



LA GEOPEDOLOGIA COMO BASE PARA ZONIFICAR LA APTITUD FORESTAL EN UNA CUENCA DEL NOROESTE DE LA PATAGONIA ARGENTINA

*María Cristina Frugoni
Romina González Musso
Gabriel Falbo
Dolores Zapiola¹*

(Manuscrito recibido el 26 de mayo de 2016, en versión final 22 de julio de 2016)

Resumen

Se realizó un estudio geopedológico a escala semi-detallada (1:50.000) en la cuenca de Buta Mallín, que abarca una superficie de 21.065ha, en el noroeste de la provincia del Neuquén, Patagonia argentina. La geopedología proporciona una dimensión espacial de las relaciones suelo-paisaje, permitiendo disponer de un mapa y su leyenda que ilustran tanto las geformas (contorno) como los suelos integrantes (contenido), sobre la base de que el suelo es tanto paisaje como perfil. De acuerdo a este enfoque, fueron reconocidos tres paisajes: montañas modeladas por la acción glacial, planicie lávica y valle. El relieve consiste principalmente de laderas fuertemente inclinadas y fondos de valle con suelos de drenaje imperfecto. La litología (material parental) corresponde a cenizas volcánicas holocénicas en el sector occidental del área de estudio, mientras que en el sector oriental dominan las tobas y tufitas. Se identificaron 20 formas del terreno con sus suelos integrantes. Con esa información de base se construyeron tablas de atributos de paisaje y de suelos. Respecto a los suelos, se consideraron propiedades relacionadas con la fertilidad física, ya que son las que más inciden en la productividad de las forestaciones con *Pinus ponderosa* (pino ponderosa), la especie más utilizada en la región. Esas tablas fueron integradas y analizadas desde un SIG (Sistema de Información Geográfica) para obtener un mapa de zonificación por aptitud forestal. El área de estudio presenta cuatro clases de aptitud. Apta: 37ha; Moderadamente Apta: 4.512ha; Marginalmente Apta: 6.072ha; No Apta: 10.444ha. Las principales limitaciones que presenta el área son las fuertes pendientes, la altitud y las áreas dominadas por asomos rocosos. El criterio de conservación de los recursos forestales nativos, en este caso el matorral de *Nothofagus antarctica* (ñire) significó la

¹ Universidad Nacional del Comahue - Asentamiento Universitario San Martín de los Andes. Pasaje de la Paz 235. San Martín de los Andes. Neuquén. TE: 02972427618. crisfrugoni@gmail.com

exclusión de estas áreas, a pesar de que los factores físicos del sitio presentaban condiciones favorables para la forestación. Por otra parte, existen más de 4.000 ha de tierras moderadamente aptas, que pueden ser consideradas para un estudio a escala más detallada. La principal actividad de esta cuenca es de pastoreo ganadero ya que es zona de veranadas de crianceros trashumantes del norte neuquino, por lo que los organismos decisores pertinentes podrían impulsar, en conjunto con los campesinos, el desarrollo de sistemas silvopastoriles. Este uso combinado de la tierra permitiría tanto la obtención de madera como la recuperación de tierras de pastoreo, que en la actualidad presentan importantes signos de degradación.

Palabras clave: Relaciones suelo-paisaje, cuenca del Río Neuquén, *Pinus ponderosa*, SIG, suelos volcánicos

GEOPEDOLOGY AS BASE INFORMATION TO FOREST SUITABILITY ZONING IN A CATCHMENT OF NORTHWESTERN PATAGONIA, ARGENTINA

Abstract

Geopedology at a semi-detailed scale (1:50.000) was carried out in Buta Mallín catchment which includes an area of 21.065ha, in the northwest of Neuquén province, Argentine Patagonia. Geopedology provides a spatial dimension of soil-landscape relations, which are displayed in a map and its legend, showing the geoforms (contours) and their soils (content), based on the premise that soil is landscape as well as profile. According to this approach three landscapes were recognized: glacial modeled mountains, plateau and valley. The relief consists mainly of steep to very steep slopes, and valley bottoms with poorly drained soils. Lithology (parent material) corresponds to holocene volcanic ash in the western sector of the study area, while the eastern sector is dominated by tuff. Twenty terrain forms and their soils were identified. With this basic information, attribute tables were constructed considering landscape and soil properties. Regarding soils, physical fertility properties were considered, since these are the most correlated ones with *Pinus ponderosa* (pino ponderosa) growth, the main species used in afforestation in Patagonia. Those tables were included and analyzed with a GIS (Geographic Information System) to obtain a forest suitability map. The study area shows four forest suitability classes. Suitable: 37ha; moderately suitable: 4.512ha; marginally suitable: 6.072ha; not suitable: 10.444ha. The main limitations of the area are the very steep slopes, height and the areas dominated by rock outcrops and detrital covers. *Nothofagus antarctica* (ñire) shrubs cover part of the suitable areas; because of conservation criteria of these natural communities, these lands were considered not suitable. On the other side, there are more than 4.000 ha of moderately suitable lands, which can be considered for a more detailed study.

Transhumant cattle raising is the main land use system in this catchment, which is an ancient culture of the Northern Neuquian peasants. Decision makers could boost the development of agroforestry systems. This combined land use system could allow to obtain timber products as well as recover sheepherding lands, which show presently important signs of degradation.

Keywords: Soil-landscape relationships, Río Neuquén basin, *Pinus ponderosa*, GIS, volcanic soils

Introducción

La necesidad de disponer de una zonificación de diferentes clases de aptitud a distintas escalas, es evidente en la región de Norpatagonia, a los fines de establecer estrategias de planificación sustentables en el uso forestal de la tierra.

En esta región y para las especies forestales dominantes utilizadas en plantaciones, la fertilidad física del suelo –profundidad efectiva, capacidad de retención hídrica, capacidad de almacenar aire- son las que mejores correlaciones presentan con el crecimiento de estas especies (Loguercio y otros 2015b).

Es sabido que la aptitud de las tierras se define por la comparación entre dos componentes: la unidad de tierra -con sus atributos en cuanto a suelo, clima, vegetación y fisiografía- y los requerimientos de la especie. La unidad de tierra y su uso (actual o potencial) definen el sistema de uso de la tierra (FAO, 1985; Huizing y otros, 1995). Una de las características diferenciales en el uso forestal de la tierra es el largo plazo, por lo que las decisiones que se tomen en la actualidad mostrarán sus resultados en un plazo mínimo de 15 a 20 años.

Son entonces, los polipedones y su disposición espacial, los que pueden facilitar contar con una zonificación adecuada de aptitud forestal.

El enfoque geopedológico está basado en el paradigma fundamental de suelo-geomorfología; esto es, las relaciones genéticas entre suelos y geoformas, aunque con una clara orientación aplicada y práctica. La geopedología pretende ser un soporte para el relevamiento de suelos combinando criterios pedológicos y geomorfológicos para establecer unidades de mapeo de suelos y analizar la distribución de los suelos en el paisaje. La geomorfología provee los contornos de las unidades de mapeo (el continente), mientras que la pedología proporciona las unidades taxonómicas (el contenido). Por lo tanto las unidades geopedológicas son más abarcativas que las unidades de mapeo de suelos convencionales, dado que aquéllas también contienen información sobre el contexto geomórfico en los cuales se encuentran y han desarrollado los suelos (Zinck, 2016).

Es entonces, una herramienta muy apropiada para la detección de áreas con diferentes clases de aptitud forestal. Trabajos previos han demostrado su utilidad (Frugoni y otros, 2016).

En el presente trabajo se muestra cómo a partir de la elaboración de un mapa geopedológico a escala de semi-detalle (1:50.000) de una cuenca ubicada en el noroeste de la provincia del Neuquén, Argentina, se zonificó a la misma en clases de aptitud forestal, teniendo en cuenta las características de suelo y paisaje de cada unidad de mapeo.

Cabe destacar que las características consideradas corresponden a factores físicos del sitio. No se han tenido en cuenta otros aspectos que hacen a la aptitud de una tierra, como accesibilidad o cercanía a los mercados, por ejemplo. Entonces, es más correcto considerar que este trabajo analiza la “aptitud forestal de las tierras para el crecimiento”, concepto ligado al de “calidad de sitio” (FAO, 1985).

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio corresponde a la cuenca del río Buta Mallín-Lileo, la que se encuentra inserta en la Región Andina, Subregión Subhúmeda Montañosa (Ferrer y otros, 1991), localizada en el sector nor-occidental de la provincia del Neuquén, Argentina (Figura 1). Abarca una superficie de 21.065 ha, comprendida entre las coordenadas 37° 6' 37.8" y 37° 14' 0.4" S, 70° 55' 52.9" y 71° 07' 2.2" O. Las cotas inferiores están a 1.480 m.s.n.m. mientras que las superiores alcanzan los 2.800 m.s.n.m.



Figura 1: Ubicación del área de estudio.

Esta Subregión, al poseer un relieve elevado, genera una barrera orográfica a los vientos húmedos del Pacífico, lo que provoca una expresión areal restringida de las formaciones boscosas, predominando la estepa herbácea; a diferencia de la zona sur de la provincia, en donde la menor altitud de la Cordillera permite el paso de los mencionados vientos húmedos, lo que favorece el desarrollo de formaciones boscosas más importantes. La cuenca presenta 4 geofomas claramente diferenciables (González Díaz y Ferrer, 1991).

- Geformas derivadas de la morfogénesis glaciaria. *Paisajes con predominio de erosión glacial*, lo que incluye artesas glaciarias, circos arêtes, horns, valles colgantes, etc. La misma se encuentra en las porciones occidental y sur de la cuenca. Esta área posee un basamento geológico consistente en basaltos, andesitas olivínicas, brechas y aglomerados volcánicos, producto de emisiones mantiformes de lava y vulcanismo explosivo durante el Terciario (Ferrer, 1991). *Planicies proglaciarias* (sedimentos fluvio-glaciales) que se encuentran en los sectores oeste y centro de la cuenca y donde la litología dominante es de arenas, gravas y limos de variada composición, producto de la sedimentación fluvial, durante el Holoceno (Ferrer, 1991).
- Geformas derivadas de la remoción en masa. Estas geformas presentan rasgos de deslizamientos, principalmente rotacionales y flujos y se encuentran en la porción este de la cuenca. La geología corresponde a brechas volcánicas, tobas, tufitas e ignimbritas, producto de lluvias de cenizas, nubes ardientes y vulcanismo explosivo en medio continental, durante el Triásico (Ferrer, 1991).
- Geformas derivadas del proceso fluvial, con evidente control estructural. Es una planicie lávica estructural de poco espesor y escasamente disectada. La misma se encuentra al sur del área de estudio. El basamento geológico consiste en basaltos, andesitas olivínicas, brechas y aglomerados volcánicos, producto de emisiones mantiformes de lava y vulcanismo explosivo durante el Terciario (Ferrer, 1991).

Cabe destacar que a pesar de la variabilidad litológica existente en la geología de base, el material de origen de los suelos en parte de la cuenca corresponde a cenizas volcánicas modernas, aportadas por los aparatos volcánicos presentes en la Cordillera de los Andes, y depositadas por acción eólica.

- El clima general es de tipo mediterráneo, con inviernos húmedos y fríos y veranos secos y cálidos. El área de estudio posee un gradiente de precipitaciones en el sentido oeste-este. En el extremo oeste las precipitaciones medias anuales alcanzan los 1150mm mientras que en el extremo este apenas superan los 700 mm (Figura 2).

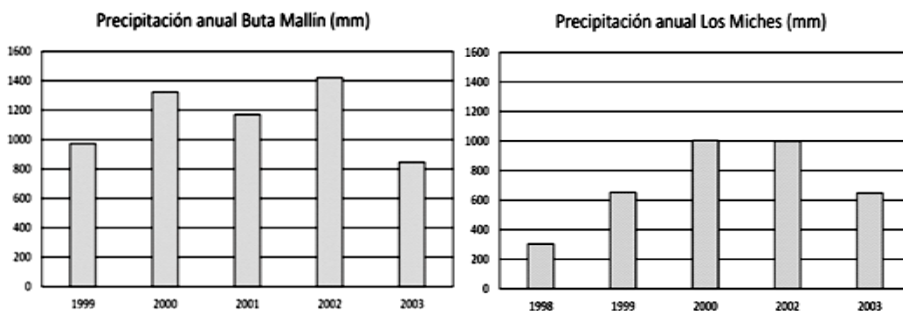


Figura 2. (a) Precipitación anual período 1999-2003. Paso Buta Mallín (extremo oeste de la cuenca). La precipitación media de los 5 años es de 1147mm. (b) Precipitación anual período 1998-2003, exceptuando el año 2001 por estar incompleto (extremo este de la cuenca). La precipitación media de estos cinco años es de 721 mm. Fuente: Autoridad Interjurisdiccional de las cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro (AIC).

La vegetación dominante es estepa herbácea o herbáceo-arbustiva. En las porciones más húmedas de la cuenca, desarrolla el matorral de *Nothofagus antarctica* (ñire).

El uso de la tierra en esta cuenca es pastoril de veranada, integrando el sistema de ganadería trashumante, ancestral y característico del norte neuquino.

Elaboración del mapa geopedológico

Se realizó la fotointerpretación del área de estudio utilizando fotografías verticales con una escala aproximada de 1:50.000. Posteriormente y como se detalla más adelante, las unidades fueron transferidas por digitalización en pantalla mediante herramientas SIG, sobre una imagen satelital ASTER georreferenciada y orto-rectificada.

La metodología de mapeo de suelos se basa en la Clasificación Jerárquica de Geoformas, que es la estructura del Enfoque Geopedológico para el mapeo de suelos (Zinck, 2016). Este sistema propone diferentes niveles de abstracción, siendo los superiores los de mayor generalización y los inferiores los de mayor concretización. En la construcción de la leyenda se consideraron cuatro niveles jerárquicos:

4. Grupo. Paisaje geomórfico: Gran porción de tierra caracterizada tanto por determinados rasgos fisiográficos; una repetición de similares tipos de relieve o modelados como por una asociación de diferentes tipos de relieve o modelados (p.ej. montañas, valles)

3. Subgrupo. Tipo de Relieve/Modelado: Geoforma determinada por una combinación de topografía y estructura geológica (p.ej. cuesta, horst). Tipo de modelado determinado por condiciones morfoclimáticas específicas o procesos morfogénicos (p.ej. glacis, terraza)

2. Familia. Litología. Se refiere a la naturaleza petrográfica de rocas duras y las facies de formaciones no consolidadas y está referida al material parental del suelo.

1. Subfamilia. Forma del terreno: Es la unidad geomórfica elemental, la que sólo puede ser subdividida por medio de fases. Está caracterizada por una geometría, dinámica e historia.

Para el relevamiento de los suelos a campo, se materializaron 13 transectas con un total de 69 puntos de muestreo. Este es uno de los métodos que contempla el enfoque geopedológico, asumiendo que similares geoformas (continente) poseen similares perfiles de suelo (contenido), lo que hace más eficiente el relevamiento de campo (Zinck, 2016; Yemefack y Siderius, 2016). Las transectas fueron definidas con el fin de relevar al menos tres veces todas las unidades de mapeo. En cada uno de los puntos de muestreo, se abrió una calicata en la que se realizó la descripción del sitio y del suelo, de acuerdo a las normas establecidas (Schoeneberger y otros, 1998) y la clasificación preliminar (Soil Survey Staff, 2014). En los perfiles modales, se procedió a la toma de muestras para análisis por horizonte. Además se tomaron muestras no disturbadas para determinar la densidad aparente (Figura 3).

Posteriormente al trabajo de campo, se realizó una corrección de las delineaciones y se elaboró la leyenda definitiva del mapa de suelos. Con la información de las descripciones morfológicas y los datos analíticos, se caracterizaron las unidades de mapeo y se definieron los suelos integrantes de las mismas, clasificados a nivel de Subgrupo (Soil Survey Staff, 2014).

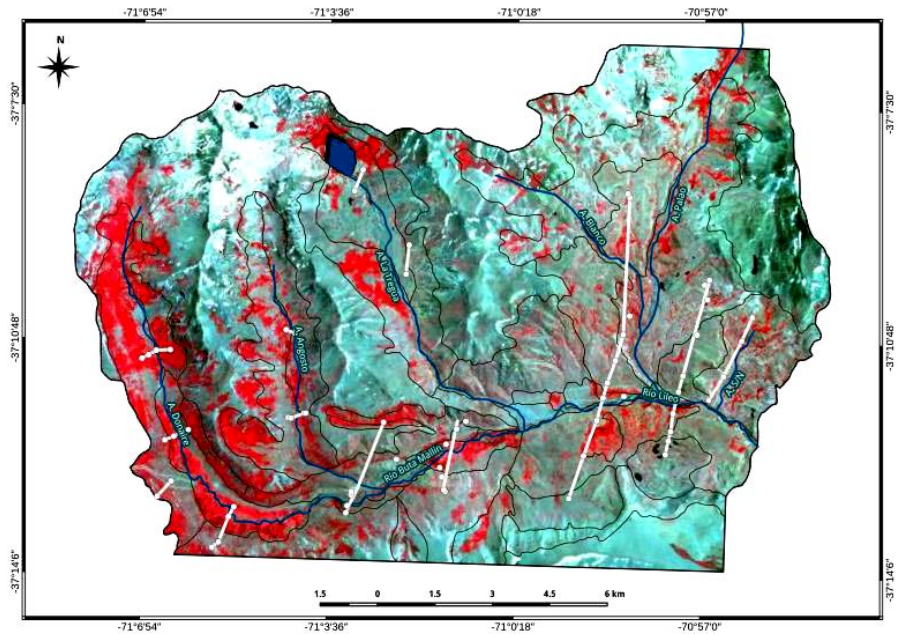


Figura 3. Localización de las transectas en el área de estudio.

Los requerimientos de las pináceas

Diversos estudios han demostrado que en la región de Norpatagonia, los requerimientos de las especies más difundidas son predominantemente referidos a la fertilidad física de los suelos. La profundidad efectiva y la capacidad de reserva de agua son las variables edáficas que más peso tienen en el crecimiento de *Pinus ponderosa* (pino ponderosa) (Broquen y otros, 1998; Loguercio y otros, 2015 a y b). Se asume que estas condiciones deben darse en las regiones con precipitaciones adecuadas para la forestación en secano, las que deben ser superiores a los 500mm de promedio anual.

La zonificación por aptitud forestal se realizó a partir de tablas que facilitarían una estimación cualitativa de la aptitud de las tierras para la forestación en secano. Se consideraron clases de aptitud de determinadas características del suelo y del paisaje, teniendo en cuenta los requerimientos de una forestación con coníferas.

La aptitud global de cada una de las unidades geopedológicas se estableció considerando la característica que aparecía como más limitante (FAO, 1985; Huizing y otros, 1995).

Operaciones con SIG

Para el desarrollo del SIG (Sistema de Información Geográfica) se utilizó el software QGIS (Quantum GIS Development Team, 2016). Se digitalizaron las unidades de mapeo utilizando una imagen ASTER como base.

Por otro lado, a partir de un Modelo Digital de Elevación (ASTER GDEM), se estimó la pendiente promedio de cada polígono, correspondiente cada una de las delineaciones del mapa geopedológico.

Con la cobertura vectorial obtenida y una tabla de atributos asociada, se caracterizaron todas las unidades geopedológicas con una valoración de aptitud de cada una de las características relevadas a campo y las obtenidas en el SIG, a fin de asignar una clase de aptitud a cada polígono.

Las herramientas SIG permitieron además calcular la superficie del área de estudio y de cada unidad de mapeo.

La confección de la cartografía se realizó en el Sistema de Proyección Gauss Kruger (Datum WGS-84), en faja 1.

Resultados y discusión

El mapa geopedológico

De acuerdo al Enfoque Geopedológico (Zinck, 2016), se definieron en el área de estudio 3 paisajes.

- Montañas
- Planicie lávica
- Valle intermontano postglacial

Dentro del paisaje de *montañas* se identificaron dos tipos de relieve claramente diferenciables:

- ✓ Laderas modeladas por erosión glacial. Incluyen laderas de fuertes pendientes en valles en forma de U, circos, valles colgantes. Este tipo de relieve ocupa los cañadones de los arroyos Donaire, Angosto y La Tregua y las laderas de la margen sur de los ríos Buta Mallín y Lileo.
- ✓ Laderas afectadas por procesos de remoción en masa. Este tipo de relieve presenta rasgos de deslizamientos, principalmente rotacionales y flujos. Presenta fuertes inclinaciones y ocupa la cuenca de los arroyos Palao y Sin Nombre.

La *planicie lávica* es una planicie estructural de poco espesor y escasamente disectada. Posee dos tipos de relieve que corresponden a la *mesa* y el *escarpe* de dicha planicie. Ocupa la porción sur-este del área de estudio.

El **valle intermontano postglacial** integra las llamadas planicies proglaciarias (sedimentos fluvio-glaciales). Comprende los valles del arroyo Donaire y de los ríos Buta Mallín y Lileo.

En este paisaje se identificaron dos tipos de relieve:

- ✓ *Superficie de agradación aluvial.* Corresponde al mallín del valle de los ríos Donaire, Buta Mallín y Lileo.
- ✓ *Formas aluviales de piedemonte.* En el contacto entre el paisaje de montañas y de valle, se forman abanicos aluvio-coluviales. Además se observan formaciones “deltaicas” en las desembocaduras de los arroyos La Tregua y Palao.

La Figura 4 y la Tabla 1 muestran el mapa geopedológico y su correspondiente leyenda.

Los suelos y su ocurrencia en el área de estudio

Toda el área presenta claros signos de degradación, evidenciando procesos de erosión hídrica laminar moderada y severa y una cobertura vegetal dominante del 50%. Este proceso es causado por la convergencia de una importante carga de ganado con laderas de fuertes pendientes.

Sobre la base de la información relevada a campo, se establecieron 26 perfiles modales. Tres órdenes de suelos son los que se identificaron en el área de estudio: andisoles, molisoles e histosoles. Cabe destacar que los más difundidos arealmente son los dos primeros.

Los materiales de origen son principalmente de lapilli y cenizas volcánicas holocénicas, en la porción oeste del área de estudio. Hacia el este de la cuenca dominan tobas y tufitas, siendo discontinua la cobertura de cenizas volcánicas.

Suelos derivados de cenizas volcánicas.

Los **andisoles** reconocidos en este estudio poseen una baja densidad aparente ($0.85-1 \text{ g.cm}^{-3}$), en zonas donde el edafoclima es más húmedo, siendo más elevada ($1.1-1.2 \text{ g.cm}^{-3}$) en áreas más xéricas. Tienen una alta capacidad para fijar fosfatos (40-90%) y una buena acumulación de materia orgánica ($15-31 \text{ g.kg}^{-1}$ de C_{org}). La capacidad de retención hídrica puede ser mayor o menor dependiendo del contenido de vidrio volcánico. Fueron reconocidos en el sector occidental de la cuenca. Los Subgrupos identificados fueron: *Vitriixerandes húmicos*, dominando en las laderas modeladas por erosión glacial (Mo112, Mo113, Mo114, Mo115, Mo116, Mo122). Los *Haploxerandes húmicos* a diferencia de los anteriores, poseen una mayor capacidad de retención hídrica (normalmente con un menor contenido de vidrio de tamaño arena) y aparecen subordinados arealmente, en las mismas unidades geopedológicas. Cabe destacar que también se han detectado estos dos subgrupos, arealmente muy subordinados, en las laderas afectadas por procesos de remoción en

masa (Mo211 y Mo212), en sectores en donde el edafoclima favoreció la evolución de cenizas volcánicas hacia materiales con propiedades ándicas (Tabla 2). El subgrupo lítico se encuentra en las porciones más escarpadas de estas unidades y en las proximidades de las cumbres y flancos fuertemente escarpados (Mo111). Los *Endoacuandes típicos* fueron identificados en los valles colgantes presentes en las laderas antes mencionadas (Mo117) y en el rellano del valle intermontano (Va111).

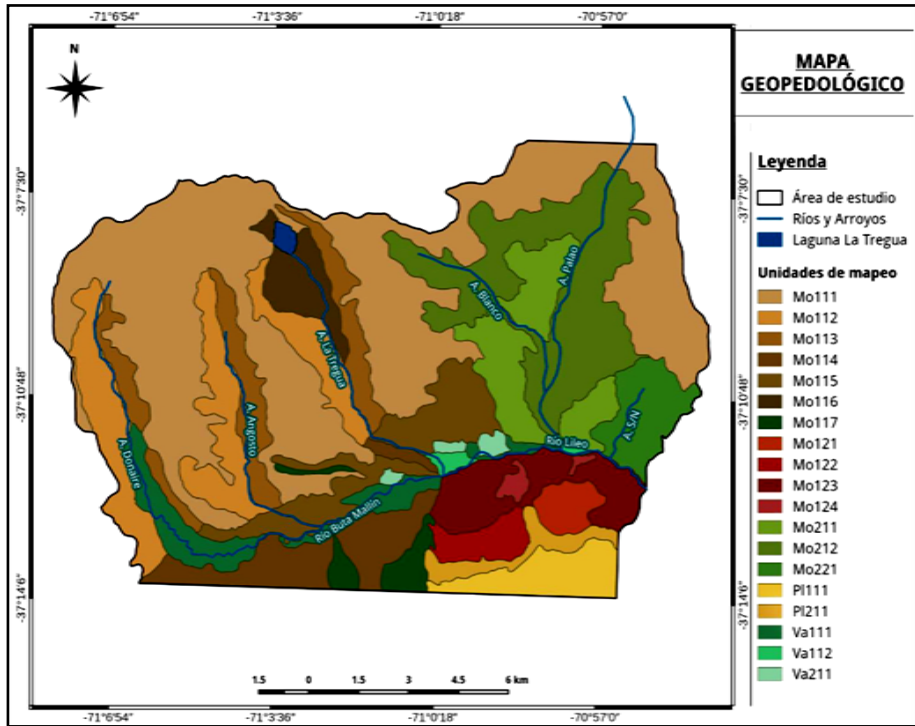


Figura 4. Mapa geopedológico de la cuenca de Buta Mallín.

PAISAJE	RELIEVE/ MODELADO	LITOLOGÍA/ FACIES	FORMA DEL TERRENO	UNIDAD DE MAPEO	SUP. (ha)	SUELOS INTEGRANTES (Suelos dominantes en negrita)
Montañas Mo	Laderas modeladas por erosión glacial Mo1	Lapilli y cenizas volcánicas sobre basaltos, andesitas, brechas y aglomerados volcánicos Mo11	Cumbres y flancos fuertemente escarpados (incluye divisorias de aguas) Ladera de la montaña escarpada Aspecto gral. E (tercio medio e inferior) Ladera de la montaña escarpada Aspecto gral. O (tercio medio e inferior) Ladera de la montaña escarpada Aspecto gral. N (tercio medio e inferior)	Mo111 Mo112 Mo113	7421,97 1915,02 1175,08	Cubierta de déritos y asomos rocosos Vitrixerandes húmicos Haploxerandes húmicos Vitrixerandes húmicos Vitrixerandes líticos
			Ladera de la montaña escarpada Aspecto gral. S (tercio medio e inferior) Base de la montaña inclinada	Mo114 Mo115 Mo116	1035,05 1141,02 479,8	Vitrixerandes húmicos Vitrixerandes líticos Asomos rocosos Vitrixerandes húmicos Haploxerandes húmicos Vitrixerandes húmicos Haploxerandes vitrândicos Cubierta de déritos aluvio-coluviales
			Valle colgante	Mo117	325,6	Endoacuantes típicos
		Cobertura discontinua de lapilli y cenizas volcánicas sobre toba y basalto Mo12	Pendiente compleja (tercio superior) Pendiente suavemente inclinada (tercio superior)	Mo121 Mo122	250,74 304,27	Haploxerotes vitrândicos Cubierta detrítica y asomos rocosos Vitrixerandes húmicos
			Pendiente fuertemente escarpada (tercio medio e inferior) Mallin de ladera	Mo123 Mo124	885,82 87,63	Argixeroles vérticos Haploxeroles vitrândicos Asomos rocosos Argiacuoles típicos

PAISAJE	RELIEVE/ MODELADO	LITOLÓGIA/ FACIES	FORMA DEL TERRENO	UNIDAD DE MAPEO	SUP. (ha)	SUELOS INTEGRANTES (Suelos dominantes en negrita)
Planicie lávica Pl	Mesas PI1 Escarpe PI2	Basaltos, andesitas olivínicas, brechas y aglomerados volcánicos PI11	Interfluvio	PI111	583,03	Cubierta detrítica y asomos rocosos
Valle intermontano postglacial Va	Superficie de agradación aluvial Val Formas aluviales de piedemonte Va2	Aluvial Va11 Aluvio-coluvial Va21	Rellano Delta	Va111 Va112	766,15 94,81	Endoquarques típicos Epioloquales típicos Medifitris fluvioaéuticos Cantos rodados
Laderas afectadas por procesos de remoción en masa Mo2	Cobertura discontinua de lapilli y cenizas volcánicas sobre toba Mo21	Laderas denudacionales moderadamente disectadas	Laderas denudacionales moderadamente escarpadas, fuertemente socavadas	Mo211	1170,01	Haploxerotes vitríndicos Argixerotes vérticos Haploxerotes húmicos

Tabla 1. Leyenda del mapa geopedológico.

Los suelos derivados de cenizas volcánicas que no reunían los requisitos de las propiedades ándicas del suelo (a causa de un edafoclima más xérico) fueron clasificados como **molisoles** (Soil Survey Staff, 2014). El Subgrupo identificado fue *Haploxeroles vitrándicos*. Estos suelos están asociados a unidades de mapeo ubicadas más hacia el este que las anteriores (tanto en las laderas modeladas por acción glacial, como las afectadas por procesos de remoción en masa) y en donde la cubierta de cenizas ya es discontinua (Mo12 y Mo21), en las porciones del paisaje que han favorecido la acumulación de estos materiales (Mo121, Mo211) (Tabla 2).

Subgrupo	Vitrixerandes húmicos	Haploxerandes húmicos	Haploxeroles vitrándicos
Erosión hídrica	Laminar moderada	Laminar moderada	Laminar moderada a severa
Material parental	Cenizas volcánicas		
Secuencia de horizontes	A - Bw		
Textura	sLA, sLAg, sA	sLA, sL	FA
Estructura	gs, bsad	Fluffy, gs, bsad	Gs y bsad
Consistencia	Muy friable; frágil; no a débilmente untuoso; no ad., no pl.	Muy friable; frágil; débil a fuertemente untuoso; no ad., no pl.	Muy friable; suelto; no untuoso; no ad., no pl.
Profundidad efectiva (cm)	100-120	100-120	80-100
C (g.kg) en epipedón	23	27	12
media de los primeros 60cm	Densidad aparente (Mg.m ⁻³)	0,98	0,90
	% agua a 1500KPa	10,8	17,9
	pHw	5,8	6,1
	pHKCl	5,1	5,3
	pHNaF 2'	8,7	9,2
	pHNaF 60'	9,5	10,0
	PO4 ret (%)	62,0	72,0

Tabla 2. Características físicas y físico-químicas de los suelos bien drenados derivados de cenizas volcánicas en la cuenca de Buta Mallín. Los valores corresponden a la media de los perfiles modales. Referencias: sLA: pseudolimoarenoso; sLAg: pseudolimoarenoso grueso; sA: pseudoarenoso; sL: pseudo limoso; FA: franco arenoso; gs: grano suelto; bsad: bloques subangulares débiles; no ad.: no adhesivo; no pl.: no plástico.

Suelos derivados de toba

El subgrupo identificado fue *Argixeroles vérticos*, con la particularidad de que el horizonte argílico posee arcillas expandibles. Fueron descriptos en las áreas en que los depósitos de cenizas volcánicas están ausentes. Se encuentran dominando en los sectores más orientales de las laderas modeladas por erosión glacial (Mo123) y en las laderas afectadas por procesos de remoción en masa (Mo212). (Tabla 3). En

los sectores en donde el drenaje se ve impedido (mallines de ladera), se han descrito *Argiacuoles típicos* (Mo124).

Suelos derivados de tufitas

Estos suelos también fueron clasificados como **molisoles**. El subgrupo identificado fue *Argixeroles típicos*. En este caso, el horizonte argílico no posee cutanes de tensión. Son dominantes en las laderas denudacionales, fuertemente socavadas (Mo221). (Tabla 3)

Subgrupo	Argixeroles vérticos	Argixeroles típicos	
Erosión hídrica	Laminar moderada a severa	Laminar severa	
Material parental	toba	tufita	
Secuencia de horizontes	A-Bt-Btss	A-Bt-C	
Textura	FA/Fa/a	FaA/Fa/a	
Estructura	gs/bsa/pr	Bsad/bsaf	
Consistencia	Sueltos a muy firmes, no a muy adhesivo, no a muy plástico	Friable, ligeramente a muy adhesivo, ligeramente a muy plástico	
Profundidad efectiva (cm)	30-50	70	
Media del epipedón	C (g.kg)	7,7	12,2
	pHw	5,7	5,9
	pHKCl	4,9	5,1
	Ca ⁺⁺ (cmol ⁽⁺⁾ /kg)	19,48	20,6
	Mg ⁺⁺ (cmol ⁽⁺⁾ /kg)	1,02	1,98
	K ⁺ (cmol ⁽⁺⁾ /kg)	1,40	1,7
	Na ⁺ (cmol ⁽⁺⁾ /kg)	0,46	0,45
	CIC (cmol ⁽⁺⁾ /kg)	24,18	24,13
	% Sat. Bases	92,50	100

Tabla 3. Características físicas y físico-químicas de los suelos bien drenados derivados de tobas y tufitas en la cuenca de Buta Mallín. Los valores corresponden a la media de los perfiles modales. Referencias: FA: franco arenoso; Fa: franco arcilloso; a: arcilloso; FaA: franco arcillo arenoso; gs: grano suelto; bsa: bloques subangulares; pr: prismas; bsad: bloques subangulares débiles; bloques subangulares fuertes.

Suelos orgánicos.

Los **histosoles** fueron detectados en el valle (Va111). El subgrupo identificado fue *Medifibristes fluvacuénticos*, en sectores localizados y próximos a los cursos de agua.

Zonificación de la aptitud forestal

Las tablas elaboradas para la zonificación de aptitud forestal consideraron características del paisaje y edáficas. En cuanto a las características del paisaje, al aumentar la pendiente dominante, la tierra se tornaba menos apta. La cobertura vegetal se consideró teniendo en cuenta tanto los impedimentos que podía provocar para realizar la forestación (la estepa herbácea presenta bajos impedimentos, mientras que en la estepa herbáceo-arbustiva, estos son mayores), como la protección de la vegetación forestal nativa de ñire. Asimismo, la vegetación de gramíneas y ciperáceas indicaba tierras no aptas para la forestación con pino, por estar asociada a suelos mal drenados. Altitudes superiores a los 1800m snm y áreas dominadas por asomos rocosos fueron consideradas no aptas (Tabla 4).

PAISAJE		
PENDIENTE		
Ligera	<2%	Muy Apto
Moderada	2-8%	Apto
Abrupta	9-15%	Moderadamente Apto
Muy abrupta	16-30%	
Escarpada	31-70%	Marginalmente Apto
Muy escarpada	>70%	No Apto
COBERTURA VEGETAL		
Estepa herbácea		Muy Apto
Estepa herbáceo-arbustiva (incluye caña colihue)		Apto
Matorral de ñire		No Apto
Gramíneas y ciperáceas		No Apto
CONDICIONES EXCLUYENTES		
Altitud superior a los 1800m snm		No Apto
Cubiertas detríticas y asomos rocosos		No Apto

Tabla 4. Características del paisaje y sus clases de aptitud en la cuenca de Buta Mallín. Condiciones excluyentes.

En cuanto a las características edáficas, se discriminaron los suelos clasificados a nivel de suborden, siendo los andisoles (suelos derivados de cenizas volcánicas, con propiedades ándicas) los suelos que presentaron mayor aptitud forestal. Esto es debido a que los suelos que cumplen con los requisitos de las propiedades ándicas (Soil Survey Staff, 2014), poseen propiedades físicas únicas, muy favorables para la instalación y desarrollo de la vegetación, p.ej. baja densidad aparente, alta porosidad total, alta capacidad de retención hídrica y buena permeabilidad (Mizota y van Reewijk, 1989; Shoji y otros, 1993). El criterio del porcentaje de fosfato retención y porcentaje de agua a 1500 KPa, reúne tanto las propiedades ándicas del suelo (o la falta de ellas) como la capacidad de retención hídrica. Las texturas “aparentes” o “seudo texturas” que presentan estos suelos, están directamente relacionadas con la

capacidad de almacenamiento de agua (Frugoni 2004). Los suelos con horizonte argílico fueron diferenciados entre los que presentaban o no cutanes de tensión. Esta última característica es una clara limitación física para la exploración radicular ya que las arcillas expandibles estrangulan las raíces cuando se humectan. La profundidad efectiva está definida por la profundidad de suelo que puede ser explorada por las raíces, sin mayores impedimentos. La pedregosidad era un limitante tanto del volumen explorable por parte de las raíces, como de la capacidad de retención hídrica del suelo (Tabla 5).

SUELO		
SUBORDEN		
Xerandes		Apto
Xeroles		Moderadamente Apto
Acuandes		No Apto
Acuoles		
SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS		
Con propiedades ándicas	Fosfato-retención >25% y retención hídrica a 1500 KPa \geq 15%	Muy Apto
	Fosfato-retención >25% y retención hídrica a 1500 KPa < 15%	Apto
Sin propiedades ándicas	Fosfato-retención <25%	Moderadamente Apto
SUELOS CON HORIZONTE ARGÍLICO (Bt)		
Sin cutanes de tensión (slickensides)		Moderadamente Apto
Con cutanes de tensión (slickensides)		Marginalmente Apto
DRENAJE		
Bueno (bien drenado y moderadamente bien drenado)		Muy Apto
Excesivo (algo excesivamente drenado y excesivamente drenado)		Moderadamente Apto
Imperfecto (algo pobremente drenado, pobremente drenado y muy pobremente drenado)		No Apto
PROFUNDIDAD EFECTIVA (cm)		
Profundo	150-100	Apto
Moderadamente profundo	100-50	Moderadamente Apto
Somero	50-20	Marginalmente Apto
Muy somero	<20	No Apto
PEDREGOSIDAD		
Sin piedras		Muy Apto
Gravoso, guijoso, pedregoso (15 - <35%)		Apto
Muy gravoso, guijoso, pedregoso (35 - <60%)		Moderadamente Apto
Extremadamente gravoso, guijoso, pedregoso (60 - <90%)		Marginalmente Apto

Tabla 5. Características de los suelos y sus clases de aptitud en la cuenca de Buta Mallín.

Las características mencionadas más arriba fueron aplicadas a cada una de las unidades geopedológicas, resultando en el mapa de aptitud forestal (Tabla 6, Figura 4).

Unidades geopedológicas	Suelos dominantes	Limitaciones Principales	Aptitud Forestal	Superficie (ha)
Base de la montaña inclinada (Mo116)	Vitriixerandes húmicos	Sin limitaciones	Apto	36,73
Laderas modeladas por erosión glacial (Mo113, Mo114, Mo116, Mo121, Mo122). Laderas afectadas por procesos de remoción en masa (Mo211, Mo221) Abanicos aluviales (Va211)	Vitriixerandes húmicos Haploxerolos vitrándicos Argixerolos típicos	Pendientes abruptas y muy abruptas	Moderadamente Apto	4511,54
Laderas modeladas por erosión glacial (Mo112, Mo114, Mo115, Mo123) Laderas afectadas por procesos de remoción en masa (Mo212)	Vitriixerandes húmicos Argixerolos vérticos	Pendientes escarpadas Suelos extremadamente gravosos, pedregosos	Marginalmente Apto	6072,24
Laderas modeladas por erosión glacial (Mo112, Mo113)	Vitriixerandes húmicos	Conservación del bosque natural (matorral de ñire)		858,05
Valles colgantes (Mo117). Mallines de ladera (Mo124). Rellano de valle intermontano (Va111)	Endoacuandes típicos Argiacuoles típicos	Suelos algo pobremente drenados a muy pobremente drenados	No Apto	1179,38
Cumbres y flancos de montaña (Mo111). Mesa y escarpe de la planicie lávica (PI111, PI211). Delta (Va112)	Cubierta de detritos, asomos rocosos, acarreos aluviales, sin desarrollo edafológico	No suelo		8406,85

Tabla 6. Aptitud Forestal basada en propiedades edáficas y de sitio en la cuenca de Buta Mallín.

Conclusiones

El mecanismo de elaboración de los mapas geopedológicos provee de información espacial del paisaje, suelos y geomorfometría, siendo las relaciones entre estos atributos, herramientas de gran utilidad para los distintos aspectos del ordenamiento territorial.

En este caso, como se menciona más arriba, el uso principal de la tierra en esta cuenca es el de veranada para la ganadería trashumante, una práctica ancestral ejercida por los crianceros del norte neuquino. Buena parte de ellas muestra claros signos de degradación debida principalmente a la sobrecarga de ganado. Esta zonificación puede permitir la realización de estudios más detallados en las áreas moderadamente aptas para la forestación con coníferas en secano.

Esos estudios podrían conducir, por parte de los tomadores de decisión, a incentivar la implementación de sistemas silvopastoriles en conjunto con los crianceros. Este sistema combinado de uso de la tierra permitiría obtener tanto producción maderera, como recuperar las tierras de pastura tanto en calidad como en cantidad de la oferta forrajera.

Por otra parte, y dado que el área estudiada integra la alta cuenca del río Neuquén, estas acciones podrían contribuir a la conservación de tierras de gran importancia estratégica.

Bibliografía

- BROQUEN P.; GIRARDIN, J.L.; FALBO, G.; ALVAREZ, O.. (1998). Modelos predictores de índice de sitio en Pinus ponderosa Dougl. en base a características del suelo andinopatagónico oriental, 37°-41° S, República Argentina. En: *Revista Bosque* 19(1): 71-79.
- FAO. (1985). *Evaluación de Tierras con fines forestales*. M-30. Roma, Italia.
- FERRER J.A. (1991). Geología. En: *Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén*. Plano N° 2. C.F.I. – COPADE.
- FERRER J.A.; IRISARRI J.A.; MENDIA J.M. (1991). Síntesis de los factores del medio geográfico y de las propiedades de los suelos. En: Ferrer, J. *Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén*. Vol 1 Tomo 2. C.F.I. – COPADE.
- FRUGONI, M.C. (2004). Estimación del contenido de humedad basada en las texturas descriptas a campo en andisoles bajo régimen údico (Norpatagonia, Argentina). *XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Paraná, Entre Ríos.
- FRUGONI, M.C.; DEZZOTTI, A.; MEDINA, A.; SBRANCIA, R. and MORTORO, A. (2016). Chapter 30: *Design and Evaluation of an Afforestation Project Based on Geopedologic and Ecological Information in North-Western Patagonia, Argentina*. 489-504. J.A. Zinck et al (Eds). Springer.
- GONZÁLEZ DÍAZ, E.; FERRER, J.A. (1991). Geomorfología. En: *Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén*. Plano N° 6. C.F.I. – COPADE.

- HUIZING G.; FARSHAD, A.; DE BIE, K. (1995). Land Evaluation (Land Use System Evaluation). *ITC Lecture Notes*. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Enschede, The Netherlands.
- LOGUERCIO, G. A.; LA MANNA, L.; GONDA, H.; MOHR Bell, D.; HEITZMMAN, L. y FRUGONI, C. (2015a). *Herramientas para zonificar la calidad de sitio de pino ponderosa y sitios especiales para especies forestales de alto valor maderable en Neuquén*. PIA 10092. BIRF 7520 AR. Informe Final (inédito).
- LOGUERCIO, G.; FRUGONI, C. y LETOURNEAU, F. (2015b). Capítulo 7: La calidad de sitio. *Manual de buenas Prácticas para el manejo de plantaciones forestales en el noroeste de la Patagonia*. Editores: L. Chauchard, M.C. Frugoni, C. Nowak. Buenos Aires. Cap. 7. 141-164.
- MIZOTA, C. and VAN REEWIJK, L.P. (1989). *Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions*. *Soil Monograph 2*. IRSIC.
- Quantum GIS Development Team (2016). Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
- SCHOENEBERGER P.J. WY SOCKY D.A.; BENHAM E.C.; BRODERSON W.D. (1998). *Libro de Campaña para la descripción y muestreo de suelos*. Versión 1.1. Centro Nacional de Relevamiento de Suelos. Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Lincoln, Nebraska. Traducción al español por investigadores de AICET, Instituto de Suelos y Evaluación de Tierras. INTA, 2000
- SHOJI S.; M. NANZYO and R. DAHLGREN. (1993). Volcanic Ash soils. Genesis, properties and utilization. Elsevier.
- Soil Survey Staff. 12th Edition. (2014). *Keys to Soil Taxonomy*. U.S. Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS).
- YEMEFACK M. & W. SIDERIUS. (2016). Chapter 16: Applying a Geopedologic Approach for Mapping Tropical Forest Soils and Related Soil Fertility in Northern Thailand. 265-284. In: *Geopedology. An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies*. J.A. Zinck et al (Eds). Springer. 556 pp.
- ZINCK J.A. (2016). The Geopedologic Approach. Chapter 4. 27-60. In: *Geopedology. An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies*. J.A. Zinck et al (Eds). Springer.