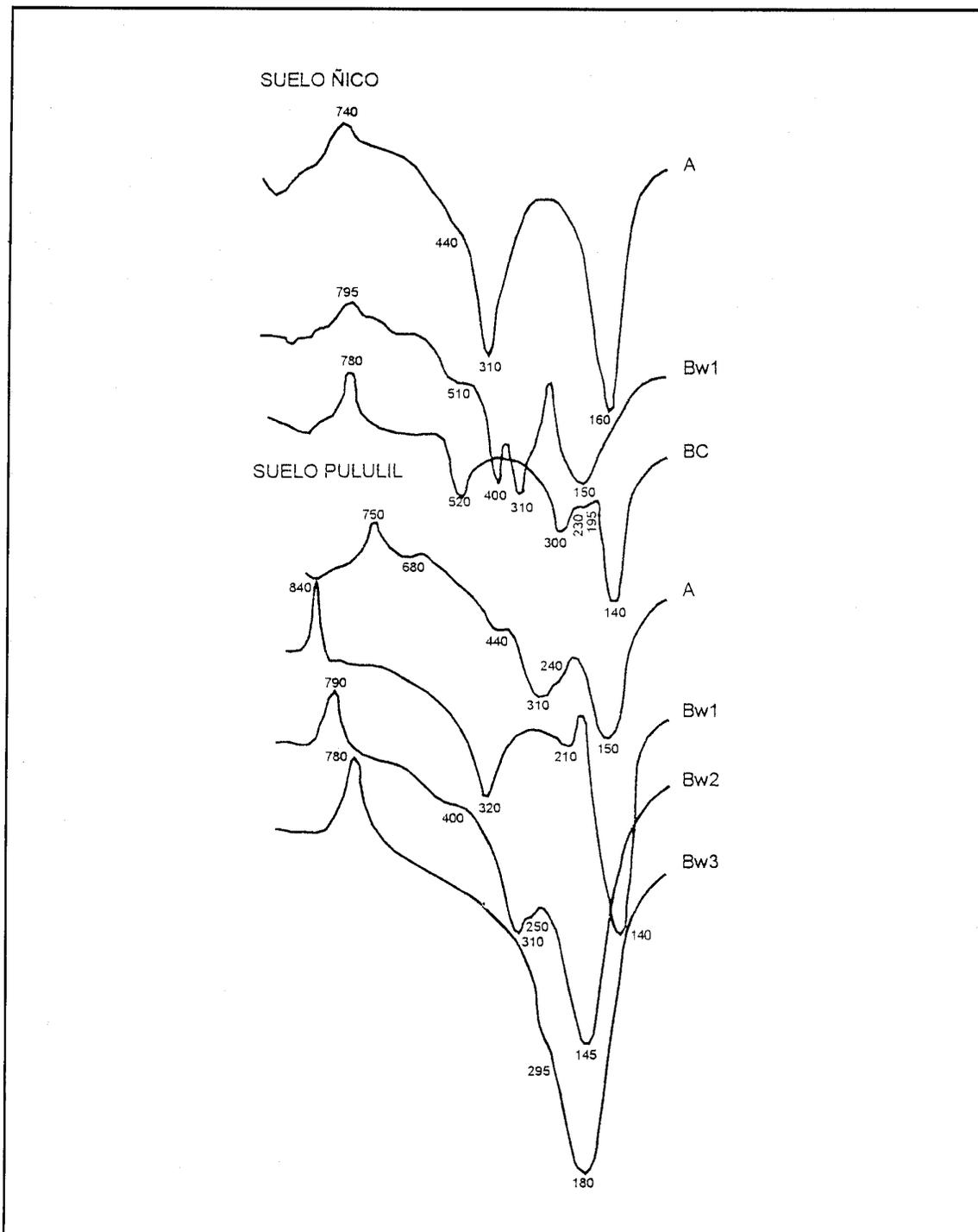


Figura 7. Termogramas diferenciales de las arcillas ($< 2 \mu\text{m}$) de los suelos Níco y Pululil, del volcán Hualaihué o Apagado. (Atmósfera inerte de N; temperatura en $^{\circ}\text{C}$).

Figure 7. Differential thermal analysis diagrams of clay ($< 2 \mu\text{m}$) from Hualaihué (or Apagado) volcano. (In N_2 atmosphere, temperature in $^{\circ}\text{C}$).

$H_2O > 4,9$ se forma alofán/imogolita. Sin duda esta es una tendencia que se manifiesta en los suelos en estudio, pero no hay límites abruptos. En la formación de estos suelos operan factores que condicionan comportamientos heterogéneos, ya que son suelos acrecionarios que reciben aportes periódicos de cenizas volcánicas frescas, y que modifican el curso de la alteración original, aumentando el abastecimiento de bases y el pH. Es frecuente que estos suelos desarrollen un multisequum a medida que incrementan la edad. Tales circunstancias posibilitan la coexistencia de alofán/imogolita y complejos Al, Fe-húmicos, como un hecho normal en los Andisoles. Al respecto, es interesante considerar la influencia del pH, desde la perspectiva de la "composición binaria".

El concepto de "composición binaria" de Mizota y van Reeuwijk (1989) expresa la coexistencia de alofán/imogolita y de complejos Al, Fe-húmico en los Andisoles en un rango de composición continua. La composición binaria se estima calculando la relación Al_p/Al_o que varía desde 0 para una composición de "alofán puro" a 1 para una composición "no alofánica pura". Como se aprecia en el Cuadro 2, la relación Al_p/Al_o en los suelos Hornopirén I y II varía entre 1,0 a 1,9 y cae en el tramo "no-alofánico"; además, los valores Si_o correspondientes son muy bajos. En los suelos Ñico y Pululil los valores Al_p/Al_o varían entre 0,06 y 0,60 y caen en el tramo "alofánico", con aumento simultáneo de los valores Si_o . Se observa también que en todos los perfiles la relación Al_p/Al_o disminuye con la profundidad "con excepciones". En consecuencia, de acuerdo a la relación binaria, mientras los suelos Ñico y Pululil son Andisoles alofánicos, los suelos Hornopirén son Andisoles no-alofánicos.

Aunque en general se estima que todos estos suelos son jóvenes, no se tiene ninguna información sobre la edad real de ellos. Sin embargo, existen estudios que relacionan el Al liberado por meteorización desde las cenizas parentales con la edad de los suelos. Shoji *et al.* (1993a;

1993b), sugieren que el Al_o es el elemento más adecuado para estimar el grado de alteración de los Andisoles jóvenes. El Al liberado por las tefras se incorpora principalmente en el alofán/imogolita y complejos Al-húmicos de los suelos, y puede extraerse selectivamente con una solución de oxalato ácido. Como elemento mayor de las tefras, el Al contenido en los aluminosilicatos no-cristalinos puede usarse para estimar el grado de alteración química cuando la edad del suelo se conoce. La correlación entre la edad del suelo normalizada a 10 °C y el Al, indica que la alteración está expresada como una cinética de orden cero y responde a la ecuación (Shoji *et al.*, 1993a, 1993b):

$$Y = 0,000705 X + 0,57 \quad r = 0,94 \quad n = 18$$

en la cual Y es el Al_o (%) y X la edad en años normalizada a 10 °C.

Al aplicar esta ecuación a los suelos en estudio, desarrollados justamente en un régimen de temperatura promedio de 10 °C y un régimen de humedad údico, puede estimarse el grado de alteración, e.g., edad, en base a los contenidos de Al_o (Cuadro 4). De acuerdo a ello, los horizontes A de los suelos Hornopirén I y II serían muy recientes, con edades alrededor de 200 y 700 años, respectivamente; en cambio, la edad de los horizontes A de los suelos Ñico y Pululil se situarían alrededor de 3.200 y 2.600 años, respectivamente. Si bien este método está diseñado para conocer la cinética de alteración química de suelos de edad conocida y normalizada a 10 °C, posibilita en cierta medida aplicar la ecuación para deducir una edad probable, particularmente de los horizontes húmicos de los Andisoles (ver Cuadro 2).

Clasificación de los Suelos

Siendo estos suelos derivados de cenizas volcánicas, con presencia significativa de alofán/imogolita, ferrihidrita, complejos Al, Fe húmicos y vidrios, es necesario determinar si tienen propiedades ándicas para calificarlos o no como

Andisoles (Soil Survey Staff, 1998). En los suelos Hornopirén I y II, la retención de P supera el 25%, las partículas entre 0,02 y 2 mm exceden el 30% y poseen, además, las siguientes características: (a) $Al_0 + ^\circ Fe_0 > 0,4$, y (b) el contenido de vidrio volcánico supera el 30% en las partículas entre 0,02 y 2 mm (Cuadro 5). Los suelos Ñico y Pululil tienen menos de 25% de carbono orgánico y las siguientes propiedades (a) $Al_0 + ^\circ Fe_0 > 2,0\%$; (b) densidad aparente en la fracción < 2 mm, $< 0,9$ Mg m⁻³, y (c) retención de P $< 85\%$. Los suelos satisfacen las propiedades ándicas y por ello se clasifican en el Orden de los Andisoles. Además, todos se han desarrollado bajo un régimen de humedad údico y de temperatura mésico, por lo que se adscriben al sub-orden de los Udands.

Dentro de ellos, los suelos Hornopirén I y II poseen una retención de agua que es superior al 100% a 1.500 kPa, en capas con espesor superior a 35 cm desde la superficie del suelo mineral a la cúspide del horizonte orgánico, sin contactos líticos o denses, por lo que se estima podrían ser incluidos en el Gran Grupo de los Hydrudans. Algo diferente es el suelo Pululil, que muestra ciertas concomitancias con los "Ñadis" (Placandans); está saturado con agua gran parte del año, posee abundancia de materia orgánica e incluye un horizonte plácico (Bsm) dentro de los 100 cm desde la superficie del horizonte A, por lo que podría asimilarse al gran grupo de los Placudands. La Figura 8 muestra una fotografía del horizonte plácico Bsm siendo visible la lámina de "fierrillo" sobre piedras y gravas.

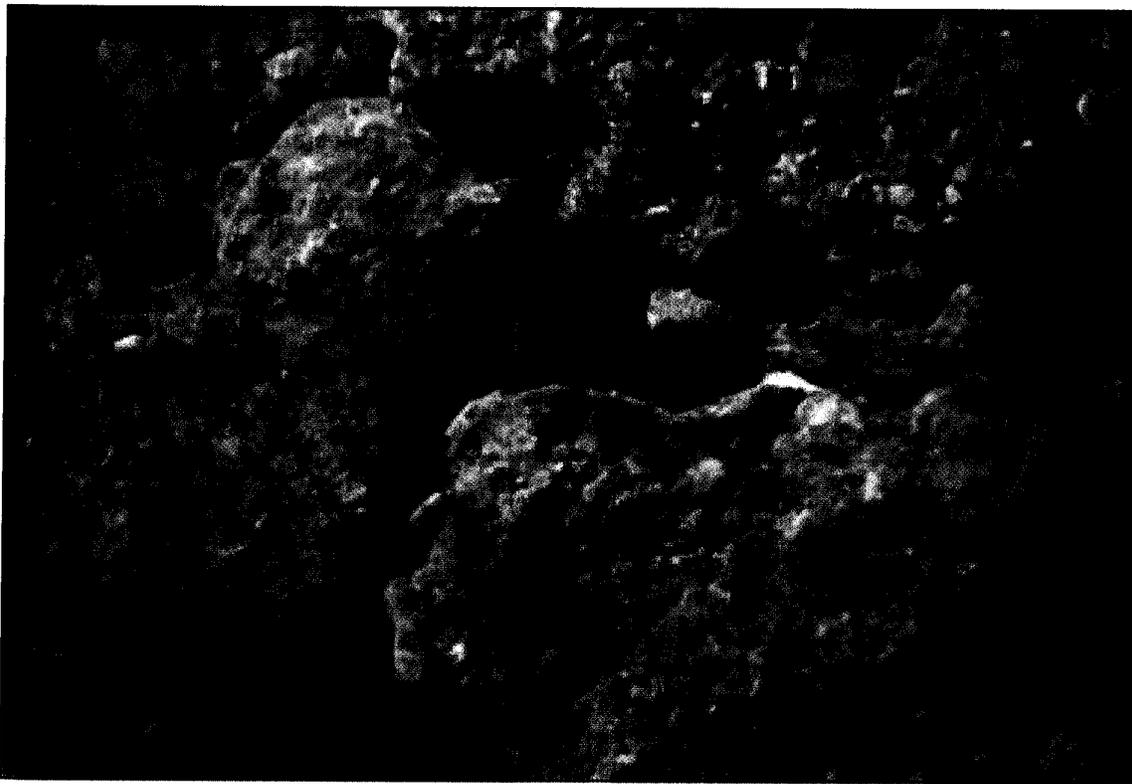


Figura 8. Fragmento del horizonte plácico Bsm (120 – 121,5 cm) del suelo Pululil del volcán Apagado. Se observa la lámina de "fierrillo" sobre gravas y arenas comentadas.

Figure 8. Fragment of the placic horizon Bsm (120–121,5 cm) of the Pululil soil from Apagado volcano. The reddish iron pan above the cemented gravel and sand is visible.

El suelo Ñico es un Udand, que no exhibe un horizonte plácico y los valores de retención de agua son inferiores a 100% a 1500 kPa. El color posee valores de brillo y croma de 3 ó menos, con propiedades de epipedión melánico, por lo que se asimilaría al subgrupo de los Fulvudands.

CONCLUSIONES

Este estudio ha determinado que las propiedades de los suelos se relacionan estrechamente a la naturaleza de las cenizas parentales, a los contenidos de C-orgánico, a la edad y clima de la zona. Bajo cubierta de bosque con elevado aporte orgánico, se forman preferentemente complejos Al, Fe-húmicos que frenan la formación de alofán/imogolita en los horizontes superficiales, pese a lo cual el contenido de alofán se incrementa moderadamente en los horizontes B. Es también muy importante la "edad" o estado de alteración de los depósitos. En base al criterio de Shoji *et al.* (1993a; 1993b), utilizando los contenidos de Al_o, los horizontes A de los suelos Hornopirén (200 y 700 años) resultan ser considerablemente más jóvenes que los suelos Ñico y Pululil (3.200 y 2.600 años). La presencia de complejos orgánicos en los horizontes inferiores de todos los suelos, como lo indican los espec-

tros-IR, sugiere que ellos son parcialmente móviles y se translocan.

Sobre la base de los contenidos de Al_o + Fe_o en los suelos, los contenidos de alofán/imogolita y la aplicación de la ecuación de Shoji *et al.* (1993a; 1993b) sobre la cinética de meteorización de Andisoles jóvenes, los suelos del volcán Hornopirén parecen ser más jóvenes que los suelos Ñico y Pululil del volcán Apagado.

Exceptuando diferencias locales, las propiedades de los suelos y la mineralogía de las arcillas no difieren mayormente de aquellas que tienen los suelos volcánicos situados al norte o sur de Chiloé Continental, bajo condiciones de precipitación más moderadas.

El hecho que los suelos exhiban propiedades ándicas en más del 60% del espesor de los perfiles, y estén sometidos a un régimen de humedad údico, los califica en el Orden de los Andisoles, Sub-Orden Udands. Dentro de ellos, los suelos Hornopirén se incluirían en el gran grupo de Hydrudands, el suelo Ñico se identificaría más bien como un Fulvudand (horizonte plácico dentro de 100 cm) y el suelo Pululil como un Placudand (epipedión con brillo y croma de 3 ó menos, C-orgánico sobre 6%, melánico).

RESUMEN

Se estudiaron cuatro Andisoles provenientes de los volcanes Hornopirén y Hualaihué o volcán Apagado, situados en Chiloé Continental, provincia de Palena, X Región (41° 53' S). Los suelos están localizados en las faldas de los volcanes, en un relieve abrupto cubierto con una densa foresta pluvial, muy húmeda, de 4.000 a 5.000 mm de precipitación anual, y temperatura media anual de 10°C. Se describió la morfología de los suelos y se determinaron sus propiedades químicas, físicas y mineralógicas. Los pediones son profundos y sus variaciones texturales sugieren la participación de varios episodios

eruptivos. Todos los suelos se caracterizan por tener un horizonte A grueso, con elevado contenido de materia orgánica (12-25% C-orgánico), valores elevados a moderados de retención de agua a 1500 kPa, altos valores de retención de fósforo (> 90%), con la excepción de los horizontes sub-superficiales del suelo Pululil. La CIC es moderada a alta y la saturación de bases es muy baja.

El contenido de vidrios volcánicos es muy alto (59-88%) y tiende a aumentar con la profundidad del perfil; la mayoría de los vidrios tienen bur-

bujas. Los coloides de los suelos son alofánicos, pero en la superficie prevalecen los complejos Al, Fe-húmicos. Sílice opalina también se encuentra en el horizonte A de todos los pediones. Los suelos satisfacen las propiedades ándicas y pertenecen al Orden de los Andisoles, suborden de los Udands.

Palabras claves: Andisoles, cenizas volcánicas, alofán.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Encargada del Laboratorio de Química de Suelos del INIA-CRI La Platina Sra. M. A. Sadzawka por llevar a cabo los análisis de disolución selectiva y de caracterización de los suelos. Se agradece al Dr. F. Colmet-Daage, de ORSTOM-Francia, por haber proporcionado las muestras de los suelos del volcán Hornopirén.

LITERATURA CITADA

- BESOAIN, M. E. 1968. Imogolite in volcanic ash soils of Chile. *Geoderma* 2: 151-159.
- BESOAIN, M. E. 1985. Génesis y transformación de los minerales de arcilla en suelos derivados de cenizas volcánicas del centro-sur de Chile. *In: Tosso, J. (Ed.). Suelos Volcánicos de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro de Investigación La Platina. Santiago, Chile. p. 275-284.*
- BESOAIN, M. E.; RUIZ SCH., R. Y HEPP K., CH. 1995. La erupción del volcán Hudson, X Región, y sus consecuencias para la agricultura. *Agricultura Técnica (Chile)* 55: 204-219.
- BITSCHENE, P. R. Y MENDIA, J. (EDS.). 1995. La erupción del volcán Hudson (Andes Patagónicos) en agosto 1991: mil días después. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco y Servicio Nacional de Geología. Comodoro Rivadavia, Argentina. Covillier Verlag. Göttingen, Alemania. 164 p.
- BLAKE, G. R. AND HARTGE, K. H. 1986. Bulk density. *In: Klute, A. (Ed.). Methods of soil analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. p. 363-375.*
- BLAKEMORE, L. C.; SEARLE, P. L. AND DALY, B. K. 1987. Methods of chemical analysis of soils. New Zealand Soil Bureau. Lower Hutt, New Zealand. Scientific Report 80 p. 44-45.
- CARLSON, L. AND SCHWERTMANN, U. 1981. Natural ferrihydrites in surface deposits from Finland and their association with silica. *Geochim. Cosmochim. Acta* 45: 421-429.
- CHILDS, C. W. 1985. Towards understanding soil mineralogy. II. Notes on ferrihydrite. New Zealand Soil Bureau. Lower Hutt, New Zealand. Laboratory Report CM7.
- HERVE, M. 1984. La zona de la falla Liquié-Ofqui, en Liquiñe. Universidad de Chile, Departamento de Geología y Geofísica. Santiago, Chile. Comunicaciones N° 34: p. 101-105.
- JACKSON, M. L. 1972. Soil methods of analysis. Advanced Course. Wisconsin University. Madison, Wisconsin, USA. (Mimeograph). 780 p.
- KILMER, V. J. AND ALEXANDER, L. T. 1949. Methods for making mechanical analysis of soils. *Soil Science* 68: 15-24.

- KÜHNE, A.; PERALTA, M.; EGUILLOR, P. Y OYANDEL, E. 1985. Distribución, características, potencialidad y manejo de los suelos bajo alerce (*Fitzroya cupressoides*) en la X Región. Informe I. Corporación Nacional Forestal (CONAF). Boletín N° 16. 89 p.
- LÓPEZ, C. R.; COLMET-DAAGE, F. Y PLANAS, F. H. 1994. Aporte de los volcanes de la cordillera andino-patagónica a los suelos argentino-chilenos, entre los paralelos 42° y 44° L.S. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Bariloche. Bariloche, Argentina. 11 p.
- LÓPEZ-ESCOBAR, L.; KILIAN, R.; KEMPTON, P. D. AND TARIGI, M. 1993. Petrography and geochemistry of Quaternary rocks from the Southern Volcanic Zone of the Andes between 41°30' and 46°00' S., Chile. *Revista Geológica de Chile* 20: 33-56.
- LÓPEZ-ESCOBAR, L.; TARIGI, M. AND VERGARA, M. 1991. Geochemical features of Southern Andes Quaternary volcanics between 41°50' and 43°00' S. *Geologic Soc. of America. Special Paper* 265: 45-56.
- LOWE, D. J. AND GREEN, B. E. 1992. A hydro-fluoric acid method for determining volcanic glass content of tephra-derived soils (Andisols). *Austr. J. Soil. Res.* 30: 573-581.
- MIZOTA, C. AND VAN REEUWIJK, L. P. 1989. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC). Wageningen, Holand. *Soil Monograph* 2. 185 p.
- NIZEYIMANA, E. 1997. A toposequence of soils derived from volcanic materials in Rwanda: Morphological, chemical and physical properties. *Soil Science* 162: 350-360.
- NIZEYIMANA, E.; BICKI, T. J. AND AGBU, P. A. 1997. An assessment of colloidal constituents and clay mineralogy of soils derived from volcanic materials along a toposequence in Rwanda. *Soil Science* 162: 361-371.
- NOTSU, K.; LÓPEZ-ESCOBAR, L. AND ONUMA, N. 1987. Along-arc variation of Sr-isotope composition of volcanic rocks of the Southern Andes (33° S-55° S). *Geochemical Journal* 21: 307-313.
- PARFITT, R. L. AND HENMI, T. 1982. Comparison of an oxalate-extraction method and infrared spectroscopic method for determining allophane in soil clays. *Soil Sci. and Pl. Nutr.* 18: 183-190.
- PARFITT, R. L. AND CHILDS, C. W. 1988. Estimation of forms of Fe and Al. A review and analysis of contrasting soils by dissolution and Mössbauer spectroscopy. *Austr. Soil Res.* 26: 121-144.
- PARFITT, R. L. AND KIMBLE, J. M. 1989. Condition for formation of allophane in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 971-977.
- PERALTA, M.; KLENNER, M. N.; BESOAIN, M. E. Y GONZÁLEZ, M. S. 1979. Suelos forestales representativos de la cordillera de Los Andes. Un transecto en el sector de Contao, Provincia de Chiloé, X Región. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Santiago, Chile. *Boletín Técnico* N° 55. 38 p.
- SADZAWKA R., M. A. 1990. Métodos de Análisis de Suelos. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación La Platina. Santiago, Chile. *Serie La Platina* N° 16. 130 p.
- SHOJI, S.; FUJIWARA, Y.; YAMADA, I. AND SAIGUSA, M. 1982. Chemistry and clay mineralogy of Ando Soils, Brown forest soils and Podzolic soils formed from recent Towada ashes, Northeastern Japan. *Soil Science* 133: 69-86.

- SHOJI, S.; NANZYU, M.; SHIRTO, Y. AND ITO, T. 1993a. Chemical kinetics of weathering in young Andisols from northeast Japan using age normalized to 10 °C. *Soil Science* 155: 53-60.
- SHOJI, S.; NANZYU, M. AND DAHLGREN, R. A. 1993b. Volcanic ash soils. ELSEVIER. Developments in Soil Science 21. Amsterdam, Holland. 288 p.
- SOIL SURVEY STAFF. 1998. Keys to Soil Taxonomy (Eight ed.) United States Department of Agriculture, National Resources Conservation Service. Washington D.C., USA. 326 p.
- TAGIRI, M.; LÓPEZ-ESCOBAR, L. AND ONUMA, L. N. 1985. Preliminary report of a geochemical study of thirteen volcanoes in the Southern South Andes volcanic belt (42°-46°S). *In: Geochemical Investigation of the Southern Andean Volcanic Belt, 1982-1984. Special Publication. Irapaki University, Japan, and Chile University.* p. 161-194.
- UGOLINI, F. C. AND DAHLGREN, R. A. 1987. The mechanism of podzolization as revealed by soil solution studies. *In: Righi, D. and Chauvel, A. (Eds.). Podzols and Podzolization. Association Fr. Etudue de Sol. Plaisir, France.* p. 195-203.
- UGOLINI, F. C. AND DAHLGREN, R. A. 1991. Weathering environments and occurrence of imogolite/allophane in selected Andisols and Spodosols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1166-1171.
- WADA, K. 1985. The distinctive properties of Andisols. *In: Stewart, B.A. (Ed.). Advances in Soil Science 2. Springer Verlag. New York, USA.* p. 173-229.
- WADA, K.; KAKUTO, Y. AND IKAWA, H. 1986. Clay minerals, humus complexes and classification of four "Andepts" of Maui Hawaii. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1007-1013.
- YONEBAYASHI, K. AND HATTORI, T. 1989. Chemical and biological studies on environmental humic acids. II. H-NMR and Spectra of Humic Acids. *Soil Sci. Plant. Nutr.* 35: 383-392.