

CENIZA VOLCÁNICA RECIENTE COMO INDICADORA DE RETENCIÓN DE PARTÍCULAS EN LOS SUELOS DE LA PATAGONIA ANDINA

MANUELA TARABINI^{1*}; FEDERICO GOMEZ²; LUDMILA LA MANNA³

Recibido: 14/12/2018

Recibido con revisiones: 25/1/2019

Aceptado: 18/2/2019

RESUMEN

La mayoría de los suelos de la región Andino Patagónica se originan a partir de ceniza volcánica, la cual a través de procesos pedogenéticos, forma suelos con alta aptitud forestal. En el año 2008 la erupción del volcán Chaitén (Chile) afectó a la provincia del Chubut y dejó una impronta de ceniza en los suelos, fácilmente distinguible. Este estudio tuvo por objetivo estimar la capacidad de entrapamiento de partículas transportadas por el viento que poseen distintas coberturas vegetales, utilizando el depósito de ceniza volcánica reciente y el material mineral suprayacente (ceniza y otros sedimentos re-transportados con posterioridad a la erupción) como indicadores. En cercanías de la ciudad de Esquel, Chubut, se evaluó la capacidad de entrapamiento en plantaciones de pino ponderosa y en pastizales adyacentes, ubicados en sitios planos, y se analizaron las variables asociadas con la capacidad de entrapamiento (cobertura del suelo, características dasométricas). Los resultados evidenciaron que la presencia de un horizonte orgánico continuo bajo plantaciones favoreció la retención de partículas. Así, la capacidad de entrapamiento fue mayor en plantaciones que en pastizales ($24,13 \pm 8,16$ vs. $1,70 \pm 0,44$ $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ de ceniza y $2,29 \pm 1,08$ vs. $1,34 \pm 1,08$ $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ de material mineral). Las variables dasométricas que se correlacionaron positivamente con esta capacidad fueron: la edad, el N° de árboles por hectárea, el área basal, la altura y el área de proyección de copas. En apenas siete años, la mayoría de las plantaciones evidenciaron un depósito cuantificable de material mineral por sobre la ceniza reciente, representando una tasa de crecimiento del suelo de $0,98 \pm 0,46$ $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$. Estos resultados demuestran la capacidad de las plantaciones de entrapar y retener partículas transportadas por el viento, enfatizando no sólo su rol como mitigador de procesos erosivos, sino también su influencia en la génesis de los suelos.

Palabras claves: Enlame, entrapamiento, erosión, plantaciones.

RECENT VOLCANIC ASH AS AN INDICATOR OF PARTICLE RETENTION IN THE SOILS FROM ANDEAN PATAGONIA

ABSTRACT

Most Patagonian Andean soils were developed from volcanic ashes, showing high forest aptitude. In 2008, Chaitén volcano (Chile) eruption affected Chubut province in Argentina and left a recognizable ash layer on the soils. The objective of this study was to estimate the capacity of different vegetation systems for entrapping particles transported by the wind, using as indicators the recent volcanic ash and the overlying mineral material (*i.e.*, ash and other sediments re-transported and deposited after the eruption). Near Esquel town, Chubut, entrapping capacity was evaluated in ponderosa pine plantations and in adjacent rangelands, located in flat sites. Variables associated with entrapping capacity (soil cover, dasometric characteristics) were also analysed. Plantations showed a continuous organic layer which favoured particle retention. Thus, entrapping capacity was higher in plantations than in rangelands ($24,13 \pm 8,16$ vs. $1,70 \pm 0,44$ $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ for recent ash and $2,29 \pm 1,08$ vs. $1,34 \pm 1,08$ $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ for mineral material). Dasometric variables positively correlated with this capacity were: age, number of trees per hectare, basal area, height, and crown projection area. Just seven years after the eruption, most of the plantations showed a quantifiable deposit of mineral material over the recent ash, representing a soil growth rate of $0,98 \pm 0,46$ $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{year}^{-1}$. These results highlight plantations ability for entrapping and retaining particles transported by the wind, emphasizing not only their influence on erosion mitigation, but also on soil genesis.

Key words: Entrap, erosion, new mineral material, plantations.

1 Centro de Estudios Ambientales Integrados, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. CONICET. SCTeIP Chubut

2 EEAf INTA, Esquel. Centro de Estudios Ambientales Integrados, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. CONICET. SCTeIP Chubut

3 CONICET. Centro de Estudios Ambientales Integrados, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.

* Autor de contacto: manuela.tarabini@yahoo.com.ar

INTRODUCCIÓN

Las áreas con presencia de masas forestales generan en su interior condiciones microclimáticas que difieren de aquellas áreas desprovistas de cobertura arbórea. Así sucede, por ejemplo, con la velocidad del viento, que disminuye bajo cobertura en comparación con claros dentro del mismo bosque (Promis *et al.*, 2010). La cubierta forestal conforma un bloque poroso que permite el ingreso del aire y reduce su velocidad como consecuencia de la fricción generada con los troncos y copas de los árboles. El aire ingresa cargado de partículas (eg., suelo removido) que van depositándose conforme disminuye la velocidad de transporte (Gomez Sanz, 2004). La retención de las partículas en el suelo no sólo depende de la cubierta arbórea, sino también de la presencia del horizonte orgánico que impide la remoción de los materiales (Porto *et al.*, 2009; Kateb *et al.*, 2013). Las características de la plantación, condicionadas por el manejo silvícola, determinan la situación de protección del suelo, y el balance entre pérdida y ganancia de suelo por procesos de erosión/sedimentación (Maestre & Cortina, 2004; Whicker *et al.*, 2008).

Estudios realizados en Patagonia Argentina, han evidenciado un mayor espesor del horizonte A bajo plantaciones de pino que en sitios de estepas adyacentes, lo cual fue adjudicado al aumento de la capacidad de entrampe (Broquen *et al.*, 2003; Buduba, 2006). Así, en el ecotono bosque-estepa de esta región, que sufre importantes procesos de erosión y degradación del suelo (Irisarri *et al.*, 1995; Bertiller & Bisigato, 1998), las plantaciones de coníferas exóticas podrían ser consideradas como agentes mitigadores de estos procesos.

Los suelos del ecotono de la provincia de Chubut, tienen una alta aptitud para la forestación con coníferas exóticas de rápido crecimiento (Sarasola, 2006; Defossé, 2015), siendo *Pinus ponderosa* Dougl. Ex. Laws la principal especie implantada. La gran aptitud de los suelos radica en su naturaleza volcánica (Irisarri & Medía, 1997), constituidos por depósitos de material piroclástico: cenizas, capas de lapilli y pumicita (Apcarian & Irisarri, 1993). Estos materiales se depositan en función de la distancia al volcán,

los vientos dominantes, el relieve y la precipitación (Còlmet Dâage *et al.*, 1988; Finocchiaro, 2011). Los suelos volcánicos tienen propiedades distintivas, asociadas a la formación de minerales no cristalinos, y se caracterizan por tener una alta fertilidad y capacidad de almacenamiento de agua (Warkentin & Maeda, 1980). Por otra parte, muchos suelos volcánicos reciben el aporte relativamente frecuente de nueva ceniza, la cual puede constituir un aporte de nutrientes (McDaniel *et al.*, 2012).

En el año 2008, el volcán Chaitén dio inicio a un nuevo ciclo eruptivo luego de 320 años de inactividad (Lara & Moreno, 2009) arrojando materiales piroclásticos que cubrieron gran parte de la Patagonia, incluso llegando al océano Atlántico (Buduba *et al.*, 2008). La ceniza del volcán Chaitén ha dejado una impronta en los suelos del centro-oeste de Chubut, fácilmente distinguible por su color blanquecino. A su vez, por sobre el depósito de ceniza, suele observarse material mineral que difiere de la ceniza. Este material mineral estaría conformado por ceniza y otros sedimentos re-transportados por acción del viento, atrapados por la cobertura del suelo, y enriquecidos con materia orgánica de los aportes de la vegetación (Shoji *et al.*, 1993). El depósito de ceniza volcánica reciente, y el material mineral suprayacente, podrían actuar como estimadores de la capacidad de entrampe de partículas transportadas por el viento que poseen distintas coberturas vegetales. Los objetivos de este trabajo fueron: 1) cuantificar y analizar la retención de partículas transportadas por el viento en plantaciones de *Pinus ponderosa*, en comparación a pastizales adyacentes, utilizando como indicadores el depósito de ceniza volcánica reciente y el material mineral acumulado por sobre la ceniza; 2) analizar qué variables dasométricas se asocian a la capacidad de entrampe de las plantaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y selección de los sitios de muestreo

El estudio se realizó en el año 2015 en alrededores de la ciudad de Esquel, provincia del Chubut. El clima de esta región es templado-frío

(Paruelo *et al.*, 1998), con una precipitación media anual de aproximadamente 600 mm, concentrada entre los meses de abril a septiembre. Las precipitaciones y depósitos volcánicos dieron lugar a Molisoles ándicos, con presencia de haloisita-imogolita (Irisarri *et al.*, 1995).

El área de estudio se ubica aproximadamente a 100 km en línea recta del volcán Chaitén (**Figura 1**). En esta área, inmediatamente luego de la erupción, se registró un depósito de ceniza de 6 mm de espesor medio, el cual fue determinado en pastizales ubicados en sitios planos (Finocchiaro, 2011).

Se seleccionaron 15 plantaciones de *Pinus ponderosa* ubicadas en sitios planos (pendiente < 5%) y sin intervenciones silvícolas desde la caída de ceniza (*i.e.*, año 2008) (**Figura 1**). La selección de las plantaciones de estudio, que abarcaron un rango de situaciones de densidad y edad, se realizó en base al análisis de la cobertura de plantaciones del oeste del Chubut, brindada por la Subsecretaría de Bosques de la Provincia del Chubut, un modelo digital del terreno de 30 m de resolución (SRTM 1 Arc-Second Global) y recorridas a campo. Además, se seleccionaron siete pastizales, correspondientes a aquellas situaciones en que la plantación estuvo alejada

a un pastizal en idéntica condición topográfica (**Figura 1**).

Diseño de muestreo

En cada uno de los tratamientos (plantaciones y pastizales) se determinó la ubicación geográfica y la distancia al volcán y se describieron las condiciones generales del sitio: pendiente, rasgos de erosión, pedregosidad (Schoeneberger *et al.*, 1998).

Para la determinación de la capacidad de entrappe de partículas, se trazaron cinco transectas de 100 m de longitud, separadas 10 m una de la otra, ubicadas de forma perpendicular a la dirección de los vientos dominantes. Sobre cada transecta se seleccionaron cinco puntos, distanciados 20 m uno del otro. En cada uno de los 25 puntos, mediante un calibre digital, se midió el espesor de ceniza volcánica recientemente depositada, el espesor de material mineral depositado sobre la ceniza y el espesor del horizonte orgánico (**Figura 2**). En cada punto de muestreo, se estimó visualmente la cobertura del suelo, distinguiendo cuatro categorías (suelo desnudo, grava, mantillo y cubierta vegetal) en subparcelas cuadradas de 0,25 m².

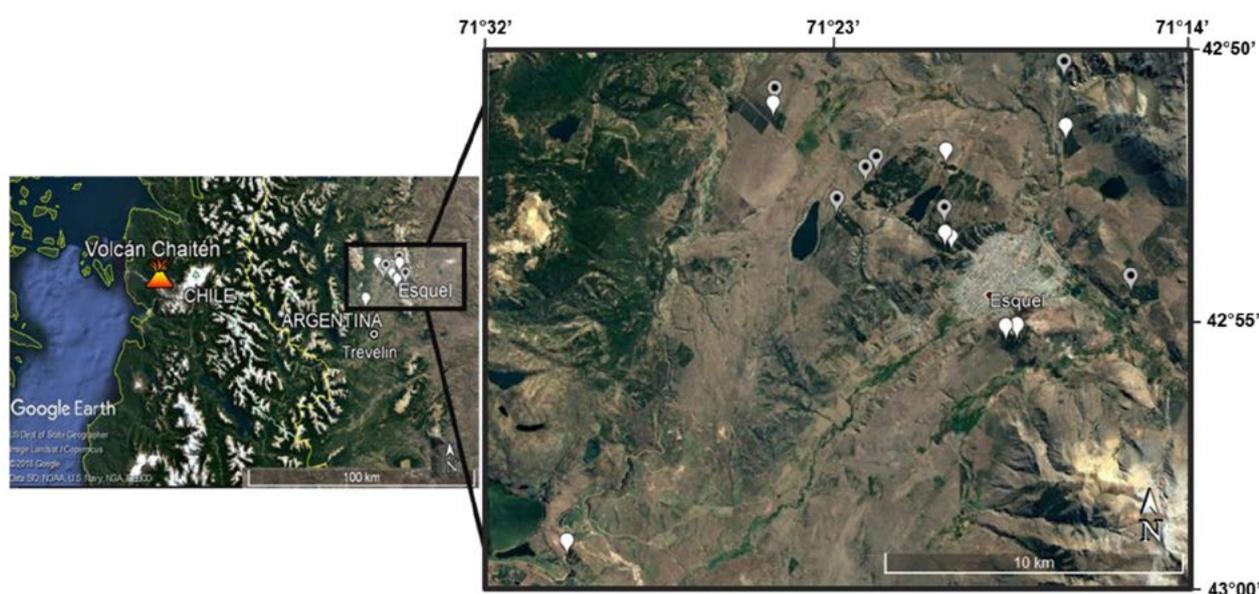


Figura 1. Ubicación del área de estudio y los sitios de muestreo. En blanco se representan las plantaciones y en gris las plantaciones alejadas a un pastizal. Imagen de Google Earth Pro 2018.

Figure 1. Study area location and sampling sites. Plantations (in white) and plantations next to rangelands (in gray) are shown. Image from Google Earth Pro 2018.



Figura 2. Ejemplo de ceniza, material mineral y horizonte orgánico en una plantación del área de estudio.

Figure 2. Example of ash, mineral material and organic layer in a plantation from the study area.

A partir de los espesores medidos en el campo, se calcularon las toneladas (t) y metros cúbicos por hectárea ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) de ceniza volcánica y material mineral (Ecuación 1).

Ecuación 1

$$v (\text{m}^3 \text{ha}^{-1}) = \text{espesor (m)} \cdot 10.000 \text{ m}^2$$

$$m (\text{t ha}^{-1}) = \delta (\text{t m}^{-3}) \cdot \text{espesor(m)} \cdot 10.000 \text{m}^2$$

Donde:

v: volumen de ceniza o de material mineral por hectárea.

m: toneladas de ceniza o material mineral por hectárea.

δ : densidad aparente. Se consideró un valor de $0,77 \text{ t m}^{-3}$ para la ceniza volcánica (INIA, 2008) y de $0,90 \text{ t m}^{-3}$ para el suelo mineral (Còlmet - Dâage *et al.*, 1988).

En las 15 plantaciones, se realizó además una caracterización de las variables dasométricas, para lo cual se demarcó una parcela circular de 300 m^2 . Se determinó el diámetro a la altura del pecho (DAP = $1,30 \text{ m}$) de todos los árboles incluidos en la parcela con DAP superior a los 5 cm , el número de árboles por hectárea y el área basal (AB). Se midió la altura dominante con clinómetro y el índice de entrenudos (IEN) con vara de altura, siguiendo para ambas determinaciones el criterio de los 100 árboles más gruesos por hectárea (Gonda & Cortés, 2001).

En cada parcela se seleccionaron cuatro árboles representativos, abarcando el rango de DAPs, a fin de estimar el área ocupada por la proyección de las copas (APC). Se midió el diámetro de las copas en dos direcciones: norte-sur y este-oeste,

con una cinta métrica (Cailliez, 1980). En gabinete, se estimó el área de la proyección de las copas de cada árbol medido (Ecuación 2). Para cada parcela se ajustó un modelo de regresión, considerando el DAP como variable independiente y el APC como variable dependiente. A partir de la regresión, se estimó el APC para todos los árboles incluidos en la parcela, y ese valor se proyectó a hectárea para cada plantación.

Ecuación 2

$$\text{APC} = \frac{\pi (\text{Diámetro medio})^2}{4}$$

Donde:

APC: Área de proyección de copa de cada árbol.

$$\text{Diámetro medio} = \frac{(\text{Diámetro norte-sur}) + (\text{Diámetro este-oeste})}{2}$$

Para determinar qué condición presentaba cada plantación al momento de la caída de ceniza, se estimó el valor de las variables dasométricas para el año 2008 (*i.e.*, año del evento volcánico). Se tomaron muestras con barreno de Pressler de los cuatro árboles seleccionados, con el fin de determinar el DAP al momento de la caída de ceniza. Para cada plantación se ajustó un modelo de regresión entre el DAP actual (variable independiente) y el DAP en el 2008 (variable dependiente), a fin de estimar el DAP (2008) de todos los árboles incluidos en la parcela. A partir de esta información, se estimó el área basal del 2008. Los tarugos obtenidos con barreno permitieron corroborar la edad actual y edad en el 2008, mediante el conteo de anillos de crecimiento. El APC en el año 2008 se estimó siguiendo la misma metodología que para el APC actual, descontando los últimos siete verticilos de las ramas inferiores vivas de cada árbol. La altura en el año 2008 se determinó con clinómetro, descontando los últimos siete verticilos desde el ápice hacia abajo. Cada verticilo, en pino ponderosa, corresponde a un año de crecimiento (Gonda, 2001).

Análisis de datos

Los datos fueron analizados mediante los programas InfoStat e IBM SPSS Statistics 22. La compa-

ración de los distintos componentes de la cobertura del suelo, el espesor de ceniza reciente y el material mineral fue analizada entre plantaciones y pastizales mediante test de Wilcoxon, análisis no paramétrico para muestras pareadas.

La correlación entre el entrampe de partículas (*i.e.*, espesor de ceniza reciente y espesor de material mineral suprayacente) y las distintas variables de sitio (longitud, latitud, distancia al volcán, cobertura, espesor de horizonte orgánico, variables dasométricas) fue evaluada mediante Análisis de Correlación de Spearman.

Para evaluar las variables de sitio en conjunto, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) (Escofier & Pages, 1992) y se analizó la correlación entre las coordenadas de los sitios de estudio en el espacio multivariado y el entrampe de partículas, mediante Análisis de Correlación de Spearman.

A fin de estimar a qué edad las plantaciones comienzan a ser capaces de entrapar partículas, se ajustó un modelo de regresión no lineal, considerando la edad al momento de caída de la ceniza como variable independiente y el espesor de ceniza como variable dependiente.

Para determinar la relación entre las variables dasométricas y la presencia o ausencia de material mineral depositado por sobre la ceniza, se realizó un análisis de regresión logística, seleccionando las variables mediante el método paso a paso. El valor de presencia (1) o ausencia (0) (*i.e.*, variable dependiente) se determinó mediante la moda (valor más frecuente) para cada sitio. La regresión logística permite predecir la probabilidad (P) de ocurrencia de un evento, ajustando los datos a una

curva logística (Hosmer & Lemeshow, 1989). El modelo se representa por la Ecuación 3.

Ecuación 3

$$\text{Logit}(p) = \beta_0 + \beta_1 V_1 + \beta_2 V_2 + \dots + \beta_n V_n$$

Donde:

p_i : Probabilidad de presencia de material mineral.

β_0 : Ordenada al origen (constante).

β : Coeficiente asignado a cada una de las variables independientes.

V_1, V_2, \dots, V_n : Variables independientes.

Los valores de probabilidad se calculan en base a la ecuación 4:

Ecuación 4

$$P = \frac{e^{\text{logit}(p)}}{1 + e^{\text{logit}(p)}}$$

RESULTADOS

Retención de partículas en plantaciones vs. pastizales

La cobertura media del suelo fue mayor en plantaciones que en pastizales (**Tabla 1**). Las plantaciones presentaron un horizonte orgánico (mantillo) generalmente continuo, conformado por acículas de pino, con poca presencia de especies herbáceas y arbustivas. Por el contrario, los pastizales presentaron una matriz de suelo desnudo, con parches vegetados. Las especies vegetales dominantes de estos pastizales fueron *Poa ligularis* Nees ex Steud. (coirón poa), *Pappostipa speciosa* (Trin. & Rupr.) Romasch. (coirón duro), *Festuca pallescens* (St.-Yves) Parodi. (coirón blanco), *Mulinum spinosum* (Cav.) Persoon (neneo) y *Senecio sp.*

Tabla 1. Situación de protección del suelo bajo plantaciones y pastizales, expresada en porcentaje. [Cobertura total del suelo= (Mantillo + Vegetación + Grava)]. Se indica valor medio \pm error estándar.

Table 1. Soil cover under plantations and rangelands, expressed as percentage. [Total cover of the soil = (Mulch + Vegetation + Gravel)]. Mean value \pm standard error is indicated.

	Plantaciones	Pastizales
Cobertura total del suelo (%)	93,91 \pm 3,01*	57,81 \pm 11,89*
Mantillo (%)	87,59 \pm 5,43*	38,30 \pm 16,12*
Vegetación (%)	6,23 \pm 4,09	16,64 \pm 5,65
Grava (%)	0,10 \pm 0,07	2,87 \pm 1,89
Suelo desnudo (%)	5,86 \pm 2,94*	42,05 \pm 11,87*

* Indica diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$).

* Indicates significant differences between treatments ($p < 0.05$).

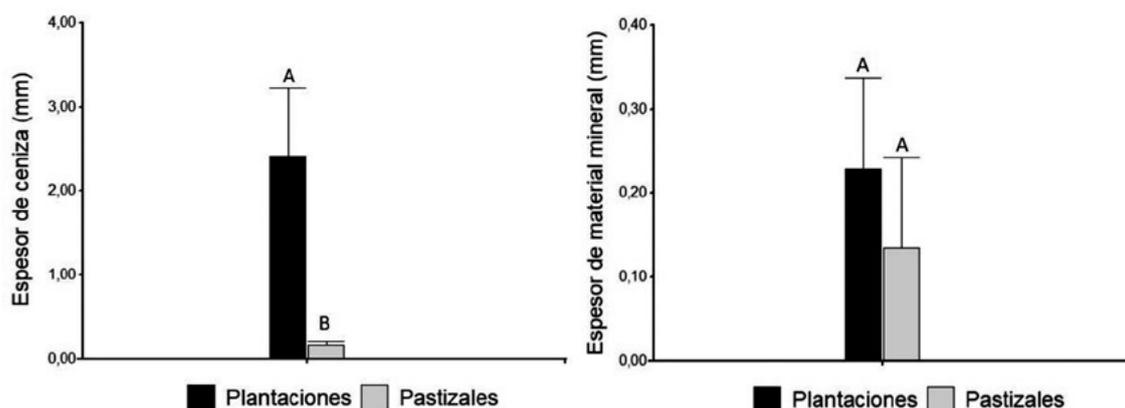


Figura 3. Espesor de ceniza y material mineral depositado sobre la ceniza en plantaciones y pastizales. Se muestran los resultados del test de Wilcoxon para muestras pareadas: letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Figure 3. Ash thickness and overlaying mineral material in plantations (black bars) and rangelands (grey bars). Results of Wilcoxon test for paired samples are shown: different letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

El espesor medio de ceniza retenida fue mayor en plantaciones que en pastizales [Z (Wilcoxon) = 2,37; $p < 0,01$]. En cambio, el espesor medio de material mineral depositado en el transcurso de siete años sobre la ceniza, no presentó diferencias significativas entre tratamientos [Z (Wilcoxon) = 0,34; $p = 0,47$] (**Figura 3**).

La tabla 2 expresa la capacidad de entrampe de plantaciones y pastizales en términos de volumen y toneladas por hectárea. El depósito de ceniza en plantaciones fue 14 veces superior al registrado en los pastizales. En tanto, el depósito de material mineral por sobre la ceniza, si bien no evidenció diferencias significativas, alcanzó un valor medio 1,7 veces más alto en las plantaciones.

Tabla 2. Depósitos de ceniza reciente y material mineral suprayacente en plantaciones y pastizales aledaños. Se indica valor medio \pm error estándar.

Table 2. Deposits of ash and overlying mineral material in plantations and adjacent rangelands. Mean value \pm standard error is indicated.

	Plantaciones (N=7)	Pastizales (N=7)
Volumen de ceniza ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	24,13 \pm 8,16*	1,70 \pm 0,44*
Toneladas de ceniza (t ha^{-1})	18,58 \pm 6,28*	1,30 \pm 0,34*
Volumen de material mineral ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	2,29 \pm 1,08	1,34 \pm 1,08
Toneladas de material mineral (t ha^{-1})	2,06 \pm 0,98	1,20 \pm 0,97

* Indica diferencias significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$).

* Indicates significant differences between treatments ($p < 0.05$).

En los pastizales, el espesor medio de ceniza varió entre 0,02 y 0,33 mm, dependiendo de la situación de cobertura del suelo. El espesor de ceniza reciente se correlacionó negativamente con el porcentaje de suelo desnudo [ρ (Spearman) = -0,76; $p = 0,05$] y con el porcentaje de grava [ρ (Spearman) = -0,70; $p = 0,08$]; y positivamente con la presencia de mantillo [ρ (Spearman) = 0,68; $p = 0,09$].

Retención de partículas en plantaciones: relación con variables dasométricas

La tabla 3 resume los valores de cobertura del suelo (espesor del horizonte orgánico) y la capacidad de entrampe de partículas (espesor de ceniza y material mineral), considerando el total de las plantaciones evaluadas (N = 15). Los valores medios del depósito de ceniza reciente no se modificaron al considerar un número mayor de plantaciones (ver **Tabla 2**). Sin embargo, el depósito medio de material mineral suprayacente resultó 3 veces superior que el registrado al considerar sólo las plantaciones aledañas a pastizales degradados (ver **Tabla 2**). La tasa de acumulación de material mineral, que puede ser considerada una tasa de crecimiento del suelo, presentó un valor medio cercano a $1 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$, con un valor máximo de $7 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$.

Las plantaciones presentaron un amplio rango de características dasométricas, abarcando desde plantaciones con dosel abierto hasta situaciones con una gran superposición de copas (e.g. APC >

Tabla 3. Depósitos de material orgánico, ceniza reciente y material mineral suprayacente en plantaciones de pino ponderosa. Se indica valor medio \pm error estándar.

Table 3. Deposits of organic material, ash and overlying mineral material in ponderosa pine plantations. Mean value \pm standard error is indicated.

Plantaciones (N = 15)		
	Valor medio	Mín - Máx
ESPESOR DE HORIZONTE ORGÁNICO (mm)	20,75 \pm 7,04	0,40 - 111,50
CENIZA RECIENTE		
Espesor (mm)	2,33 \pm 0,43	0,25 - 5,32
Volumen (m ³ ha ⁻¹)	23,29 \pm 4,34	2,48 - 53,20
Masa (t ha ⁻¹)	17,94 \pm 3,34	1,91 - 40,96
MATERIAL MINERAL SUPRAYACENTE		
Espesor (mm)	0,69 \pm 0,32	0 - 5,00
Volumen (m ³ ha ⁻¹)	6,88 \pm 3,22	0 - 50,00
Tasa de acumulación (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)	0,98 \pm 0,46	0 - 7,14
Masa (t ha ⁻¹)	6,19 \pm 2,90	0 - 45,00
Tasa de acumulación (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	0,89 \pm 0,41	0 - 6,43

Tabla 4. Variables dasométricas determinadas en el año 2015 y su estimación para 2008. Se indica el valor medio \pm error estándar.

Table 4. Dasometric variables determined in 2015 and estimated for 2008. The mean value \pm standard error is indicated.

Variables dasométricas	Plantaciones (N = 15)			
	Año 2015		Estimación Año 2008	
	Valor medio	Mín - Máx	Valor medio	Mín - Máx
Edad (años)	19,87 \pm 1,38	12,00 - 28,00	12,93 \pm 1,43	4,00 - 21,00
DAP (cm)	20,80 \pm 1,20	12,11 - 31,35	13,45 \pm 1,36	5,30 - 23,80
AB (m ² ha ⁻¹)	31,06 \pm 5,07	8,66 - 84,14	14,74 \pm 3,14	1,65 - 43,75
N° de árboles por hectárea	867,33 \pm 96,63	414,00 - 1879,00	867,33 \pm 96,63	414,00 - 1879,00
Altura dominante (m)	11,17 \pm 0,74	6,10 - 16,73	7,13 \pm 0,90	1,80 - 12,55
IEN (m)	2,71 \pm 0,12	1,92 - 3,49	2,71 \pm 0,12	1,92 - 3,49
APC (m ² ha ⁻¹)	6.378,17 \pm 907,65	756,80 - 13.547,30	3.109,22 \pm 656,96	165,30 - 8.510,00

10.000 m² ha⁻¹). La calidad de sitio de acuerdo al IEN (Gonda & Cortés, 2001) varió de media a media-baja (**Tabla 4**).

Las variables dasométricas condicionaron la capacidad de entrampe. Así el espesor de ceniza se asoció positivamente con el espesor del horizonte orgánico y con las variables dasométricas: número de árboles por hectárea, el AB actual y en el 2008, la altura dominante actual y en el 2008 y el APC en el 2008. El espesor de ceniza no presentó una correlación significativa con la ubicación geográfica ni la distancia al volcán, lo cual sugiere que el área de estudio, que es acotada en el espacio y restringida a sectores planos, resultó homogénea en

ese sentido. Por otro lado, el material mineral depositado en el transcurso de siete años, se asoció significativamente con la edad actual y en el 2008 y con la calidad de sitio (**Tabla 5**).

El análisis de componentes principales (ACP), en el que se consideraron el espesor del horizonte orgánico y las distintas variables dasométricas al momento de caída de la ceniza (edad, número de árboles por hectárea, índice de entrenudos, altura dominante, área basal y área de proyección de copas en el 2008) permitió agrupar los sitios de estudio. El componente 1 (eje x), que explicó el 60,9% de la varianza, se correlacionó positiva y significativamente [ρ (Spearman) = 0,75;

Tabla 5. Correlación entre los espesores de ceniza y de material mineral y las variables dasométricas y de sitio. Se indica el coeficiente de correlación de Spearman y, entre paréntesis, el valor de p.

Table 5. Correlation between the thickness of ash and mineral material and the dasometric and site variables. The Spearman correlation coefficient and p value (between brackets) are indicated.

Plantaciones (N = 15)							
Variable	Posición geográfica			Cobertura del suelo			
	Latitud	Longitud		Distancia al volcán	Espesor del horizonte orgánico		
Ceniza reciente	0,20 (0,30)	0,38 (0,15)		-0,37 (0,17)	0,83 (<0,01)		
Variables dasométricas año 2015							
Variable	Edad	DAP	N° de árboles por hectárea	AB	Altura dominante	APC	IEN
Ceniza reciente	0,41 (0,12)	0,26 (0,33)	0,64* (0,01)	0,69* (0,01)	0,53* (0,04)	0,39 (0,14)	-0,11 (0,70)
Material mineral	0,53* (0,01)	0,45 (0,09)	-0,08 (0,78)	0,18 (0,50)	0,36 (0,18)	0,33 (0,22)	-0,58* (0,02)
Variables dasométricas estimadas año 2008							
Variable	Edad	DAP		AB	Altura dominante	APC	
Ceniza reciente	0,44 (0,10)	0,46 (0,08)		0,74* (<0,01)	0,72* (<0,01)	0,65* (0,01)	
Material mineral	0,52* (0,04)	0,41 (0,13)		0,34 (0,26)	0,39 (0,14)	0,20 (0,47)	

* indica correlación significativa entre la ceniza/material mineral y las variables de sitio y dasométricas ($p < 0,05$).

* indicates significant correlation between the ash/mineral material and the dasometric and site variables ($p < 0.05$)

$p < 0,01$] con el espesor de ceniza. Así, aquellas plantaciones ubicadas hacia valores positivos del eje x, con mayor espesor del horizonte orgánico, mayor número de árboles por hectárea y con mayor APC, AB, altura dominante y edad al momento de caída de la ceniza, presentaron una mayor capacidad de entrampe (**Figura 4**). Aquellas plantaciones con menor ocupación del sitio, aun teniendo mejor calidad de sitio (IEN), se asociaron a valores negativos del eje 1, presentando baja capacidad de entrampe.

Los resultados evidenciaron que la edad de la plantación es una de las variables claves para determinar la capacidad de entrampe. El espesor de ceniza evidenció una relación exponencial significativa con la edad al momento de caída de la ceniza (**Tabla 6; Figura 5**). Este modelo permitió inferir, que en el área de estudio, las plantaciones comienzan a incrementar su poder de entrampe y retención de partículas a partir de ca. 10 años de edad (**Figura 5**).

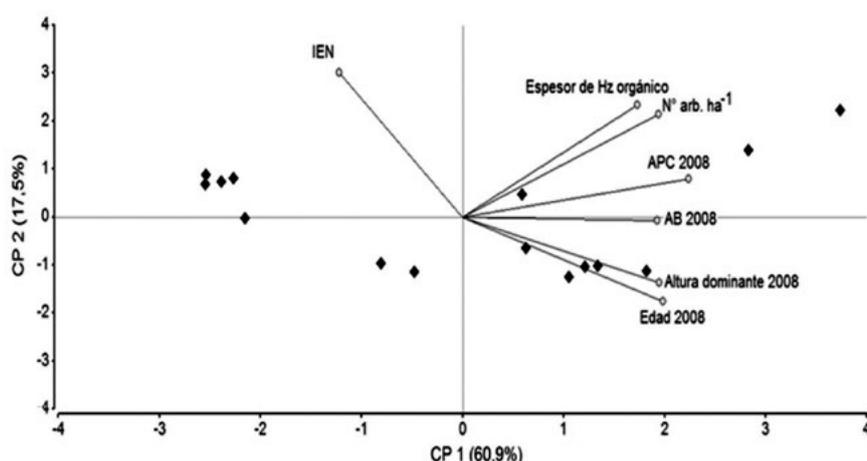


Figura 4. Ordenamiento de las plantaciones de acuerdo al primer y segundo eje del Análisis de Componentes Principales (ACP). APC= Área de proyección de copa; AB= Área basal, IEN= Índice de entrenudos.

Figure 4. Plot ordination according to the first and second axis of the Principal Components Analysis (PCA). APC=Crown projection area; AB=Basal area; IEN: Internodes index.

Tabla 6. Parámetros del modelo de regresión no lineal del espesor de ceniza (variable dependiente) en función de la edad en el año 2008 (variable independiente).

Table 6. Parameters of the non-linear regression model of ash thickness (dependent variable) as function of the age at 2008 (independent variable).

	Est. \pm error estándar	T	Valor de p
Constante	0,21 \pm 0,12	1,810	0,09
Edad 2008	0,15 \pm 0,04	3,823	<0,01

Por sobre la ceniza reciente, sólo algunas plantaciones evidenciaron un enlame de material mineral, que se depositó con posterioridad a la erupción del volcán Chaitén (ver **Tabla 3**). La regresión logística, aplicando el método paso a paso, permitió seleccionar a la edad como variable clave que permite discriminar aquellas plantaciones que entramparon material en el lapso de siete años (periodo 2008-2015) de aquellas que no lo hicieron (**Tabla 7**). Las plantaciones con mayor probabilidad de entrampe (> 50%) fueron aquellas de edades superiores a los 20 años (**Figura 6**).

Tabla 7. Parámetros del modelo de regresión logística de la probabilidad de presencia de materia mineral suprayacente a la ceniza en función de la edad de la plantación.

Table 7. Parameters of the logistic regression model of the probability of entrapping overlying mineral material as function of plantation current age.

	Est. \pm error estándar	Wald	Valor de p
α (Constante)	-9,78 \pm 5,02	3,79	0,05
β (Edad)	0,47 \pm 0,24	3,91	0,05

DISCUSIÓN

Las plantaciones estudiadas presentaron un horizonte orgánico (mantillo) continuo, conformado por acículas de pino. Esto es característico de las plantaciones de coníferas de la Patagonia (Huber & Oyarzún, 1983; Klemmedson *et al.*, 1990; Broquen *et al.*, 2003; Buduba, 2006). La capa orgánica actúa como una barrera que protege al suelo del impacto de los agentes erosivos (La Manna *et al.*, 2016). Por otro lado, en los pastizales aledaños a las plantaciones, la condición de cobertura del suelo resultó muy variable

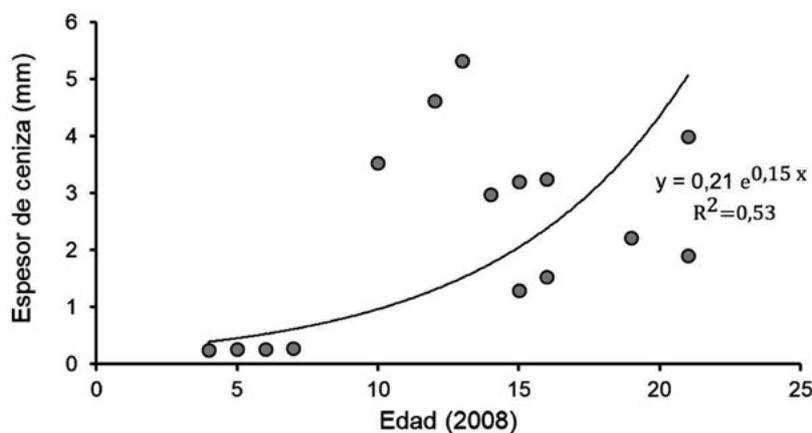


Figura 5. Espesor de ceniza reciente (y) en función de la edad en el 2008 (x). Los puntos representan los valores medios de espesor de ceniza para cada una de las plantaciones ($N = 15$). La curva representa el modelo exponencial.

Figure 5. Exponential model for ash thickness (y) as function of plantation age at 2008 (x). Points represent the mean value of ash thickness for each studied plantation

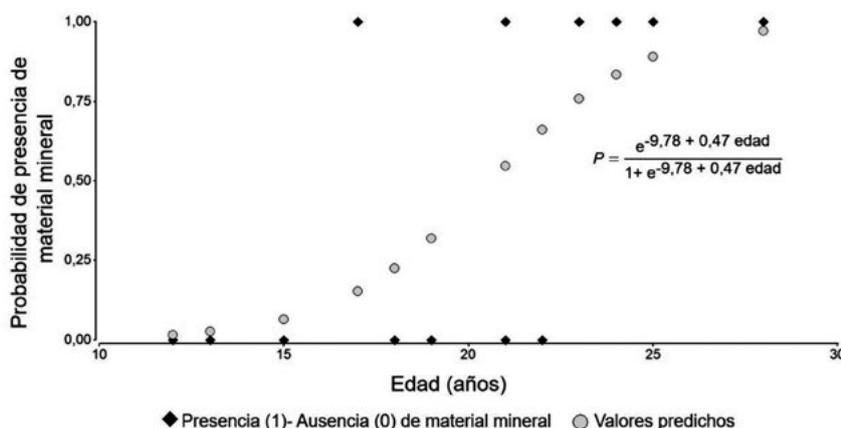


Figura 6. Representación gráfica del modelo de regresión logística de la probabilidad de presencia de material mineral suprayacente a la ceniza (y) en función de la edad actual de la plantación (x).

Figure 6. Logistic regression model for probability of presence of mineral material over the recent ash (y) as function of plantation current age (x).

(ver **Tabla 1**). En estos sitios, la protección del suelo, estuvo limitada a parches con presencia de vegetación.

Estudios realizados en otros países del mundo, como Nueva Zelanda, India y España, sugieren también que, para revertir o mitigar procesos erosivos y promover el crecimiento del suelo, es necesario que los ambientes susceptibles a la degradación, como son los pastizales del ecotono de Patagonia, sean protegidos por una cubierta orgánica (Bennet, 1960; Shankarnarayan *et al.*, 1987; Basher & Painter, 1997). La presencia del mantillo, no sólo reduce la erodabilidad (La Manna *et al.*, 2016), sino que también favorece el entrampe y retención de material eólico (Broquen *et al.*, 2003).

El análisis pareado de plantaciones y pastizales, considerando siete sitios para cada tratamiento, mostró que la capacidad de entrampe y retención de ceniza fue significativamente mayor en las plantaciones, sin mostrar diferencias en la retención del material mineral suprayacente (ver **Tabla 2**). Sin embargo, al considerar la totalidad de las plantaciones ($N = 15$), los valores de entrampe y retención del material mineral aumentaron notablemente (ver **Tabla 3**). Esto podría deberse a que las primeras siete plantaciones están rodeadas de pastizales, por lo tanto, más expuestas a la acción erosiva del viento. En cambio, las 8 restantes están inmersas en una matriz forestada, lo que implicaría una capacidad de entrampe y retención de partículas más efectiva.

Los materiales removidos (ceniza y suelo mineral) de áreas con presencia de suelo desnudo, son redistribuidos por la acción del viento hacia sectores protegidos. Así, estos resultados evidencian que las plantaciones de coníferas en Patagonia, actúan como una gran trampa, reteniendo partículas transportadas por el viento. Esta cualidad, podría resultar clave para revertir procesos de erosión (Augusto & Ranger, 2001). Por otra parte, en los pastizales, ante la ausencia de una cobertura orgánica continua, el entrampe de partículas sólo se evidenció bajo las matas de vegetación. Siete años después del evento, los pastizales presentaron un espesor medio de ceniza de $0,17 \text{ mm} \pm 0,04$, lo cual indica que conservaron sólo

el 3% del material depositado durante la erupción (*i.e.*, 6 mm; Finocchiaro, 2011).

En las plantaciones, no sólo las características del horizonte orgánico condicionaron la retención de partículas, sino que también, ciertas variables dasométricas jugaron un papel fundamental. El poder de entrampe y retención de partículas estuvo relacionado con la edad, el número de árboles por hectárea, el área basal, la altura dominante y el área de proyección de copas (ver **Figura 4**). Sin embargo, la calidad de sitio, no resultó una variable definitoria. Se puede inferir que las plantaciones jóvenes, aunque estén ubicadas en sitios de mayor calidad, no poseen capacidad de entrampe, dada la escasa presencia de mantillo y la baja cobertura del dosel arbóreo.

La regresión no lineal evidenció que las plantaciones en esta área, comienzan a tener capacidad de entrampar y retener partículas en edades cercanas a los 10 años (ver **Tabla 6**; **Figura 5**). Por otro lado, Tarabini (2017) encontró que en plantaciones ubicadas a una latitud similar al área de estudio, pero hacia el oeste, es decir, ubicadas más cerca de la fuente de emisión y con precipitaciones superiores a los 1.000 mm anuales, el entrampe y retención de partículas comienza a menor edad (*i.e.*, cuatro años aproximadamente). Esto puede deberse a un mayor depósito inicial de ceniza y una mayor capacidad de retención, dada la mayor humedad del suelo. En el área de estudio del presente trabajo, que es acotada espacialmente y limitada a sitios planos (ver **Figura 1**), no se evidenció una influencia de la ubicación geográfica ni la distancia al volcán en el depósito de ceniza (ver **Tabla 5**).

El material mineral que se encuentra depositado por sobre la ceniza, está conformado por ceniza y otros sedimentos re-transportados por acción del viento y enriquecidos con materia orgánica de los aportes de la vegetación (Shoji *et al.*, 1993), y estaría representando la velocidad de formación del suelo (Buduba, 2006). En tan sólo siete años las plantaciones mostraron un espesor medio de material mineral suprayacente de $0,69 \pm 0,32 \text{ mm}$, lo cual indica que el ritmo de crecimiento medio del suelo para esta área, es cercano a $1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (ver **Tabla 3**). Las plantaciones que mostraron mayor crecimiento del suelo fueron

aquellas que hoy tienen una edad superior a 20 años, es decir, que cuando comenzaron a entrampearse este material mineral tenían aproximadamente 13 años (ver **Tabla 7**; **Figura 6**).

CONCLUSIONES

Este estudio permitió cuantificar el efecto de las plantaciones en el entrampe de partículas, utilizando como indicadores la ceniza de la reciente erupción del Volcán Chaitén, y el material mineral depositado por sobre la ceniza en un lapso de siete años (*i.e.*, 2008-2015). Las plantaciones resultaron significativamente más efectivas en la retención de partículas que los pastizales. La cobertura del mantillo, la edad, la condición de apertura del dosel y la ocupación del sitio controlaron la capacidad de entrampe de las plantaciones. Este estudio destaca que el depósito de las erupciones volcánicas recientes actúa como un “calibre” y un “reloj”, que permite el análisis de distintos aspectos de los suelos.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue financiado por la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (PI - FI 032/13). Queremos agradecer al Dr. Carlos Buduba (EEAf INTA Esquel - UNPSJB) y al Dr. César Mario Rostagno (CENPAT - CONICET) por sus aportes en el desarrollo de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Apcarian, A & J Irisarri. 1993. Caracterización mineralógica de suelos desarrollados sobre cenizas volcánicas en las provincias de Neuquén y Río Negro (RA). Actas II Jornadas de Vulcanología, Medio ambiente y Defensa Civil. Zapala, Argentina.
- Augusto, L & J Ranger. 2001. Impact of tree species on soil solutions in acidic conditions. *Ann. For. Sci.* 58 (1), 47-58.
- Basher, LR & DJ Painter. 1997. Wind erosion in New Zealand. En: *Proceedings of the International Symposium on Wind Erosion*, Manhattan, Kansas. pp. 3-5.
- Bennett, HH. 1960. Soil erosion in Spain. *Geographical Review*, 50(1), 59-72.
- Bertiller, MB & A Bisigato. 1998. Vegetation dynamics under grazing disturbance. The state-and-transition model for the Patagonian steppes. *Ecol. Austral*, 8(2), 191-199.
- Broquen, P; G Falbo; A Apcarian; 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), 99-110.
- Buduba, C; L La Manna; V Alonso & J Irisarri. 2008. La ceniza del Volcán Chaitén y los Suelos. *Carpeta Técnica, Medio Ambiente N° 9*, EEA INTA Esquel.
- Buduba, CG. 2006. Modificaciones en el pH y contenido de materia orgánica en suelos del ecotono estepa / bosque andino patagónico por implantación de pino ponderosa. Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Cailliez F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Vol. 1. Estimación del volumen. *Estudios FAO, Montes*. 22/1. Roma. 92 p.
- Côlmet Dâage, F; A Marcolin; C López; M Lanciotti; J Ayesa; D Bran; E Andenmatten; P Broquen; J Girardin; G Cortés; J Irisarri; E Besoain; A Sadzawka; G Sepúlveda; S Massaro; G Millot & P Bouleau. 1988. Características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de la cordillera y precordillera del Norte de la Patagonia. Bariloche. *Convenio INTA - ORSTOM*. S. C. de Bariloche, Río Negro. 167 p.
- Defossé, G. 2015. ¿Conviene seguir fomentando las plantaciones forestales en el norte de la Patagonia? *Ecol. Austral*, 25(2), 93-100.
- Escofier, B & J Pagés. 1992. Análisis factoriales simples y múltiples: objetivos, métodos e interpretación. Bilbao, Servicio Editorial Universidad del país Vasco. 285 p.
- Finocchiaro, JM. 2011. Propiedades físicas y químicas del volcán Chaitén en una transecta Oeste-este. Tesis de grado en Ingeniería Forestal, Facultad de Ingeniería, UNPSJB. Argentina.
- Gomez Sanz, V. 2004. Cubiertas forestales y respuesta microclimática. *Forest Systems*, 13(4), 84-100.
- Gonda, H. 2001. Pino ponderosa: productividad de las plantaciones en la Patagonia Andina. Esquel, Argentina. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico. 8 p.
- Gonda, HE & GO Cortés. 2001. Ecuaciones para el manejo de las plantaciones de pino ponderosa en Neuquén: Altura-diámetro, volumen total sin corteza, calidad de sitio en base al largo de entrenudos o acículas, productividad para densidades variables. CIEFAP, Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico. Publicación técnica N° 30. CIEFAP. Esquel, Chubut. 24 p.
- Google Earth Pro 7.3.2. 2018. Image © 2018. CNES/Airbus.
- Hosmer, DW & S Lemeshow. 1989. *Applied regression analysis*. New York: John Wiley. ISBN 0-47-61553-6. 307 p.

- Huber, A & C Oyarzún. 1983. Producción de hojarasca y sus relaciones con factores meteorológicos en un bosque de *Pinus radiata* (D. Don.). *Bosque*, 5:1-11.
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). 2008. Efectos de la erupción del volcán Chaitén sobre los ecosistemas de la provincia de Palena (Patagonia - Chile). Informe técnico. Editores: Christian Hepp K. Aysén (Chile). 30 p.
- Irisarri, J; JM Mendía; C Roca; CG Buduba; MF Valenzuela; F Epele; F Fraseto; G Ostertag; S Bobadilla & E Andenmatten. 1995. Zonificación de las tierras para la aptitud forestal de la Provincia del Chubut. Dirección General de Bosques y Parques de la Provincia del Chubut. Chubut. Formato digital.
- Irisarri, J & J Mendía. 1997. Relaciones suelo-paisaje en la evaluación de la potencialidad forestal de la región central andino-patagónica, Argentina. *Bosque*, 18(1), 21-30.
- Kateb, HE; H Zhang; P Zhang; R Mosandl. 2013. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: a field experiment in Southern Shaanxi Province, China. *Catena* 105:1-10.
- Klemmedson, JO; CE Meier & RE Campbell. (1990). Litter fall transfers of dry matter and nutrients in ponderosa pine stands. *Can. J. For. Res.* 20(7), 1105-1115.
- La Manna, L; CG Buduba & CM Rostagno. 2016. Soil erodibility and quality of volcanic soils as affected by pine plantations in degraded rangelands of NW Patagonia. *Eur J For Res*, 135(4), 643-655.
- Lara, LE & R Moreno. 2009. Hallazgo de una erupción histórica (siglo XVII) del volcán Chaitén. *Santiago*, 22, S5_014.
- Maestre, FT & J Cortina. 2004. Are *Pinus halepensis* plantations useful as a restoration tool in semiarid Mediterranean areas? *For. Ecol. Manage.* 198(1-3), 303-317.
- McDaniel, PA; DJ Lowe; O Arnalds & CL Ping. 2012. Andisols. En: Huang PM, Li Y, Sumner ME (eds) *Handbook of soil sciences*, vol 1, 2da edición. Properties and processes CRC Press (Taylor & Francis), Boca Raton, FL. pp 29-48.
- Paruelo, JM; A Beltrán; E Jobbagy; OE Sala & RA Golluscio. 1998. The climate of Patagonia: general patterns and controls on biotic processes. *Ecol. Austral*, 8(2), 85-101.
- Porto, P; DE Walling & G Callegari. 2009. Investigating the effects of afforestation on soil erosion and sediment mobilisation in two small catchments in Southern Italy. *Catena*, 79(3), 181-188.
- Promis, A; J Caldentei & M Ibarra. 2010. Microclima en el interior de un bosque de *Nothofagus pumilio* y el efecto de una corta de regeneración. *Bosque*, 31(2), 129-139.
- Sarasola, M; VE Rusch; T Schlichter & CM Ghera. 2006. Invasión de coníferas forestales en áreas de estepa y bosques de ciprés de la cordillera en la Región Andino Patagónica. *Ecol. Austral*, 16:143-156.
- Schoeneberger, PJ; DA Wysocky; EC Benham & WD Broderston. 1998. Field book for describing and sampling soils. Natural Resources Conservation Service, USDA, National Soil Survey Center, Lincoln.
- Shankarnarayan, KA; LN Harsh & S Kathju. 1987. Agroforestry in the arid zones of India. *Agroforestry systems*, 5(1), 69-88.
- Shoji, S; R Dahlgren & M Nanzyo. 1993. Terminology, concepts and geographic distribution of volcanic ash soils. En: *Developments in soil science* (Vol. 21, pp. 1-5). Elsevier.
- Tarabini, MM. 2017. Plantaciones de pino ponderosa: su rol en la retención de partículas transportadas por el viento. Tesis de grado en Ingeniería Forestal. Facultad de Ingeniería UNPSJB. Argentina.
- Warkentin, BP & T Maeda. 1980. Physical and mechanical characteristics of Andisols. Ed. Theng BKG. *Soils with variable charge*. New Zealand Soc. Soil Sci. Lower Hutt: 281-301.
- Whicker, JJ; JE Pinder lii & DD Breshears. 2008. Thinning semiarid forests amplifies wind erosion comparably to wildfire: implications for restoration and soil stability. *J. Arid Environ*, 72(4), 494-508.