

VARIABILIDAD PEDOGENÉTICA Y PRODUCTIVIDAD FORESTAL A TRAVÉS DE UNA TOPOSECUENCIA (REGIÓN EXTRANDINA - SO NEUQUÉN)

ADRIANA SUÁREZ^{1*}; PATRICIA BROQUEN¹; JORGE LUIS GIRARDIN¹ & FERNANDO CHIODI¹

Recibido: 25-10-12

Recibido con revisiones: 07-09-13

Aceptado: 01-10-13

RESUMEN

El objetivo del trabajo es estudiar la variabilidad de los suelos de una toposecuencia característica de la Región Extrandina bajo estepa subarbutiva graminosa (ESG) a modo de evaluar sus cualidades para el uso forestal con *Pinus ponderosa* (PP) y profundizar el conocimiento de los suelos de cenizas volcánicas. Los depósitos de materiales piroclásticos poseen mayor espesor en la ladera exposición NE (sotavento) que en la NO (barlovento) determinando suelos con *solum* más delgados. Las propiedades de los suelos entre ambas laderas son notablemente diferentes, a sotavento están caracterizadas por la presencia de las cenizas volcánicas, son profundos (80 a 130 cm), con una secuencia A-Bw-2C, baja densidad aparente (0,9 a 1,1 Mg m⁻³). A barlovento el espesor de la ceniza depositada es menor a 30 cm por lo que la meteorización del material subyacente -toba- que evoluciona a arcilla, determina las propiedades por debajo del horizonte A. Este suelo es somero (30 a 50 cm), con una secuencia A-2Btss-2Cr, densidad aparente media (1,2 a 1,3 Mg m⁻³). El espesor del horizonte A es mayor bajo PP que bajo ESG (ladera NE: PP 36 cm, ESG 30 cm; ladera NO: PP 15 cm, ESG: 11 cm). Esta diferencia puede atribuirse al efecto protector de la forestación por la mayor cobertura del suelo y la presencia de un horizonte O. El crecimiento volumétrico del PP es un 50% mayor a sotavento que a barlovento, consecuencia de las diferencias en las características de los suelos, a sotavento favorecido por la profundidad sin limitantes para el desarrollo de las raíces y texturas arcillosas en la base del perfil; a barlovento limitado por la escasa profundidad del suelo y por los cambios estacionales de la estructura del horizonte Btss que causan asfixia y estrangulamiento de las raíces.

Palabras clave. Molisoles, ceniza volcánica, suelo-paisaje, uso forestal, Neuquén, Argentina.

PEDOGENETIC VARIABILITY AND FOREST PRODUCTIVITY ACROSS A TOPOGRAPHIC SEQUENCE (EXTRANDINIAN REGION SW NEUQUÉN)

ABSTRACT

The objective of this research was to study soil variability related to landscape changes through a typical toposequence, under grass shrub steppe (ESG) at the Extrandinian Region in order to evaluate forest soil quality for Ponderosa pine (PP) production and to acquire knowledge on volcanic ash soils. Volcanic ash deposition was higher on the windward side of the slope (NE exposition) compared to the NW side of the slope, producing deeper solums in the former. Soil features are remarkably different between both sides of the slope. On the leeward side, soil properties are determined by volcanic ash; they are deep (80 to 130 cm), with a horizon sequence A-Bw-2C, low bulk density (0.9 to 1.1 Mg m⁻³) and andic properties with volcanic glass throughout the whole soil profile (H_v 25%). On the windward side, soil properties were determined by the underlying material -tuff- which evolved to clay, they are shallow (30-50 cm), with a horizon sequence A-2Btss-2Cr, medium bulk density (1.2 to 1.3 Mg m⁻³) and presence of swelling clays. The A horizon depth was higher under PP (NE hillside: PP 36 cm, ESG 30 cm; NW hillside: PP 15 cm, ESG: 11 cm). This difference between PP and ESG can be attributed to the protective effect of afforestation. Volumetric growth of PP was 50% higher on the leeward side of the slope than on the windward side. This was favoured by soil depth, the absence of limiting features for root development and the clayey textures at the bottom of the soil profile. PP growth on the windward side of the slope was limited by soil depth and seasonal changes affecting the Btss horizon structure that causes excessive root compression.

Key words. Mollisols, volcanic ash, soil-landscape, forest use, Neuquén, Argentina.

¹ Asentamiento Universitario San Martín de los Andes. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Comahue. Pasaje de la Paz 235 (8370). San Martín de los Andes. Neuquén. Argentina. Tel.: (54) (2972) 427618 int. 18. *Autor de contacto: adri-suarez@hotmail.com.

INTRODUCCIÓN

La comprensión de las relaciones suelo-paisaje en una determinada zona permite establecer patrones de distribución de los suelos así como predecir su comportamiento. Es sabido que existen relaciones que producen una serie de cambios en las propiedades de los suelos desde los componentes más altos a los más bajos de una toposecuencia. A nivel general las relaciones suelo-paisaje son controladas por la localización geográfica (latitud y altitud), por las características de la forma del paisaje (inclinación, longitud y orientación) y por la posición del suelo en la forma en el mismo. Estos factores son importantes en la determinación de las secuencias y también lo es el material parental y su meteorización (Gerrard, 1992).

El término "suelos de cenizas volcánicas" es comúnmente usado para designar a los suelos formados sobre tefras o materiales piroclásticos tanto en el mundo (*i.e.*: Tan, 1985; Shoji *et al.*, 1993; Ugolini & Dhalgren, 2002; Takahashi & Shoji, 2002) como a nivel regional en la Argentina (*i.e.*: Colmet Daage *et al.*, 1988; Irisarri & Mendía, 1997; Gaitán & López, 2007). En este trabajo se utiliza el término "cenizas volcánica" acorde con los autores antes mencionados. Las cenizas tuvieron y tienen una gran dispersión en la Patagonia, en particular en la provincia del Neuquén, estas conjuntamente con el clima dan a la zona sus principales características en cuanto al tipo de suelo, vegetación y alta productividad (Ferrer *et al.*, 1990; Colmet Daage *et al.*, 1988; Broquen *et al.*, 2005; Candan & Broquen, 2009; Gaitán & López 2007).

En la región, se encuentra un patrón general de distribución de las cenizas volcánicas determinado por la dirección del viento dominante, los cambios del relieve, la orientación y gradiente de la pendiente. Las cenizas recubren un paisaje glaciario (con formas y sedimentos característicos) con espesores más homogéneos hacia el este que al oeste. En la Región Extrandina, en el SO de la provincia del Neuquén —donde la vegetación realmente dominante es la estepa subarbutiva graminosa— estas relaciones son más manifiestas que en la Región Andina con vegetación boscosa. El espesor del manto de cenizas supera los 2 m hacia el oeste en proximidades de la Cordillera de los Andes y disminuye hacia el este a espesores inferiores a 1 m. Se encuentran variaciones locales que acompañan los cambios en las exposiciones de las laderas, las protegidas del viento presentan una mayor acumulación de cenizas volcánicas que las expuestas al mismo (Colmet Daage *et al.*, 1988; Irisarri & Mendía, 1997; Gaitán & López, 2007). En la provincia del Neuquén, en particular en el ecotono bosque-estepa, las forestaciones han aumentado en las úl-

timas décadas y su principal propósito ha sido la producción de madera. La especie comercialmente más utilizada en la región es el *Pinus ponderosa* Dougl.

En el ecotono bosque-estepa, donde el proceso de desertificación por pastoreo es creciente, las forestaciones con *Pinus ponderosa* evidencian un efecto protector frente a la erosión hídrica y eólica ya que favorecen la infiltración del agua y frenan la escorrentía, lo que incide en la hidrología (Broquen *et al.*, 2003). Dado que los procesos erosivos son más acentuados en las laderas expuestas al viento, el rol de las forestaciones es crítico en el control de la erosión en esas exposiciones. Esto implica considerar, además de la producción de madera, otras funciones de la forestación tales como su incidencia en la conservación del ambiente y la sustentabilidad del sistema. Para lograr un uso forestal sustentable, es importante lograr un conocimiento y manejo de la productividad en el largo plazo con el objetivo de evitar daños irreversibles y lograr una tendencia no declinante de la potencialidad productiva, garantizando la protección y/o mejora del suelo (Broquen *et al.*, 2008).

Tal como se planteó anteriormente, si bien existe un patrón regional en la distribución de las cenizas volcánicas se encuentran variaciones a nivel local y de predio que también tienen un patrón de distribución particular asociado a los cambios en el relieve. El relieve como elemento del paisaje junto con la influencia de los vientos dominantes adquiere gran relevancia para la selección de los sitios para forestar.

Los objetivos del trabajo son: a) estudiar la variabilidad de los suelos en una toposecuencia característica de la Región Extrandina, b) la variación de sus rasgos en el paisaje a modo de evaluar su potencialidad para un uso forestal sustentable en la Región Extrandina del Neuquén y, c) profundizar el conocimiento de los suelos de cenizas volcánicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada fue la de estudio de casos lo que permite analizar el fenómeno objeto de estudio en su contexto real mediante la utilización de múltiples fuentes de evidencia, cuantitativas y/o cualitativas, simultáneamente. Se parte de lo que plantea Zinck (2012) que las formas del terreno y los suelos comparten los factores de formación y de la observación general que los procesos pedológicos están bajo control geomorfológico. Es de aceptación común que hay relaciones entre suelos y paisajes, en este sentido consideramos el paisaje topográfico y sus variaciones según la exposición de las laderas.

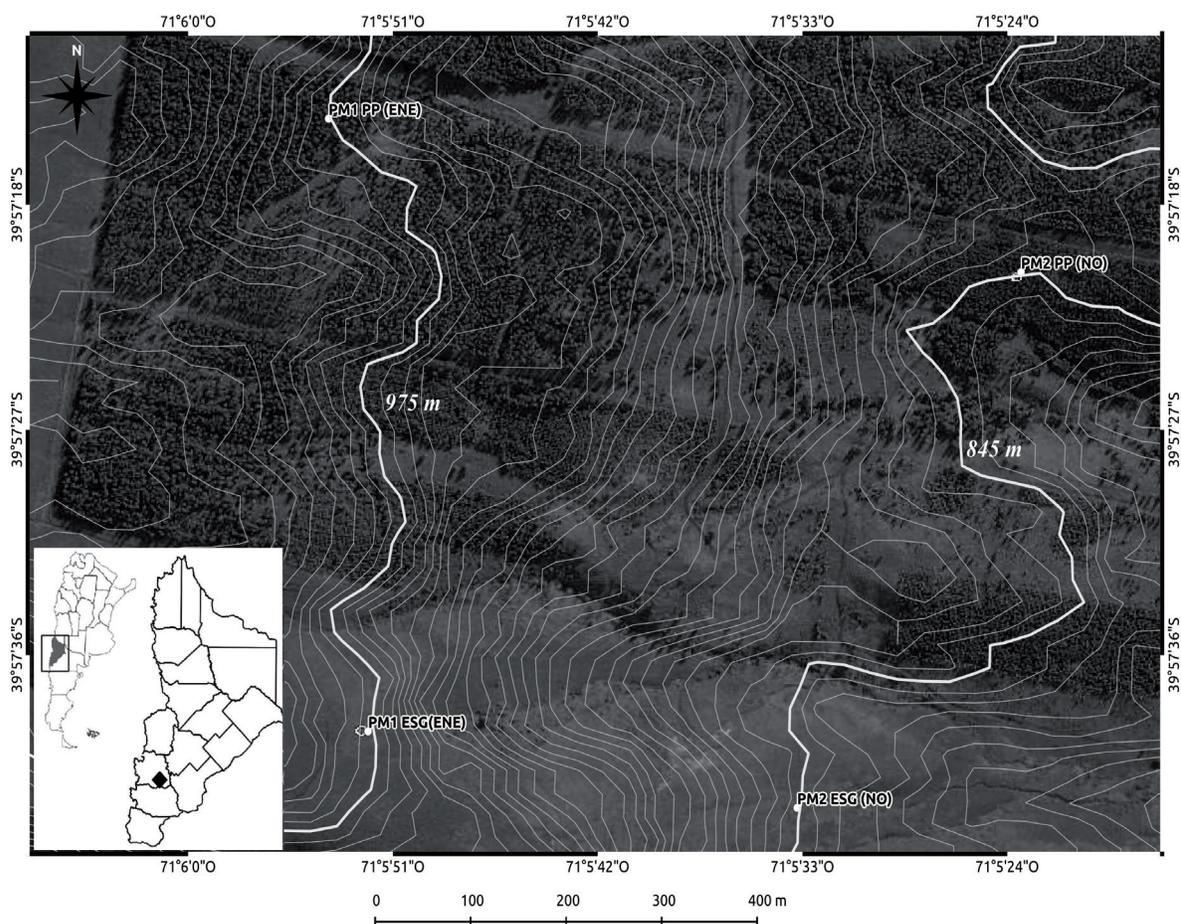


Figura 1. Ubicación de la toposecuencia y sitios de estudio en la pendiente inferior en la ladera ENE y NO bajo estepa subarbusiva gramínea [PM1 ESG (ENE), PM2 ESG (NO)] y pino ponderosa [PM1 PP (ENE), PM2 PP (NO)].

Figure 1. Toposequence location and study sites in the back slope on the ENE and NW hillslope under grass shrub steppe [PM1 ESG (ENE), PM2 ESG (NO)] and ponderosa pine [PM1 PP (ENE), PM2 PP (NO)].

Zona de estudio

El estudio se localizó en la Región Extra Andina, Subhúmeda de Planicies, Colinas y Serranías en el sudoeste del Neuquén. El clima general es templado subhúmedo, con una temperatura media anual entre 10 y 12 °C y precipitaciones medias anuales que varían de este a oeste de 500 a 1000 mm, con una estación seca contrastante en primavera-verano y déficit hídrico estival. La dirección de los vientos dominantes es O-E. El régimen de humedad del suelo es xérico y el de temperatura es méxico. La vegetación está dominada arealmente por la estepa subarbusiva-gramínea con bosquetes aislados de *Nothofagus antarctica* y *Austrocedrus chilensis*. Los suelos dominantes fueron clasificados Molisoles (Soil Survey Staff, 1999) cuyo material parental es ceniza volcánica de edad holocénica (Colmet Daage *et al.*, 1988; Ferrer *et al.*, 1990; Irisarri & Mendía, 1997; Broquen *et al.*, 2005).

Sitios y suelos

El diseño del estudio considera la importancia de los rasgos geomorfológicos (formas y elementos) para reconocer y explicar las variaciones sistemáticas en los patrones de suelo y se basa en los antecedentes regionales (Colmet Daage *et al.*, 1988; Ferrer *et al.*, 1990; Irisarri & Mendía, 1997; Broquen *et al.* 2003, 2005, 2008). A partir de estos se seleccionó una toposecuencia representativa de la zona de estudio, próxima a la ciudad de Junín de los Andes (39° 57' S, 71° 05' O). La toposecuencia comprende dos laderas, una exposición ENE a sotavento y otra exposición NO a barlovento, ambas con vegetación de estepa subarbusiva gramínea (ESG). Se realizó la prospección de los suelos de la toposecuencia bajo ESG por barrenado en una línea imaginaria perpendicular a las curvas de nivel, mediante la realización de calicatas en el hombro, en la pendiente superior y en la pendiente inferior de ambas la-

deras donde se observaron las variaciones dentro de cada ladera, entre las diferentes posiciones y entre ambas laderas. Se seleccionó un sitio en cada ladera ubicados en la pendiente inferior, por encontrarse que es en esta posición el perfil del suelo donde se presenta la secuencia de horizontes más completa, abarcando las variaciones de la morfología de los suelos observadas en la prospección (Tabla 1) lo que se discute más adelante. A estos sitios se los denominó PM1 ESG ENE (sitio bajo estepa subarbutiva gramínea con exposición noreste) y PM2 ESG NO (sitio bajo estepa subarbutiva gramínea con exposición noroeste) (Tabla 1 y 2).

En cada sitio (PM1 ESG ENE y PM2 ESG NO) se describió y muestreó el suelo según USDA (1998) considerando la sección control para propiedades ándicas utilizando el $(Al_0 + 1/2 Fe_0)$, el % de vidrio y propiedades relacionadas. Se tomaron muestras no disturbadas para densidad aparente. Se determinó la composición granulométrica por Bouyoucos, $pH(H_2O)$ $pH(KCl)$ 1 N, $pH(NaF)$, retención de fosfato (P-ret), carbono orgánico total por Walkley & Black (Cw), capacidad de intercambio catiónico con acetato de sodio (pH 7), bases de cambio y las constantes hídricas (Sadzawka, 1990). El aluminio activo se estimó por medio de la prueba a campo y laboratorio de Fieldes & Perrots (1966).

Productividad forestal

Para la comparación de los crecimientos de las forestaciones en los sitios representativos de las variaciones suelo-paisaje, se seleccionaron dos sitios forestados con *Pinus ponderosa* de la misma edad y prácticas silvícolas, en equivalentes condiciones que bajo vegetación nativa, nombrándolos (PM1 PP ENE y PM2 PP NO). Se determinó la edad por lectura de anillos en tarugos de incremento tomados con barrenos de Pressler, el área basal ($m^2 ha^{-1}$) por relascopía, la altura media con clinómetro, volumen individual promedio por Smalian y se calculó el volumen medio por hectárea ($m^3 ha^{-1}$) (Cailleux, 1980; Girardin *et al.*, 2005). Para evaluar el efecto protector de la forestación en relación a la vegetación de estepa se midió el espesor del horizonte A bajo pino en ambas exposiciones (PM1 PP ENE y PM2 PP NO).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La prospección realizada a través de ambas laderas muestra que los horizontes superiores son derivados de cenizas volcánicas y que el material subyacente es la toba (Tabla 1). Las diferencias en el espesor del manto de ceniza y la profundidad a la que se encuentra la toba determinan notables diferencias en la edafogénesis de los suelos que se refleja en la secuencia de horizontes y en la profundidad de los suelos. De las observaciones realizadas en la prospección se desprende que los rasgos morfológicos variaron notablemente entre ambas laderas y fueron similares

dentro de cada una. Podemos decir que los suelos se desarrollan en uno o dos materiales originarios según que todo el *solum* esté desarrollado en materiales piroclásticos, o parte esté en la toba. Se desarrollan sobre dos materiales cuando el espesor del manto de ceniza es somero (< 50 cm). En la ladera ENE están dominados por las propiedades de las cenizas volcánicas y en la NO por las propiedades de la toba (Tablas 1 y 2 y 3).

Acorde con las clases de profundidad de restricción de raíces (Soil Survey Staff, 1993) los suelos de la ladera ENE son moderadamente profundos en el hombro a muy profundos en la pendiente inferior. Los de la ladera NO fueron de muy someros en el hombro a someros en la pendiente inferior. Asimismo la secuencia de horizontes es diferente entre ambas laderas. La ladera ENE presenta un horizonte A fuertemente melanizado, seguido por un horizonte B cámbico subdividido según las diferencias en el color y la estructura. La ladera NO presenta un horizonte A de color pardo seguido por un horizonte de transición y luego por un horizonte B arcilloso con barnices arcillosos y superficies de deslizamiento (Btss). El *solum* de los suelos observados en la ladera ENE evolucionó del material piroclástico depositado por estar protegida de la acción de los vientos dominantes. Mientras que, en la ladera NO el espesor del manto de material piroclástico es menor a los 20 cm quedando la toba expuesta a los demás factores de formación e incidiendo notablemente sobre la edafogénesis. Esto se refleja en su morfología y secuencia de horizontes de ambas laderas. En ambos casos es en la pendiente inferior donde se distingue la gama de características morfológicas observadas en las diferentes posiciones.

En la Tabla 2 se presentan los principales datos analíticos de los suelos ubicados en la pendiente inferior de la ladera ENE (PM1 ESG ENE) y la NO (PM2 ESGNO). El $pH(H_2O)$ fue de ligeramente ácido a neutro en ESG ENE y neutro en ESG NO lo que indica, por una parte, que el $pH(H_2O)$ está regulado por el sistema CO_2/H_2O a través de la formación y disociación del ácido carbónico, siendo tanto un dador como un aceptor de protones. Por otra parte, corresponde al rango de $pH(H_2O)$ en que gran parte de los macronutrientes pueden solubilizarse y pasar a estar disponibles para la vegetación. A su vez, al ser el $pH(H_2O) > 5,5$, y el $pH(KCl) > 5$, el mecanismo principal de tamponación de estos suelos estaría gobernado por el intercambio catiónico y los silicatos del suelo más que por el Al (Robarge & Johnson, 1992). Al ser el $pH(KCl)$ menor que el $pH(H_2O)$, indica que la carga del suelo es electronegativa (Tan, 1998).

Tabla 1. Principales características ambientales y morfológicas de los suelos en ambas laderas.
Table 1. Major environmental and soil morphological characteristics at both sides of the slope.

Región	TMA PMA ^a	Vegetación	Relieve	Orientación	Posición	Altitud	Gradiente (%)	Cobertura (%)	Horizontes	Profundidad (cm)	Color Húmedo ^b	Textura campo ^c	Estructura ^d	Rasgos ^e	Consistencia ^f	Raíces ^g
Estrandina de planicies colinas y serranías	< 10-12 °C 7000 mm	<i>Stipa speciosa</i> . Trin <i>Mulinum espinosum</i> Pers.; <i>Acaena splendens</i> Churragra sp	Collado Frente de la ladera	ENE	Hombro	1030	10	60	A	0-9	10YR 2/1	cos	gr	-	(w)so (w)po	V3T
									Bw1	9-24	10YR 3/2	sf	m/sbk /sg	-	(w)so (w)po	V2T
									Bw2	24-30	10YR 3/3	sf	m/sbk/sg	-	(w)so (w)po	V1T
									2Cr	30-45	-	XST	-	-	Ausentes	
									A1	0-6	10YR 2/1	cos	gr	-	(w)so (w)po	V3T
									A2	6-25	10YR 2/2	sf	m/sbk	-	(w)so (w)po	V2T
									Bw1	25-80	10YR 2/2	sf	m/sbk/sg	-	(w)so (w)po	V2T
									Bw2	80-120	10YR 3/2	sf	m/sbk/sg	-	(w)so (w)po	V1T
									2C	120+	10YR 4/2	scl	m	-	(w)ss (w)ps	V1T
									A1	0-5	10YR 2/1	cos	gr	-	(w)so (w)po	V3T
									A2	5-30	10YR 2/2	sf	m/sbk /sg	-	(w)so (w)po	V2T
									Bw1	30-90	10YR 2/2	sf	m/sbk/sg	-	(w)so (w)po	V2T
									Bw2	90-134	10YR 3/2	sf	m/sg	-	(w)so (w)po	V1T
									2C	134+	10YR 4/2	scl	m	-	(w)ss (w)ps	V1T
									A	0-3	10YR 3/1	cos	gr	-	(w)so (w)po	V2T
									2Btss	3-24	7,5YR 3/2	c	WEGsbk	KT	(w)ys (w)yp	M2 PC
									2BC	24-30	7,5YR 4/3	cl	WEGsbk	K	(w)js (w)jp	V1PC
									2Cr	30+	2,5YR 4/4	scl XRG	m	-	wjss (w)jps	ausentes
									A	0-8	10YR 3/1	cos	gr	-	(w)so (w)po	V2T
									2Btss	8-36	7,5YR 3/2	c	WEGsbk	KT	(w)vs (w)vp	M2 PC
2BC	36-65	7,5YR 4/3	cl	WEGsbk	K	(w)js (w)jp	V1PC									
2Cr	65+	2,5YR 5/2	scl	m	-	(w)ss (w)ps	ausentes									
A	0-11	10YR 3/1	cos	gr	-	(w)so (w)po	V2T									
2Btss	11-46	7,5YR 3/2	c	WEG sbk	KT	(w)ys (w)yp	M2 PC									
2BC	46-80	7,5YR 4/4	cl	WEG sbk	K	(w)js (w)jp	V1PC									
2Cr	80+	2,5YR 5/4	scl	m	-	(w)ss (w)ps	ausentes									

Ref.: TMA/PMA^a, color en húmedo notación Munsell^b; textura campo^c; estructura^d; m: masivo; sg: grano suelto; gr: granular; sbk: bloques subangulares; rasgos en la superficie de los agregados^e; K: rangos de tensión (silkenesides); T: barnices de arcilla (argilanes);^f (w) so, no adhesivo; (w) ss; ligeramente adhesivo; (w) s moderadamente adhesivo; (w) vs; muy adhesivo; vs: muy adhesivo; vs: ligeramente plástico; (w) po; no plástico; (w) ps: moderadamente plástico; (w) vp: muy plástico; Raíces: Raíces. V: vivas; M: muertas; 1: en toda el área; 2: comunes; 3: abundantes; T: en toda el área; P: entre agregados; C: en grietas (Soil Survey Staff, 1999).

Tabla 2. Propiedades físicas y químicas de los suelos en la pendiente inferior de ambas laderas.
Table 2. Physical and chemical properties of soils in the footslope of both hillsides.

Sitios	Horizontes	Composición granulométrica (%)			Da (Mg m ⁻³)	Vidrio (%) ^a	Al ₂ O ₃ +1/2Fe ₂ O ₃	Retención hídrica (%)		pH			ret-P (%) ^b	CIC ^c (Cmol (+)/kg ⁻¹)	Sat. Bases ^d (%)	Carbono ^e (g kg ⁻¹)
		A	I	a				33 K Pa	1500 K Pa	H ₂ O	KCl	NaF				
PM1 ESG ENE	A1	31,5	32,5	36,0	1,12	31	0,8	20,4	11,7	6,2	5,3	7,7	15	15,3	123	22
	A2	54,3	37,3	8,4	1,09	29	0,6	16,9	8,2	6,5	5,6	7,6	18	14,0	109	13
	Bw1	56,7	30,1	13,2	1,00	15	0,6	18,6	8,4	6,6	5,6	7,6	15	16,1	130	6
	Bw2	49,5	46,1	14,4	0,99	21	0,5	15,1	7,7	6,9	5,7	7,5	13	18,7	90	3
	2C?	44,7	31,2	24,1	1,26	20	0,7	26,5	13,0	6,6	5,4	7,8	18	26,6	104	1
PM2 ESG NO	A	53,1	27,8	19,0	1,20	28	0,7	12,0	9,5	6,1	5,3	7,5	14	24,2	100	12
	2Btss	29,7	17,0	53,3	1,30	nd	nd	35,3	26,1	6,1	nd	nd	nd ^f	41,3	50	10
	2BC	32,6	19,8	47,6	1,30	nd	nd	nd	nd	6,4	nd	nd	nd	35,5	4	2
	2Cr	58,1	16,0	25,8	nd	nd	nd	nd	nd	6,7	nd	nd	nd	25,6	6	nd

Ref.: ESG ENE: sitio bajo estepa subarbusciva gramínea con exposición este-noreste; ESG NO: sitio bajo estepa subarbusciva gramínea con exposición no-oroeste, ^a Vidrio en la fracción arena r por Holmgren (1967) ^b Ret-P: retención de fosfato, ^c CIC: capacidad de intercambio catiónico, ^d Porcentaje de saturación en bases, ^e carbono orgánico, ^f nd: no determinado.

Tabla 3. Datos dasométricos de las forestaciones de *Pinus ponderosa* en ambos sitios.
Table 3. Dasometric data of ponderosa pine afforestation in both hillsides.

Sitios	Árbol	DAP (cm)	Altura media (m)	Volumen individual (m ³)	Coefficiente mórfico	Parcela	AB (m ² ha ⁻¹)	Volumen (m ³ ha ⁻¹)
PM1 PP ENE	1	36	16	0,7454	0,46	A	36	264
	2	35	16	0,6342	0,41	B	26	171
	3	39	17	0,9534	0,47	C	26	208
	promedio	37	16	0,7777	0,45		29	214
PM2 PP NO	1	27	12	0,3645	0,55	A	15	99
	2	27	13	0,3586	0,48	B	26	163
	3	26	11	0,2256	0,40	C	19	84
	promedio	26	12	0,3163	0,48		20	115

Ref.: PP ENE: sitio bajo *Pinus ponderosa* con exposición este-noreste, PP NO: sitio bajo *Pinus ponderosa* con exposición no-oroeste, DAP: diámetro a la altura del pecho del árbol (1,3 m) expresado en cm, AB: área basal al DAP obtenida del conteo angular con relascopio (m² ha⁻¹).

En ambos casos el test de Fieldes y Perrots (1966) a campo fue negativo y el pH (NaF) <9, lo que indica, junto con el valor del pH (H₂O) (>5,5) y del pH (KCl) (>5), un bajo tenor de Al activo acompañado de una baja retención de P (Mizota & van Reeuwijk, 1989; Saigusa *et al.*, 1991; Shoji, 1993). El contenido de carbono orgánico en el horizonte A es un 45% mayor en ESG ENE que en ESG NO. Los valores de CIC en ESG ENE son menores a lo esperado, lo que puede deberse a que son suelos de carga variable con dominio de vidrio poco alterado lo que dificulta su determinación (Besoain, 1985).

En la ladera ENE los procesos dominantes en los suelos son enriquecimiento por acumulación de cenizas volcánicas y melanización evidenciada por los contenidos de materia orgánica y colores oscuros. En la ladera NO el proceso dominante en los suelos es la pedoturbación por expansión-contracción de las arcillas, evidenciada por la presencia de abundantes superficies de deslizamiento y bloques cuneiformes. A su vez se encuentran barnices de arcilla lo que junto con el incremento del contenido de arcilla respecto a los horizontes suprayacentes y subyacente podría ser considerado como una evidencia del proceso de argiluvación. La

melanización es más débil que en ESG NE y se refleja en los colores menos oscuros y en los menores contenidos de carbono orgánico del horizonte A (Tablas 1 y 2).

En cuanto a la clasificación (Soil Survey Staff, 1999) los suelos de ambas laderas presentan epipedón mólico y una saturación en bases en todo el perfil > 50% por lo que se clasifican como Molisoles, y al ser el régimen de humedad del suelo xérico les corresponde el suborden Xeroles. El suelo de la ladera exposición ENE, es poco diferenciado con un porcentaje de arena > 30%, un porcentaje de vidrio > 15% y el $[(Al_o + 1/2 Fe_o) + \% \text{ vidrio}] > 30$ en todos los horizontes reuniendo los criterios para clasificarlo como Haploxerol vitrándico. El suelo exposición NO presenta un horizonte argílico y muestra evidencias de iluviación de arcilla. Presenta grietas mayores a 5 mm a través de un espesor de 30 cm durante la estación seca en años normales junto con caras de fricción y agregados en forma de cuña reuniendo los requisitos para clasificarse como Argixerol vértico. Por lo tanto, los suelos de ambas laderas se diferencian a nivel de gran grupo y subgrupo.

La morfología de los suelos de la ladera ENE (Tabla 1) no presenta limitantes para el desarrollo radicular. La densidad aparente es baja ($0,9$ a $1,1 \text{ Mg m}^{-3}$), determinando alta porosidad total (58%), esta propiedad junto con la profundidad efectiva del suelo, hacen que el volumen explorable para las raíces sea alto (Tabla 2). A su vez, el mayor contenido de arcilla en la base del perfil incrementa la retención de agua lo que puede ser considerado como un atributo favorable para el uso forestal, donde la zona de bombeo de agua y nutrientes es principalmente de los horizontes subsuperficiales.

Los suelos de la ladera NO son someros, con presencia de abundantes superficies de deslizamiento y evidencias de ruptura de raíces debido a los procesos de expansión contracción, con bajo volumen explorable para las raíces, dado por la escasa profundidad del solum junto con los valores de densidad aparente ($1,2$ a $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$). Estas características determinan fuertes limitantes para el desarrollo radicular de especies forestales, incrementado por impedimentos estacionales para su desarrollo, lo que se discute a continuación. Las principales limitantes se encontraron en los horizontes subsuperficiales por su consistencia en seco (de moderadamente duros a duros) y su estructura. Esta varía estacionalmente presentando prismas que rompen a bloques subangulares y cuneiformes con abundantes superficies de deslizamiento en la estación seca (primavera-verano) y masiva en la estación húmeda (otoño-

invierno) lo que evidencia la presencia de arcillas expansibles (Tabla 1). Estos cambios estacionales determinan asfixia y estrangulamiento de las raíces. Los valores de macroporosidad en el horizonte Btss ($MP \approx 12\%$) fueron próximos al valor crítico de porosidad en aire que garantizan la difusión de oxígeno ($MP \geq 10\%$) (Taboada & Micucci, 2002). La mayor parte de las raíces en estos horizontes se encuentran muertas y aplanadas, probablemente por asfixia en la estación húmeda luego del período de crecimiento y ruptura de las mismas durante la estación seca.

Los procesos diferenciales de deposición de cenizas volcánicas (mayor en la ladera ENE que en la NO) han determinado una menor profundidad de los suelos a barlovento, lo que se acentuó por las pérdidas por erosión. El espesor del horizonte A fue de 30 cm en ESG ENE y de 11 cm en ESG NO, y a su vez es menor bajo estepa que bajo pino en ambas exposiciones (PM1 PP ENE: 36 cm vs. PM1 ESG ENE 30 cm y PM2 PP NO: 15 cm vs. PM2 ESG NO: 11 cm). La diferencia de espesor del horizonte superficial que se registra entre ambos tipos de vegetación (ESG vs PP) puede atribuirse al efecto protector de la forestación por la mayor cobertura del suelo y presencia de un horizonte O bajo pino.

En cuanto a la productividad forestal, el crecimiento es 27% mayor en PM1 PP ENE que en PM2 PP NO, tanto diámetro (37 vs 26 cm) como en altura (16 vs 12 m). Las existencias expresadas en área basimétrica ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$) son 35% mayores para la ladera ENE. La diferencia en los crecimientos se visualiza más claramente cuando se lo expresa en volumen, con valores 50% mayores para la ladera ENE respecto de la NO (214 vs $115 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) (Tabla 3).

Las diferencias de crecimiento (Tabla 3), evidencian la influencia de los suelos en ambas situaciones (Tablas 1 y 2). Las principales propiedades que determinarían las diferencias de crecimientos serían: la profundidad del suelo, el volumen explorable para las raíces sin limitantes para su penetración y desarrollo (Girardin *et al.*, 2005). El suelo de la ladera ENE presenta condiciones que incrementan la retención hídrica en profundidad, lo que contrarresta en cierta forma el déficit hídrico estival. Como ya se planteó en la ladera NO, la presencia de altos contenidos de arcillas expansibles a escasa profundidad dificultan y hasta impiden el desarrollo de las raíces, reflejándose en los crecimientos notablemente menores. Un bosque implantado en esas condiciones sería recomendable manejarlo como bosque protector. Una vez mejorados los niveles de cobertura y controlados los procesos erosivos activos, podría llegar a

permitir un uso silvo pastoril del mismo, lo que debería ser estudiado en futuras investigaciones.

CONCLUSIONES

Existe variación de las propiedades de los suelos a nivel local que mantienen el mismo patrón que a nivel regional, con mayores depósitos de cenizas en los sitios protegidos del viento.

Los rasgos de los suelos varían notablemente en la toposecuencia; a sotavento están determinados por las propiedades impuestas por las cenizas volcánicas y a barlovento principalmente por el material subyacente (toba), lo que acentúa las diferencias impuestas por los espesores de los mantos de cenizas.

Se encuentran diferencias en los procesos pedogenéticos entre ambas laderas, lo que se refleja en el taxón que le corresponde a cada suelo, Haploxerol vitrándico en la ladera ENE y Argixerol vértico en la ladera NO.

Las diferencias en los procesos pedogenéticos y por lo tanto en las características de los suelos inciden notablemente en el crecimiento volumétrico del *Pinus ponderosa* el que fue aproximadamente un 50% mayor en la ladera a sotavento (Haploxerol vitrándico) que a barlovento (Argixerol vértico).

Las cualidades determinantes para el crecimiento del pino ponderosa son: i) favorables a sotavento por presencia de suelos profundos, alto volumen explorable para las raíces sin limitantes para su penetración y desarrollo y texturas arcillosas en la base del perfil, ii) desfavorables a barlovento por altos contenidos de arcillas expandibles a escasa profundidad que limitan la penetración de las raíces generando asfixia y ruptura por los procesos de expansión-contracción.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la valiosa colaboración de la Téc Ftal V. Pellegrini en las actividades de campo y laboratorio, a la Téc Ftal Romina Gonzalez Musso por la confección del mapa de ubicación y digitalización de los puntos de muestreo y a la Mg Gabriela Tavella quien corrigió la sintaxis y gramática del Abstract. Expresamos nuestra gratitud a CORFONE Junín de los Andes quien nos permitió instalar nuestros sitios de estudio. Este trabajo fue financiado con fondos del proyecto de investigación de la Universidad Nacional del Comahue, código 04 S014.

BIBLIOGRAFÍA

- Besoain, E. 1985. Aluminosilicatos no cristalinos y paracristalinos del suelo. *En: Mineralogía de Arcillas de Suelos*. IICA. Costa Rica. 533-543. 1205 pp.
- Broquen, P; JL Girardin; JC Pércas; A Suárez & F Chiodi. 2008. Problemática del uso forestal de la tierra, contexto físico y social. Provincia del Neuquén. PI 04 S014. AUSMA FCA UNCO.
- Broquen, P; C Lobartini; F Candan (+) & G Falbo. 2005. Allophane, aluminum, and organic matter accumulation across a bioclimatic sequence of volcanic soils of Argentina. *Geoderma* 169(3-4): 167-177. Elsevier. Netherlands.
- Broquen, P; G Falbo; A Apcarián; F Candan, JL Girardin & V Pellegrini. 2003. Relaciones entre las forestaciones, la erosión del suelo y la potencialidad productiva en la transición bosque-estepa (Andinopatagonia, Argentina). *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For.* 12(2): 99-111.
- Caillez, F. 1980. Estimación del Volumen Forestal y Predicción del rendimiento. FAO N° 22/1. Roma. 98 pp.
- Colmet Daage, F; A Marcolin; C Lopez; M Lanciotti; J Ayesa; D Bran; E Andenmatten; P Broquen; JL Girardin; G Cortes; J Irisarri; E Besoain; G Sadzawka; S Sepulveda; S Massaro; P Millot & P Bouleau. 1988. Características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de la cordillera y precordillera del norte de la Patagonia. INTA ORSTOM. S. C. Bariloche, Argentina. 39 pp.
- Ferrer, J; J Irisarri & M Mendía. 1990. Síntesis de los factores del medio geográfico y de las propiedades de los suelos. *En: CFI-COPADEV-Prov. NQN (eds.) Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén. Volumen 1. Tomo 2. Buenos Aires.* 4-1 - 4-159. 10 pp.
- Fieldes, FJ & KW Perrot. 1966. Rapid field and laboratory test for allophanes. *New Z.J.Sci.* (9): 623-629.
- Gaitán, JJ & López CR. 2007. Análisis del gradiente edáfico en la región andinopatagónica. *Ciencia del Suelo (Argentina)* 25(1): 53-63.
- Gerrard, J. 1992. The Catena concept. *In: Soil Geomorphology: An integration of Pedology and Geomorphology*. Chapman & Hall. London. (3): 29-50. 269 pp.
- Girardin, JL; V Pellegrini; R Luna; P Broquen & G Falbo. 2005. Validación de modelos predictores de índice de sitio en *Pinus ponderosa* Dougl. Andinopatagonia Oriental 37° 41° S, RA. *Actas del III Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano.* p. 38.
- Irisarri, J & J Mendía. 1997. Relaciones suelo-paisaje en la evaluación de la potencialidad forestal de la región central andino-patagónica, Argentina. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Comahue. *Revista Bosque* 18(1): 21-30.
- Mizota, C & LP van Reeuwijk. 1989. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions. Soil Monograph, Vol. 2. ISRIC. Wageningen. 103 pp.
- Robarge, WP & DW Johnson. 1992. The effects of acidic deposition on forested soils. *Adv. Agron.* 47: 1-83.
- Sadzawka, A. 1990. Métodos de análisis de suelos. INIA. Chile. 130 pp.
- Saigusa, M; S Shoji & M Otowa. 1991. Clay mineralogy of Andisols showing a hydrosequence and its relationships to their physical and Chemicals properties. *Pedologist* (35): 21-33.
- Shoji, S; M Nanzyo & RA Dahlgren. 1993. Volcanic ash soils. Genesis, Properties and Utilization. *Devel in Soil Sci.* Vol. 21. Elsevier. Amsterdam. 288 pp.

- Soil Survey Staff. 1993. Soil Survey Manual. 5th Edition. U.S. Dept. Agricultural. Handbook N° 18. US Govern. Printing Office Washington D.C. 437 pp.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy. 2th. Ed. AID - USDA. Handbook N°436. 869 pp.
- Taboada, MA & FG Micucci. 2002. Fertilidad física de los suelos. Editorial Facultad de Agronomía UBA. Buenos Aires, 72 pp.
- Takahashi, T & S Shoji. 2002. Distribution and classification of volcanic ash soils. *Global Environment Research* 6(2): 83-97.
- Tan, KH. (edit.) 1985. Andosols. A Hutchinson Ross Benchmark Book. Van Nostrand Reinhold Co.; New York. 418 pp.
- Tan, KH. 1998. Principles of soil Chemistry. Third Edition. Marcel Dekker, New York. 361 pp.
- Ugolini, FC & RA Dahlgren. 2002. Soil development in volcanic ash. *Glob. Environ. Res.* 6: 69-81.
- USDA. 1998. Field book for describing and sampling soils. Natural Resources Conservation Service, Revisada por Schoeneberg P.J., Wiscocki D.A., Benham E.C., Broderson W.D. USDA. National Survey Center Lincoln NE. Traducción al español por investigadores del AICET.-Instituto de Suelos y Evaluación de Tierras. INTA 2000.
- Zinck, JA. 2012. Geopedología. Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales. ITC Special Lecture Notes Series. Enschede, The Netherlands. 123 pp.