

## Relaciones entre las forestaciones, la erosión del suelo y la potencialidad productiva en la transición bosque-estepa (Andinopatagonia, Argentina)

P. Broquen\*, G. Falbo, A. Apcarián, F. Candan, J. Girardin y V. Pellegrini

Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Comahue.  
Ruta 151, km 12,5. 8303 Río Negro. Argentina

### Resumen

En la región Andinopatagónica —provincia del Neuquén—, las áreas forestadas para producción maderera han aumentado en las últimas décadas, encontrándose en su mayor parte emplazadas en el ecotono bosque-estepa, donde la desertificación por sobrepastoreo es creciente. Esto torna crítico considerar otras funciones del bosque tales como la conservación del suelo, para lo cual se simuló regionalmente el uso forestal y su efecto sobre la erosión, estimando y comparando la erosión actual y simulada en las unidades cartográficas de suelos forestalmente aptas. El control potencial de la erosión por las forestaciones fue evidente en las unidades con vegetación de estepa. Por otra parte se estimó y comparó a campo la erosión actual y sus consecuencias sobre la potencialidad productiva con *Pinus ponderosa* Dougl. —primera plantación, de 14 a 19 años— y con estepa subarbuscivo-graminosa. Se seleccionaron 11 pares de parcelas dirección oeste-este, en sitios representativos, cada par bajo cada tipo de vegetación y con equivalentes condiciones fisiográficas. El espesor del horizonte-A fue significativamente mayor bajo pino que bajo estepa, implicando pérdidas de suelo bajo estepa de  $136 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , significando disminuciones del Índice de Sitio a los 14 años entre 0,53 y 0,43 m, lo que implicó una pérdida de potencialidad productiva del ecosistema. La pérdida de suelo bajo estepa respecto a la pérdida bajo forestaciones con pino evidenció su efecto sobre el control de la erosión y mantenimiento de la productividad real. Esto tiene una proyección temporal, por lo que es decisiva su consideración para el manejo del ecosistema.

**Palabras clave:** degradación de la tierra, erosión, forestación, *Pinus ponderosa* Dougl., productividad real, Patagonia.

### Abstract

#### Afforestations and its relationships with soil erosion and productivity in forest-steppe transition (Andinopatagonia, Argentina)

In Andinopatagonian region —Neuquén province— forested areas for wood production, located in forest – steppe ecotone, have increased during the last decades, where one of the most serious environmental problems is desertification caused by over-grazing. This turn critical other functions of afforestations such as soil conservation. A regional simulation of forest land use and its effect on soil erosion was done. Erosion under forest was estimated and compared with actual erosion, on soil cartographic units from moderately to very apt. Potential forest control on erosion was evident in the cartographic units under steppe vegetation. Field erosion and its consequences on potential productivity was estimated and compared under *Pinus ponderosa* Dougl. —first stand from 14 to 19 years old— and under shrub gramineous steppe. Eleven paired plots were selected in representative sites of the cartographic units, distributed from west to east, each pair under each vegetation type with equivalent physiographic conditions. A-horizon depth was higher under pine than under steppe, which indicated soil losses under steppe about  $136 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ . This determined a decrease on Site Index at 14 years between 0.53 and 0.43 m, which implied a decline on potential productivity of the ecosystem. Soil losses under steppe in relation to soil losses under afforestations evidenced forest effect on erosion control and sustainable productivity uphold. This has a temporal projection and its consideration is decisive for ecosystem management.

**Key words:** land degradation, erosion, afforestation, *Pinus ponderosa* Dougl., real productivity, Patagonia.

\* Autor para la correspondencia: pbroquen@yahoo.com

Recibido: 20-06-02; Aceptado: 17-03-03.

## Introducción

En la región andinopatagónica el principal uso agrario de la tierra es la ganadería extensiva —ovina y caprina— con una carga animal de 0,33-0,5 EO<sup>1</sup> ha<sup>-1</sup> (Ayesa y Becker, 1991; Bonvissuto *et al.*, 1993) soportando el 50% de la dotación de ovinos del país (Coppa, 1985). En la provincia del Neuquén, en particular en el ecotono bosque-estepa donde domina arealmente la estepa subarbuscivo-graminosa, las áreas forestadas han aumentado en las últimas décadas, siendo el principal propósito de las forestaciones la producción de madera. La especie comercialmente más utilizada en la región es el *Pinus ponderosa* Dougl.

El pastizal patagónico está fuertemente degradado y en vías de desertificación, lo que fue causado por el sobrepastoreo produciéndose un agravamiento de las condiciones de aridez (Movia, 1984; Ferrer *et al.*, 1990c, 1990d; I.N.T.A - G.T.Z., 1995). En el siglo pasado la vegetación en el ecotono bosque-estepa y en la estepa patagónica estaba en equilibrio dinámico, regulado por la flexibilidad del pastizal. La estructura del pastizal se modificó y fue perdiendo flexibilidad (Coppa, 1985). Por una parte, los aborígenes provocaban incendios para cultivar y cazar guanacos (*Lama guanicoe* M.). Por otra parte, la colonización significó la reducción de las poblaciones de herbívoros nativos y sus depredadores y la introducción del ganado doméstico (Coppa, 1985), junto con la desaparición de la práctica de incendios que favoreció el avance del ciprés [*Austrocedrus chilensis* (Don.) Florín *et* Boutleje] sobre la estepa (Veblen y Lorenz, 1988).

La intensidad y persistencia del sobrepastoreo determinó la degradación física del suelo y cambios en la composición y cobertura de la vegetación, la que pasó a estar dominada por especies resistentes al pastoreo, por lo que se incrementaron los procesos erosivos (Coppa, 1985; I.N.T.A. - G.T.Z., 1995, 1997). Es importante considerar, además de la producción de madera, otras funciones de una forestación tales como su incidencia en la conservación del ambiente y la sustentabilidad del sistema. Es crítico para la región el efecto de las forestaciones en la conservación de los recursos suelo y agua. La cobertura forestal tiene una fuerte incidencia en la hidrología, favoreciendo la infiltración y frenando la escorrentía y la producción de sedimentos lo que significa una fuerte

disminución de la erosión hídrica y eólica. Es fundamental la toma de conciencia del valor integral que tienen los bosques, exigiendo el cumplimiento de todas aquellas funciones compatibles con el ambiente que lo rodea y no sólo la tradicional producción de madera, asumiendo en todos los casos el mantenimiento del potencial productivo del ecosistema, lo que implica el uso racional y eficiente de los recursos naturales (Mather, 1990; Donoso Zegers, 1993; Sadanandan Nambiar, 1999).

Un elemento central de la sustentabilidad es el conocimiento y manejo de la productividad en el largo plazo, evitando daños irreversibles o inaceptables en los sitios o el ambiente. Dentro de los criterios de sustentabilidad está implícito lograr una tendencia no declinante de la potencialidad productiva de la plantación y la protección y/o mejora del suelo (Sadanandan Nambiar, 1999).

El área de estudio se encuentra ubicada en el sudoeste de la provincia del Neuquén abarcando una superficie aproximada de 80.000 hectáreas en la transición a la estepa, donde se encuentran mayoritariamente los bosques implantados con pino ponderosa para producción maderera.

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto del uso forestal de la tierra sobre la erosión respecto al uso actual de los suelos dominantes en la zona de estudio.

Para cumplimentar el objetivo planteado se consideraron tres aspectos: (i) Determinación de la magnitud de la erosión bajo el uso actual y bajo uso forestal simulado, a modo de obtener valores de referencia para evaluar su efecto sobre la erosión; (ii) la estimación y comparación de la erosión actual bajo pino ponderosa y bajo estepa subarbuscivo-graminosa en condiciones de sitio equivalentes; (iii) el efecto de las pérdidas de suelo sobre la productividad real.

## Material y métodos

El estudio se localizó en la región Extra Andina, subregión Subhúmeda de Planicies, Colinas y Serranías (Ferrer *et al.*, 1990a, 1990b) dentro del ecotono bosque-estepa, desde 39° 57' LS y 71° 11' LW hasta 39° 59' LS y 71° 51' LW, en el sudoeste de la provincia del Neuquén (Patagonia, Argentina). Geológicamente la zona fue modelada por los glaciares y recubierta luego

<sup>1</sup> EO: promedio anual de los requerimientos de una oveja de 50 kg que gesta y cría un cordero hasta el destete (tres meses). Un ovino equivale a 0,16 bovinos (Cocimano *et al.*, 1995).

por mantos de cenizas volcánicas de espesor irregular, acorde a la distancia a la fuente y a los vientos dominantes de la zona con dirección oeste-este. El gradiente altitudinal varía de 1.000 a 700 m descendiendo hacia el oeste, el clima general es templado húmedo con estación seca contrastante y la precipitación media anual varía de 1.000 a 500 mm de oeste a este (Barros *et al.*, 1983). Los suelos dominantes en el ecotono bosque-estepa pertenecen al orden Andisoles y Molisoles cuyo material parental es ceniza volcánica depositada sobre material glaciario y/o toba<sup>2</sup>, son bien drenados, con régimen térmico méxico e hídrico xérico (Colmet Daage *et al.*, 1988a, 1988b; Ferrer *et al.*, 1990a).

El ecotono se encuentra entre el bosque mixto húmedo de *Nothofagus* —donde los suelos son Andisoles— y la estepa subarbuscivo-graminosa —donde los suelos son Aridisoles y Entisoles— (Colmet Daage *et al.*, 1988b; Mazzarino *et al.*, 1998). La vegetación está compuesta principalmente por la estepa subarbuscivo-graminosa (Bran, 1992) dominada por *Stipa speciosa* Trin. (coirón amargo) y *Mulinum spinosum* Pers. (neneo) y bosquetes aislados de *Nothofagus antarctica* (Forst.f.) Oerst. (ñire) y *Austrocedrus chilensis* (Don.) Florín et Boutleje (ciprés de la cordillera) (Movia *et al.*, 1982; Bran, 1992; Correa, 1998).

### **Determinación de la magnitud de la erosión bajo el uso actual y bajo uso forestal simulado, a modo de obtener valores de referencia para evaluar su efecto sobre la erosión**

Se partió de los antecedentes (Ferrer *et al.*, 1990c, 1990d; Colmet Daage *et al.*, 1988a, 1988b) y de las observaciones directas y mediciones hechas sobre el terreno. Se utilizaron dos mapas base del área de estudio, el de suelos y el de riesgo de erosión hídrica, ambos a escala 1:500.000 (Ferrer *et al.*, 1990b). El mapa de riesgo de erosión hídrica para los suelos dominantes de cada unidad cartográfica fue realizado por Ferrer *et al.* (1990d), aplicando la ecuación universal de pérdida de suelo (U.S.L.E.) sin considerar el factor uso de la tierra (C) (F.A.O., 1980), correspondiendo al riesgo de erosión del suelo desnudo. Todas las operaciones fueron conducidas en un sistema de información geográfica —Ilwis 2.2— (I.T.C., 1998), a través de los siguientes pasos:

#### *Creación de mapas*

a) *Mapa de cobertura de la tierra*: por procesamiento de imágenes Landsat TM (bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7, diciembre de 1998) aplicando el método de clasificación supervisada, según clasificadores de máxima probabilidad y posteriores operaciones de filtro (I.T.C., 1998). Se creó una imagen falso color por combinación de las bandas 7, 4 y 1 asignando los colores rojo (R), verde (G) y azul (B) respectivamente, sobre la cual se seleccionaron muestras de cada clase de cobertura, basándose en sitios reconocibles y estudios de vegetación existentes (Movia *et al.*, 1982; Colmet Daage *et al.*, 1988b) para ajustar arealmente el factor (C) (F.A.O., 1980), realizando posteriormente controles de campo. Se utilizó el sistema de clasificación del uso rural y de las tierras del ITC-LUCC (Van Gils *et al.*, 1991), con modificaciones acorde al área de estudio (Apcarián, 1998).

b) *Mapa de suelos*: en formato digital, se digitalizó y georreferenció el mapa existente de suelos, transformándolo a formato raster.

#### *Cálculo de la magnitud de la erosión hídrica*

a) *Con uso actual*: mediante la operación de cruzamiento de los mapas de suelo y mapa de cobertura actual de la tierra se generaron tablas de distribución areal de la clase de uso dentro de cada unidad cartográfica de suelo. Luego se recalculó la magnitud de la erosión a partir de las tablas obtenidas y de los valores del riesgo de erosión de cada unidad cartográfica de suelo presentados por Ferrer *et al.* (1990d), haciendo uso de operadores aritméticos del SIG, expresando las pérdidas de suelo en toneladas por hectárea por año, para los suelos dominantes de cada unidad cartográfica y dentro de éstas, especificando la erosión de acuerdo al uso actual. La fórmula paramétrica aplicada fue:

$$EHA = R (C) a$$

donde:

EHA = erosión hídrica actual

R = riesgo de erosión hídrica para la unidad cartográfica de suelo (Ferrer *et al.*, 1990d)

C = factor de uso de la tierra

a = área ocupada por cada clase de uso en relación al total (%)

<sup>2</sup> Toba: roca ígnea piroclástica consolidada, pre-holocénica (U.S.D.A., 1998).

Los valores del factor de uso de la tierra (C) se seleccionaron considerando la formación vegetal y las coberturas del suelo de cada caso, utilizando las tablas de la metodología provisional para la evaluación de la degradación de suelos para erosión hídrica y eólica (F.A.O., 1980).

b) *Con uso forestal simulado*: Se partió del supuesto que las áreas de la estepa forestalmente aptas (Ferrer *et al.*, 1990e) estuviesen forestadas con pino ponderosa con la edad promedio y cobertura media de las forestaciones de la zona. Se calculó la magnitud de la erosión (aplicando la metodología mencionada en el ítem a) sustituyendo los valores del factor (C) de estepa por el correspondiente a forestación, expresando las pérdidas de suelo en toneladas por hectárea por año para los suelos dominantes de cada unidad cartográfica y dentro de éstas, especificándose de acuerdo a los usos.

Con la información generada se comparó el valor de erosión hídrica bajo uso actual de la tierra con los correspondientes al uso forestal simulado.

### Estimación y comparación de la erosión actual bajo pino ponderosa y bajo estepa subarbutivo-graminosa en condiciones de sitio equivalentes

La selección de las unidades de muestreo se realizó considerando: estudios previos de Broquen *et al.* (1995, 2000a, 2000b); los procesos dominantes que determinan la transición de Andisoles a Molisoles (Colmet Daage *et al.*, 1988b; Broquen *et al.*, 2002); las unidades cartográficas de suelos y las clases de aptitud para la forestación (Ferrer *et al.*, 1990a, 1990b, 1990e).

El diseño experimental fue de parcelas pareadas, en cada par una bajo forestaciones de pino y otra bajo estepa subarbutivo-graminosa, ubicadas con dirección aproximada oeste-este a modo de abarcar las variaciones bioclimáticas existentes en la región. En cada parcela se realizó una prospección a campo de la vegetación y se la caracterizó fisonómicamente según los elementos de la vegetación y estratos (alturas). Para establecer la superficie de muestreo se utilizó el criterio de área mínima, superficie de partida 1 m<sup>2</sup>. Se determinaron las especies más frecuentes de los estratos dominantes y el porcentaje de cobertura (Braun Blanquet, 1950). Las plantaciones a ser incorporadas como parcelas debían ser mayores a los 14 años, con formaciones que no fueran tipo parque o cortinas sino

rodales de al menos 70 ejemplares, en 0,1 ha con densidades no extremas. Tal requisito limitó el número de pares de parcelas a once.

En cada par de parcelas se realizó el reconocimiento y la descripción de los suelos según el manual de reconocimiento de suelos de la Soil Survey Staff (U.S.D.A., 1998). Se determinó la densidad aparente tomando tres muestras por horizonte utilizando el método del cilindro (S.A.M.L.A., 1996). Se comparó el espesor del horizonte-A bajo ambos usos con equivalentes condiciones de sitio —altitud, orientación, posición y gradiente de la pendiente— colindantes y con una distancia de al menos 20 m entre cada par, garantizando la menor influencia recíproca. Se estimó la magnitud de la pérdida de suelo por hectárea ocurrida desde el momento de la instalación de las plantaciones —utilizando la edad del rodal como tiempo transcurrido—, para lo cual se aplicaron las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} V &= \Delta \text{ prof.} * \text{ha} \\ P &= V * \delta a \\ A &= P * y^{-1} \end{aligned}$$

donde:

V	= volumen de suelo (m <sup>3</sup> )
$\Delta$ prof.	= diferencia de espesor del horizonte-A entre ambos usos (m)
ha	= hectárea (10.000 m <sup>2</sup> )
P	= peso de la diferencia de suelo (t)
$\delta a$	= densidad aparente del horizonte-A (t m <sup>-3</sup> )
A	= t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> de suelo perdido
y	= edad (años).

La edad de las plantaciones se determinó mediante la lectura de tarugos extraídos con barreno de Pressler.

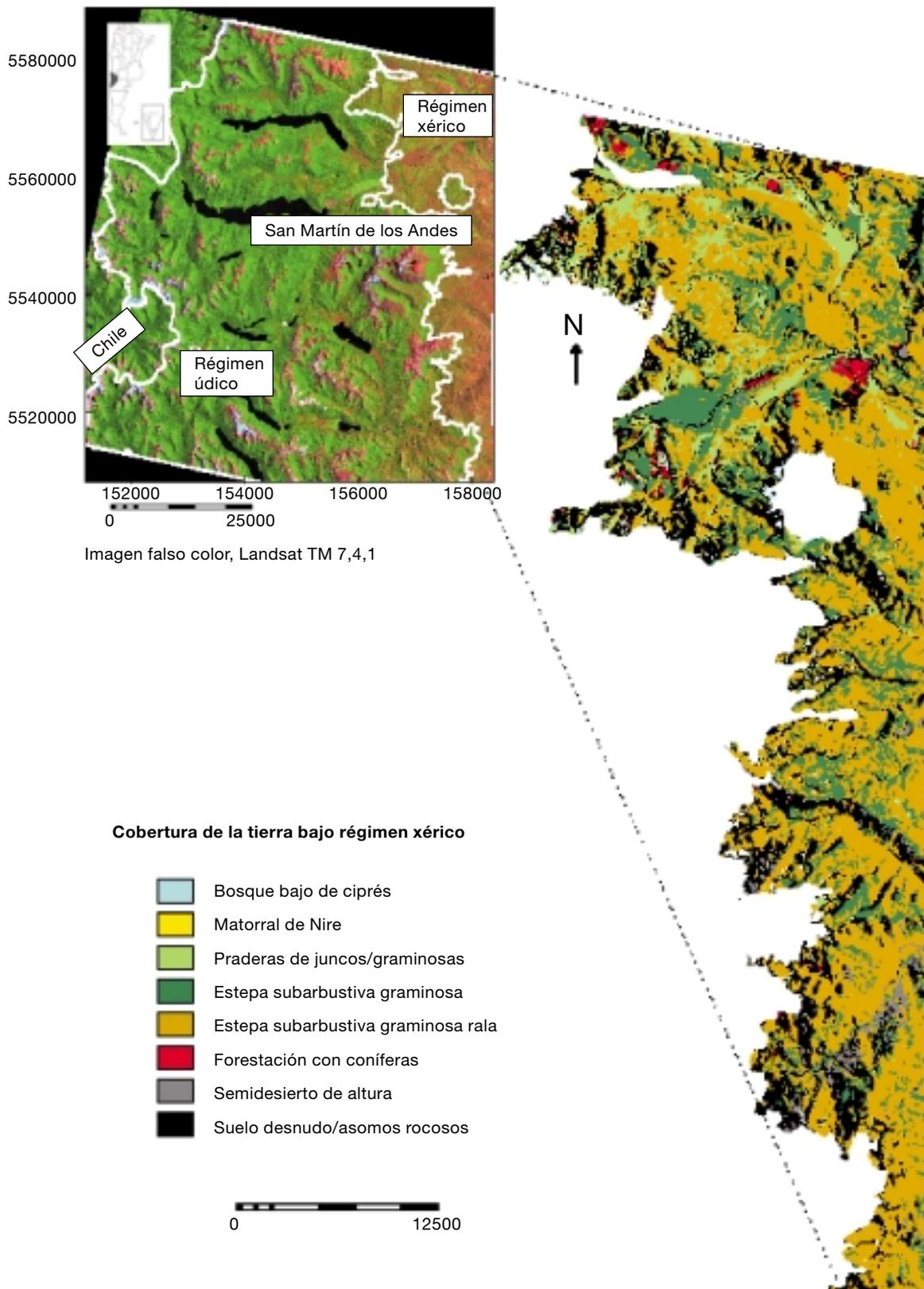
El análisis de la pérdida por erosión se realizó en cada par de parcelas y luego se evaluó por unidad cartográfica. Se categorizó la pérdida de suelo según las clases de erosión establecidas por F.A.O. (1980).

### Efecto de las pérdidas de suelo sobre la productividad real

Se determinó la tendencia que las pérdidas de suelo puedan ocasionar en la productividad a través del uso del modelo predictor del índice de Sitio:

$$IS_{14} = 6,5658 + 0,02987 PFT \quad (r^2 = 0,515)$$

donde  $IS_{14}$  es la altura máxima de un rodal a los 14 años y PFT es la profundidad efectiva total del suelo en centímetros (Broquen *et al.*, 1998).



**Figura 1.** Mapa de ubicación SW provincia del Neuquén (Argentina), y mapa de cobertura de la tierra bajo régimen xérico creado con imágenes Landsat TM 7, 4, 1 (1998).

## Resultados y Discusión

### Determinación de la magnitud de la erosión bajo el uso actual y bajo uso forestal simulado, a modo de obtener valores de referencia para evaluar su efecto sobre la erosión

#### Magnitud de la erosión hídrica bajo uso actual

Se generó un mapa de cobertura de la tierra (Fig. 1) que permitió ajustar espacialmente el factor (C) a aplicar en la ecuación del U.S.L.E. para estimar la erosión hídrica actual (F.A.O., 1980).

Se establecieron ocho clases de uso de la tierra, que comprenden las formaciones vegetales dominantes y sus respectivas coberturas (Tabla 1 y Fig. 1) presentando el matorral de ñire una escasa y puntual distribución areal. La formación vegetal correspondiente a la estepa subarbusculo-graminosa presenta dos condiciones de uso diferente, con distintas refractancias en la imagen satelital, por lo que se la subdivide en estepa subarbusculo-graminosa (60 a 80% de cobertura de la tierra) y estepa subarbusculo-graminosa rala (20 a 40% de cobertura de la tierra). Esta subdivisión permitió una clasificación de la cobertura de la tierra sobre todos los suelos —dominantes y subordinados— con relación al mapa de base utilizado (Ferrer *et al.*, 1990a). Esta metodología permitió ajustar los factores de cultivo a aplicar en la ecuación del U.S.L.E. (Tablas 1 y 2). El porcentaje de precisión del método empleado fue de 73% y se obtuvo aplicando una prueba que incluyó datos reales de campo no utilizados para

realizar la clasificación de la imagen (ITC, 1998). Las operaciones de cruzamiento entre el mapa de cobertura y el mapa de suelos permitieron calcular —mediante operaciones en el S.I.G.— el área de cada clase de uso en cada unidad cartográfica bajo régimen xérico. Dichos valores se presentan en la Tabla 1.

De la Tabla 1 se desprende que, en las unidades cartográficas (U.C.) cuya aptitud forestal fue de muy apta a moderadamente apta, dominan arealmente la estepa subarbusculo-graminosa y estepa subarbusculo-graminosa rala (55.262 ha), siendo éstas las que se consideraron para estimar la erosión hídrica actual y realizar la simulación del uso forestal.

#### Erosión hídrica bajo el uso actual y erosión hídrica con uso forestal simulado

Se fijaron los siguientes factores de utilización (Tabla 2) para la zona de estudio —suelos bajo régimen xérico— para ser aplicados en la ecuación universal de pérdida de suelo utilizando como base el mapa digital de cobertura de la tierra (Fig. 1).

En la Tabla 3 (i) se presenta la pérdida de suelo por erosión actual sobre la estepa —según el uso actual de la tierra corregido con los resultados obtenidos (mapa de cobertura de la tierra corregido; Fig. 1). La erosión hídrica actual para los tipos de uso estepa subarbusculo-graminosa fue moderada (20 a 25 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) y para la estepa subarbusculo-graminosa rala fue alta (98 a 130 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). Esto confirma el estado de degradación creciente, dado que la estepa subarbusculo-

**Tabla 1.** Superficie de las clases de cobertura de la tierra bajo régimen xérico

Clases de uso	Unidades cartográficas y aptitud forestal (ha)			
	U.C. 12	U.C. 18	U.C. 19	U.C. 21
	Muy apta	Apta	Moderadamente apta	
Bosque bajo de ciprés	5	37	0	160
Matorral de ñire con sotobosque	0	0	0	1,2
Estepa subarbusculo-graminosa	2.845	5.546	165	6.492
Estepa subarbusculo-graminosa rala	2.780	18.782	355	18.297
Praderas de juncos/graminosas	1.956	456	2	4.617
Semidesierto de altura	98	1.283	16	239
Suelo desnudo/asomos rocosos	1.417	7.615	60	8.743
Forestación con coníferas	538	42	0	219
Total (ha)	9.638	33.761	598	38.768
Total	82.766			

**Tabla 2.** Factor de utilización de la tierra (C)

Tipos	Cobertura (%)	(C) (F.A.O., 1980)
Bosque bajo de ciprés	40-60	0,1
Matorral de ñire con sotobosque	80-100	0,01
Estepa subarbustivo-graminosa	60-80	0,15
Estepa subarbustivo-graminosa rala	20-40	0,5
Praderas de juncos-graminosas (humedales)	80-100	0,02
Semidesierto de altura	Área excluida	—
Asomos rocosos	Área excluida	—
Forestación de coníferas	80-100	0,01

vo-graminosa rala abarca aproximadamente el 49% del área mientras que la estepa subarbustivo-graminosa —con mayores niveles de cobertura— ocupa el 18% del área, comprendiendo entre ambas el 67% de la zona de estudio. Para estas situaciones, aunque puede resultar obvio que las forestaciones frenarían las pérdidas de suelo por erosión, se consideró importante determinar en qué rango de valores de pérdida de suelo se encontraría el área si se hubiesen forestado. En la Tabla 3 (ii) se presenta la pérdida de suelo por erosión sobre la estepa con el supuesto uso forestal en las unidades cartográficas comprendidas dentro del área de estudio.

Al simular el reemplazo de la estepa subarbustivo-graminosa por forestaciones con pino ponderosa, sobre un total de 55.262 hectáreas se evidenció una marcada disminución de la pérdida de suelo en todas las U.C. obteniéndose el rango de valores de erosión esperables con uno u otro uso. Se observaron variaciones de la pérdida de suelo de acuerdo a las características de los suelos dominantes y al uso actual en cada U.C. (Tabla 2), siendo fundamental la morfometría de superficie (Tablas 4 y 5).

La disminución más marcada de la erosión se observó en aquellas U.C. que poseen mayor número de hectáreas con estepa factible de ser forestada, tal es el caso de las U.C. 18 y 21, que totalizan 49.117 hectáreas con vegetación de estepa.

### Estimación y comparación de la erosión actual bajo pino ponderosa y bajo estepa subarbustivo-graminosa en condiciones de sitio equivalentes

#### Características generales de los sitios y suelos

De las unidades cartográficas de suelos presentes en la zona de estudio, los once pares de unidades de muestreo representan la 12 y la 21 (Tabla 4), las otras dos unidades existentes no se incluyeron en este estudio por no estar forestadas o porque las forestaciones no cumplían los requisitos para ser incluidas como unidades de muestreo. Se presentan en la Tabla 4 las características de los sitios y las características morfológicas más relevantes del suelo de las parcelas bajo ambos tipos de uso.

El material de origen fue ceniza volcánica en todos los casos, encontrándose en diez sitios una superposición de materiales diferentes siguiendo en general el siguiente orden: ceniza volcánica/material glacia-rio/toba o ceniza volcánica/toba. Esto se reflejó en la secuencia de horizontes y se visualizó en la discontinuidad litológica observada a campo. En el sitio restante el material de origen fue nítidamente ceniza volcánica, no encontrándose discontinuidad litológica ni indicios de la incidencia de otro material subyacente.

La vegetación implantada fue *Pinus ponderosa* Dougl. (pino ponderosa), con edades entre 14 y 19 años y con una cobertura del suelo entre 70 y 100%, con una media de 86%. La vegetación nativa correspondió a la formación vegetal arealmente dominante en el ecoto-

**Tabla 3.** Erosión actual y erosión con uso forestal simulado en el área con vegetación de estepa de cada unidad cartográfica (U.C.)

U.C.	Erosión actual estimada (i)			Erosión con uso forestal simulado (ii)		
	t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	mm año <sup>-1</sup>	Clase	t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	mm año <sup>-1</sup>	Clase
12	20	1,82	Moderada	0,62	0,06	
18	98	8,94	Alta	2,34	0,21	Nula
19	25	2,30	Moderada	0,65	0,06	a ligera
21	134	12,21	Alta	3,29	0,30	

**Tabla 4.** Principales características de sitio y suelo bajo estepa (esg) y pino ponderosa (pp)

Uso de la tierra			Morfometría de la superficie					Suelo	
Pares de parcelas	Tipo	Cobertura (%)	Precipitaciones (mm)	Altitud (m)	Pendiente		Posición en la pendiente	Profundidad (cm)	
					Orientación	Gradiente (%)		Horizonte-O	Horizonte-A
01	pp	80	900	845	ENE	8	FS	2-0	A1: 0-25, A2: 25-78
	esg	60						—	A1: 0-7, A2: 7-41
02	pp/coirón,	90	900	890	ENE	19	FS	8-0	A: 0-65
	neneo esg							70	1-0
03	pp	100	900	900	S	30	FS	5-0	A1: 0-7, A2: 7-23
	esg	50						—	A: 0-13
04	pp/coirón,	90	690	760	NE	11	TS	8-0	A1: 4-0, A2: 4-24
	neneo esg							50	—
05	pp/coirón,	80	700	1020	E	8	SH	2-0	A1: 0-18, A2: 18-43
	neneo esg							70	—
06	pp/coirón,	80	700	1000	SSE	30	FS	5-0	A: 0-27
	neneo esg							80	—
07	pp/coirón,	100	700	890	ENE	34	FS	4-0	A1: 0-16, A2: 16-50
	neneo esg							70	—
08	pp	80	690	740	NE	30	FS	5-0	A1: 0-30, A2: 30-62
	esg	60						—	A1: 0-17, A2: 17-30
09	pp	90	690	760	NNE	34	BS	5-0	A: 0-44
	esg	70						—	A: 0-19
10	pp	90	690	840	NE	35	BS	4-0	A1: 0-18, A2: 18-59
	esg	60						—	A: 0-20
11	pp/coirón,	70	690	880	ESE	34	SH	0-3	A1: 0-10, A2: 10-47
	neneo esg							70	—

SH: hombro. BS: pendiente superior. FS: pendiente inferior. TS: base de la pendiente.

no —estepa subarbutivo-graminosa— con coberturas entre 50 y 80%, con una media de 65%. Las especies encontradas fueron *Stipa speciosa*. Trin. (coirón amargo) y *Mulinum spinosum* Pers. (neneo), acompañados principalmente por *Festuca pallescens* (St. Yv.) Parodi (coirón dulce), *Acaena splendens* (acaena), *Eringium paniculatum* Camb. et Domb. (cardoncillo), *Oxalis valdiviense* Barn. (vinagrillo), *Rumex acetosella* (vinagrillo), *Senecio sp.* (senecio) y otras. Se encuentran algunos bosquetes de *Nothofagus antarctica* (Forst. f.) Oerst. (ñire) o de *Austrocedrus chilensis* (Don.) Florín

et Boutleje (ciprés de la cordillera), los que no se incluyeron por ser arealmente poco representativos.

La variación de la composición florística en particular en la estepa subarbutivo-graminosa es un indicador de degradación. Según Bonvissuto *et al.* (1993) y Correa (1998) la mayor abundancia de neneo y coirón amargo corresponde a etapas de degradación de coironales de coirón dulce. La presencia de otras especies como acaena, cardoncillo, vinagrillos y senecio también indica sitios degradados. Son todas especies ruderales que desarrollan cuando las condiciones

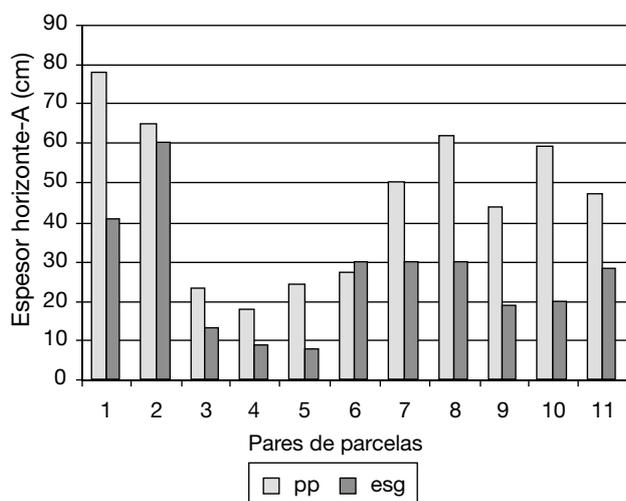
**Tabla 5.** Análisis de la significancia de la diferencia del espesor del horizonte-A bajo pino ponderosa (pp) y bajo estepa (esg)

	pp	esg
Media	45,2	26,2
Varianza	398,16	229,96
Observaciones	11	11
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	4,70**	
P(T ≤ t) dos colas	0,0008	
Valor crítico de t (dos colas)	2,23	

\*\* Altamente significativo.

del sitio empeoran y reemplazan a aquellas especies de mayor valor ecológico (Correa, 1988). El proceso erosivo dominante es la erosión hídrica seguida de la erosión eólica. Al disminuir la cobertura vegetal, el suelo sufre un desecamiento irreversible en los primeros centímetros debido al dominio de cenizas volcánicas (Colmet Daage *et al.*, 1988b), potenciando la erosión eólica. Se generaría además una pérdida de la capacidad de germinación del banco de semillas, impidiendo en muchos casos la recuperación de la vegetación natural de la estepa.

Los suelos, según las clases de restricción para el desarrollo de raíces, fueron profundos a moderadamente profundos variando entre un valor máximo de 140 cm y un mínimo de 45-50 cm (Tabla 4). La profundidad del horizonte-A para cada par de parcela se presenta en la Figura 2.

**Figura 2.** Espesor del horizonte-A bajo pino ponderosa (pp) y estepa (esg) en cada par de parcelas.

De la Figura 2 se desprende que el horizonte-A fue de menor espesor en todos los casos, excepto uno, bajo vegetación de estepa subarbuscivo-graminosa que bajo pino ponderosa. En la Tabla 5 se presentan los análisis estadísticos correspondientes a la diferencia de espesor del horizonte-A bajo ambas vegetaciones.

Considerando los valores promedios del horizonte-A para cada uso, la profundidad del horizonte-A fue 19,0 cm menor bajo estepa subarbuscivo-graminosa que bajo pino ponderosa, siendo esta diferencia altamente significativa (Tabla 5), lo que implica que el ecosistema bajo pino generó una retención del suelo impidiendo su remoción por erosión. Esta mayor retención de suelo bajo pino fue probablemente determinada por el mayor porcentaje de cobertura del suelo (21% en promedio mayor bajo pino) así como por la presencia del mantillo u horizonte orgánico, lo que determinaría una mayor intercepción de las precipitaciones. El horizonte orgánico se encontró en todos los casos bajo pino con un espesor entre 2 y 8 cm, la formación del mantillo característico de la vegetación de coníferas protegió al suelo frenando la escorrentía y favoreciendo la infiltración. Esto probablemente fue acompañado por cambios microclimáticos que frenarían los procesos erosivos, en particular la erosión eólica.

### Magnitud de la erosión

Se determinó la densidad aparente ( $\delta_a$ ) del horizonte-A bajo ambos usos, no encontrándose diferencia significativa (F crítico: 1,74; F tabla: 4,35) siendo el valor promedio 1,1 t m<sup>-3</sup>. Se calculó la magnitud de la erosión para cada parcela aplicando la fórmula presentada en la metodología cuyos valores se presentan en la Tabla 6. La discusión se realiza sobre la base de los valores de erosión bajo estepa subarbuscivo-graminosa, dado que la pérdida de suelo ocurrió bajo vegetación de estepa y que las densidades aparentes del horizonte-A fueron muy similares para ambos usos. En un solo caso hubo ganancia de suelo bajo vegetación de estepa (Tabla 6), lo que podría estar asociado con la posición de la parcela (Tabla 4), ya que es la única que se encuentra en la base de la pendiente de una colina cubierta con vegetación de estepa y probablemente ha acumulado el suelo perdido pendiente arriba.

El promedio de las pérdidas fue 136 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> —con valores máximos de 329 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>—, correspondiendo según F.A.O. (1980) a la clase de erosión muy alta.

**Tabla 6.** Pérdida de suelo estimada (A) bajo estepa

U.C. Clase de aptitud forestal	Pares de parcelas	Clasificación del suelo Soil taxonomy (1999)	Edad (años)	$\Delta$ prof. (m)	$\delta a$ (t m <sup>-3</sup> )	V (m <sup>3</sup> )	P (t)	A (t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Clase de erosión hídrica (F.A.O., 1980)
U.C. 12	01		19	0,37	1,12	0,414	4144	218	Muy alta
Muy apta	02	Humic Vitrixerands	16	0,05	1,16	0,058	578	36	Moderada
	03		19	0,10	1,10	0,110	1100	58	Alta
	04	Vitrandic Haploxerolls	14	0,16	0,88	0,141	1408	101	Alta
Promedio U.C. 12			17	0,17	1,06	0,181	1807	103	Alta
U.C. 21	05		19	0,09	1,23	0,111	1107	58	Alta
Moderada	06	Vitrandic Haploxerolls	16	-0,03	1,12	-0,034	-336	-21	Nula
	07		18	0,20	1,11	0,221	2210	123	Alta
	08		16	0,32	1,12	0,358	3584	224	Muy alta
	09	Vitrandic Argixerolls	14	0,25	1,21	0,303	3025	216	Muy alta
	10		14	0,39	1,18	0,460	4602	329	Muy alta
	11		15	0,19	1,20	0,228	2280	152	Alta
Promedio U.C. 21			16	0,20	1,17	0,2353	2353	154	Alta
Promedio total			16,4	0,19	1,13	0,215	2155	136	Alta
Máximo			19	0,39	1,23	0,460	4602	329	Muy alta

U.C.: unidad cartográfica (Ferrer *et al.*, 1990b,c).  $\Delta$  prof.: diferencia de espesor del horizonte-A entre ambos usos.  $\delta a$ : densidad aparente del horizonte-A. V: volumen de suelo. P: peso de la diferencia de suelo.

### Efecto de las pérdidas de suelo sobre la productividad real

Para la estimación de la potencialidad productiva se aplicó el modelo predictor de IS<sub>14</sub> (Broquen *et al.*, 1998) utilizando la profundidad total modificada con los valores medios de pérdida de espesor por unidad cartográfica (Tabla 4) a modo de estimar la altura máxima a los catorce años bajo ambos usos. De los resultados obtenidos se infiere que la pérdida de suelo determinaría una pérdida de la potencialidad productiva del sistema; con una disminución del IS<sub>14</sub> de 0,53 m en la U.C. 21 cuya clase de aptitud forestal es moderadamente apta y de 0,43 m en la U.C. 12 con clase forestal muy apta. Los IS<sub>14</sub> para la zona de estudio se encuentran entre 6,1 y 9,5 m (Girardin y Broquen, 1995), por lo que esta disminución implicaría una pérdida de productividad aproximada del 5,3 al 8,2%.

Los valores de erosión hídrica actual determinados a través de mediciones en las parcelas de estudio y los estimados a escala regional (S.I.G.) presentan puntos de concordancia y de discrepancia. Los puntos de concordancia corresponden a las situaciones de terreno que fueron arealmente representativas. Esto no se pudo cumplir en todos los casos dado que las parcelas de muestreo es-

tuvieron condicionadas por la presencia de plantaciones. En particular la U.C. 12 está dominada arealmente por una planicie fluvio-glacial que incluye arcos morénicos, sobre los cuales se localizaron las forestaciones utilizadas como parcelas de muestreo, por lo cual la erosión estimada a partir de la disminución del espesor del horizonte-A fue mayor que la erosión actual estimada a partir del mapa de cobertura de la tierra.

### Conclusiones

Las diferencias en la pérdida de suelo que se producen entre ambos usos —estepa subarbuscivo-graminosa y pino ponderosa— muestran el efecto de las plantaciones sobre el control de la erosión y el mantenimiento de la productividad real del sistema.

La proyección areal de los resultados obtenidos demuestra que la forestación debería proponerse como alternativa para el control de los procesos erosivos en la zona de estudio, haciendo uso conjunto de los roles productivo y de control de la erosión que posee el bosque. Este efecto tiene una proyección temporal, por lo que es crítica su consideración en el manejo del bosque implantado.

Las estimaciones de la erosión a campo —a través de mediciones directas— conjuntamente con la estimación de la erosión bajo uso actual y forestal simulado mostraron el estado creciente de degradación del ecotono bosque estepa y el fuerte impacto actual y potencial de las forestaciones sobre el control de la erosión. Así mismo, debe considerarse que los bosques implantados no llegan a las coberturas de cierre de la canopia en pocos años y que pueden llegar a muy bajas coberturas al momento de la etapa extractiva, siendo fundamental considerar prácticas silvícolas que no lleven a la exposición del suelo a los factores de agresividad climática.

## Agradecimientos

Esta investigación se realizó dentro del marco del PI 04-S005, subsidiado por la Secretaría de Investigación de la Universidad Nacional del Comahue y con la colaboración de las diferentes empresas y establecimientos forestales donde se realizaron los estudios.

## Referencias bibliográficas

- APCARIÁN A., 1998. Land use alternatives in the Alto Valle of the Rio Negro, Patagonia, Argentina. Thesis Master of Science. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. Enschede. 202 pp.
- AYESA J., BECKER G., 1991. Evaluación forrajera y ajuste de la carga animal. I.N.T.A. Bariloche, I.N.T.A. Alto Valle, 17 pp.
- BARROS V., CORDON V., MOYANO C.L., MÉNDEZ R.J., FORQUERA J.C., PIZZIO O., 1983. Cartas de precipitaciones del oeste de las provincias de Río Negro y Neuquén. Primera contribución. Facultad de Ciencias Agrarias, UNC, CENPAT, CONICET, 100 pp.
- BONVISSUTO G., SIFFREDI G., AYESA J., BRAN D., SOMLO R., BECKER G., 1993. Estepas subarbustivo-graminosas de *Mulinum spinosum* y *Poa ligularis*, en el área ecológica de Sierras y Mesetas Occidentales en el noroeste de la Patagonia. En: Secuencias de deterioro en distintos ambientes patagónicos. Su caracterización mediante el modelo de estados y transiciones. G.T.Z., I.N.T.A., pp. 23-30.
- BRAN D.E., 1992. Las regiones ecológicas de Patagonia y sus principales formaciones vegetales. En: Primer curso de planificación integral de campos, Sección I, I.N.T.A. Bariloche, pp. 19-29.
- BRAUN BLANQUET J., 1950. Fitosociología. Bases para el estudio de las comunidades vegetales. H. Blume, 820 pp.
- BROQUEN P., CANDAN F., FALBO G., 2002. Suelos derivados de cenizas volcánicas en la bioclimosecuencia bosque-transición a la estepa. Actas XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn, 110 pp.
- BROQUEN P., FALBO G., FRUGONI M.C., GIRARDIN J.L., GUIDO M., MARTINESE P., 2000a. Estructura y porosidad en Andisoles con vegetación natural y con *Pinus ponderosa* Dougl. en el sudoeste de Neuquén, Argentina. Bosque 21 (1), 25-36.
- BROQUEN P., FALBO G., GIRARDIN J.L., 2000b. Ponderosa pine afforestation and its relationships with soil erosion and sustainability (SW Neuquén, Argentina). International Symposium. Managing Forest Soils for Sustainable Productivity. Vila Real, pp. 177-179.
- BROQUEN P., GIRARDIN J., FALBO G., ÁLVAREZ O., 1998. Modelos predictores del Índice de Sitio en *Pinus ponderosa* Dougl. en base a características del suelo. Andinopatagonia Oriental 37°-41° S.R.A. Bosque 19 (1), 71-79.
- BROQUEN P., GIRARDIN J.L., FRUGONI M.C., 1995. Evaluación de algunas propiedades de los suelos derivados de cenizas volcánicas asociadas a forestaciones con diferentes coníferas exóticas. Bosque 16 (2), 69-79.
- COCIMANO M., LANGE A., MENVIELLE E., LÓPEZ M., 1995. Equivalencias ganaderas para vacunos de carne y ovinos. Colección Estudios y Métodos. A.A.-C.R.E.A., 32 pp.
- COLMET DAAGE F., MARCOLIN A., LÓPEZ C., AYESA J., BRAN D., LANCIOTTI M., BROQUEN P., CORTES G., DESTREMAU D., BALLEYDIER D., GIRARDIN J.L., BOSIO F., VAN KONYNEBURG P., ANDENMATTEN E., MILLOT G., VIOLA M., BESOAIN E., SADZAWKA A., IRISARRI J., SCHMIDT P., 1988a. Zonificación del potencial forestal de la cordillera y precordillera Transecta San Martín de los Andes. Paso Hua Hum - Collon Cura I.N.T.A., ORSTOM. S. C. Bariloche, Argentina, 167 pp.
- COLMET DAAGE F., MARCOLIN A., LÓPEZ C., LANCIOTTI M., AYESA J., BRAN D., ANDENMATTEN E., BROQUEN P., GIRARDIN J.L., CORTES G., IRISARRI J., BESOAIN E., SADZAWKA A., SEPÚLVEDA S., MASSARO S., MILLOT P., BOULEAU P., 1988b. Características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de la cordillera y precordillera del norte de la Patagonia. I.N.T.A., ORSTOM. S. C. Bariloche, Argentina, 39 pp.
- COPPA R.A., 1985. El deterioro del pastizal patagónico. Presencia 1 (2), 7-12.
- CORREA M.N., 1998. Flora Patagónica. Tomo VIII, Parte I. Colección Científica del I.N.T.A., 391 pp.
- CORREA M.N., 1988. Flora Patagónica. Tomo VIII, Parte V. Colección Científica del I.N.T.A., 381 pp.
- DONOSO ZEGERS C., 1993. Bosques Templados de Chile y Argentina. Variación, Estructura y Dinámica. Editorial Universitaria, 484 pp.
- F.A.O., 1980. Metodología Provisional para la Evaluación de la Degradación de los Suelos. Roma, 85 pp.
- FERRER J., IRISARRI J., MENDIA M., 1990a. Síntesis de los factores del medio geográfico y de las propiedades de los suelos. En: Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén. Volumen 1. Tomo 2. CFI-COPADEV-Prov. NQN. Buenos Aires, 147 pp.

- FERRER J., IRISARRI J., MENDIA M., 1990b. Cartografía de los suelos. En: Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén. Volumen 1. Tomo 3. CFI-COPADE-Prov. NQN. Buenos Aires, 232 pp.
- FERRER J., IRISARRI J., MENDIA M., 1990c. Evaluación de la aptitud de las tierras. En: Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén. Volumen 1. Tomo 4. Capítulo 6. CFI-COPADE-Prov. NQN. Buenos Aires, 129 pp.
- FERRER J., IRISARRI J., MENDIA M., 1990d. Estimación de la degradación de las tierras por erosión hídrica. En: Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén. Volumen 1. Tomo 4. Capítulo 7. CFI-COPADE-Prov. NQN. Buenos Aires, 53 pp.
- FERRER J., IRISARRI J., MENDIA M., 1990e. Zonificación y aptitud de las tierras para plantación forestal en secano. En: Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén. Volumen 1. Tomo 5. CFI-COPADE-Prov. NQN. Buenos Aires, 116 pp.
- GIRARDIN J., BROQUEN P., 1995. El crecimiento de *Pinus ponderosa* Dougl. y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Dougl. en diferentes condiciones de sitio (prov. Neuquén, R. Argentina). *Bosque* 16 (2), 57-68.
- I.N.T.A.-G.T.Z., 1995. Lucha contra la desertificación en Patagonia. C. T. Argentino-Alemán.
- I.N.T.A.-G.T.Z., 1997. Desertificación en la Línea Sur. PRODESAR, 8 pp.
- I.T.C., 1998. ILWIS 2.2. Users Manual. International Institute for Aerospace Survey and Earth Science, Enschede, Netherlands.
- MATHER A.S., 1990. Global Forest Resources. Timber Press, 341 pp.
- MAZZARINO M.J., BERTILLER M., SCHLICHTER T., GOBBI M., 1998. Nutrient cycling in Patagonian ecosystems. *Ecología Austral* 8, 167-181.
- MOVIA C., 1984. Metodologías aplicables a la evaluación de la desertificación de la Patagonia. En: Seminario sobre metodologías del proceso de desertificación. Universidad Nacional del Comahue, F.H., F.C.A., pp. 154-192.
- MOVIA C., OWER G., PÉREZ C., 1982. Estudio de la Vegetación Natural. Provincia del Neuquén, Ministerio de Economía y Hacienda. Subsecretaría de Recursos Naturales, 149 pp.
- S.A.M.L.A., 1996. Sistema de apoyo metodológico para laboratorio de análisis de suelos y aguas. Dirección de Producción Agrícola, S.A.G.P. y A.
- SADANANDAN NAMBIAR E.K., 1999. Pursuit of sustainable plantation forestry. *S Afr For J* 184, 45-62.
- U.S.D.A., 1998. Field book for describing and sampling soils. Natural Resources Conservation Service, Revisada por Schoeneberg P.J., Wiscocki D.A., Benham E.C., Broderston W. D. U.S.D.A. National Survey Center Lincoln NE. Traducción al español por investigadores del A.I.C.E.T., Instituto de Suelos y Evaluación de Tierras, I.N.T.A., 2000.
- VAN GILS H., HUIZING H., KANNEGIETER A., VAN DER ZE E. D., 1991. The evolution of the ITC system of rural land use and land cover classification (LUCC). *I.T.C. Journal* 3, 163-167.
- VEBLEN T.T., LORENZ D.C., 1988. Recent vegetation changes along the forest/steppe ecotone of northern Patagonia. *Annals of the Association of American Geographers* 78.