

Modelos predictores de índice de sitio en *Pinus ponderosa* Dougl. en base a características del suelo andinopatagónico oriental, 37°-41° S, República Argentina*

Prediction models of site index in *Pinus ponderosa* Dougl. from soil features, west andinopatagonia, 37°-41° S, República Argentina

PATRICIA BROQUEN, JORGE LUIS GIRARDIN, GABRIEL FALBO, OMAR ALVAREZ

A.U.S.M.A., Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Comahue, Ruta 151 km 12.5, (8303) Cinco Saltos, Río Negro, Argentina.

SUMMARY

This paper analyses the representative site characteristics of afforestations with *Pinus ponderosa* Dougl. in Neuquén-Argentina. A multiple regression analysis between site factors and site index was done to obtain measurable parameters to estimate forest site quality. The site factors considered were: climatic, topographic and soil characteristics. The variables were selected considering the diagnostic importance of their characteristics, particularly those of volcanic ash soils. Among all the variables analysed, those with a significance level of 5% were the soil factors effective soil depth, organic matter, water at the end of the dry season related to permanent wilting point. Soil depth was the variable with the greatest significance.

Key words: forest site quality, available water, volcanic ash.

RESUMEN

Se analizaron las características de los sitios representativos de las condiciones donde se encuentran forestaciones con *Pinus ponderosa* Dougl. en Neuquén-Argentina. Se realizó un análisis de regresión múltiple entre los factores del sitio y el índice de sitio para obtener parámetros medibles de la calidad de sitio forestal. Los factores del sitio considerados fueron: climáticos, topográficos y del suelo. Las variables a incluir se seleccionaron considerando las propiedades con valor diagnóstico, en particular las de los suelos derivados de cenizas volcánicas. De todas las variables analizadas las significativas al nivel del 5% fueron del suelo: profundidad efectiva, materia orgánica, agua presente al fin de la estación de crecimiento en relación al punto de marchitez permanente. La profundidad del suelo fue la variable de mayor significancia.

Palabras claves: calidad de sitio forestal, agua disponible, cenizas volcánicas.

INTRODUCCION

En la región andinopatagónica, en particular en la provincia del Neuquén, se encuentran áreas aptas para la forestación, donde las zonas que se van forestando son cada vez más y son realizadas con coníferas exóticas, preferentemente con *Pinus ponderosa* Dougl. Esta especie de crecimiento rá-

pido, de gran plasticidad, se adapta a diferentes condiciones de sitio, es poco exigente en agua y resiste el estrés hídrico. Ella constituye en la Argentina una especie forestal maderable de excelente adaptación en la región andinopatagónica y es de importancia comercial. Su crecimiento en la región varía entre 6.07 y 44.6 m³/ha/año, variación asociada a diferentes condiciones de sitio

* Realizado como parte del proyecto de investigación subsidiado por la Secretaría de Investigación de la U.N.C. R. Argentina.

(Girardin y Broquen 1995). En relación al uso considerado, los suelos derivados de cenizas volcánicas adquieren gran relevancia, por su amplia distribución areal, por el tipo de vegetación que sustentan, por su potencial forestal y agroforestal y por sus propiedades particulares.

El estudio que a continuación se presenta considera los factores del sitio citados en la bibliografía como los más determinantes para el crecimiento de las coníferas y en particular para la especie en estudio, destacando las relaciones demostradas entre el índice de sitio y los factores del sitio (Schlatter y Gerding 1995, Girardin y Broquen 1995, Stansfield *et al.* 1991, Broquen 1987, Jones 1967, Ralston 1964, Cox y McConnel 1960).

En este contexto se consideran las relaciones entre el sitio y el crecimiento de la especie, procurado los elementos para lograr un correcto uso y manejo del suelo, así como el desarrollo y expansión del recurso forestal.

El objetivo es asociar las variaciones de crecimiento con los factores del sitio para obtener estimadores de la calidad de sitio.

MATERIAL Y METODOS

Este estudio se ubica en una zona que se caracteriza por la presencia de la Cordillera de los Andes con una altitud de alrededor de 2.000 m snm que desciende paulatinamente hacia el Este hasta aproximadamente los 600 m snm, modelada por la acción de los glaciares y cubierta luego por depósitos de cenizas volcánicas. Los vientos dominantes, dirección Oeste-Este, cargados con humedad del Océano Pacífico, se van tornando más secos a medida que nos alejamos de la cordillera. Las precipitaciones medias anuales varían drásticamente desde los 3.000-2.000 mm sobre el límite con Chile a 400 mm al Este en poco más de 100 km (Barros y Cordon 1983). El régimen térmico es méxico, con algunas situaciones de altura bajo régimen crítico donde no hay plantaciones.

En el Suroeste de la provincia de Neuquén los suelos son derivados de cenizas volcánicas, evolucionan a Andisoles bajo régimen údico hacia el Oeste y a Molisoles bajo régimen xérico hacia el Este (Colmet Daage *et al.* 1988). En el Noroeste los suelos son más heterogéneos, los depósitos de cenizas volcánicas no cubren totalmente la zona y

se manifiestan otros materiales de origen, encontrando Entisoles, Molisoles y Andisoles. Los Andisoles se encuentran localizados hacia el Oeste, en forma de bolsones, en las zonas protegidas de la acción denudadora del viento. El régimen hídrico de los suelos es xérico a xérico seco lindante con el arídico (Ferrer *et al.* 1991). Las condiciones climáticas y edáficas son más limitantes.

Las forestaciones con pino ponderosa se encuentran distribuidas en dirección Norte-Sur en una franja comprendida entre las isoyetas de 1.500 mm a 500 mm. Las plantaciones se encuentran concentradas en el Norte y Sur de la provincia y son pocas en el límite Este bajo precipitaciones algo menores de los 500 mm anuales.

Para realizar el muestreo se determinaron dos transectas considerando las características de la zona en estudio y a la distribución de las plantaciones. Una transecta ubicada en la zona norte y otra en la zona sur de la provincia, dirección Oeste-Este, incluyendo las variaciones longitudinales y las debidas a las climo-topo-secuencias (Colmet Daage *et al.* 1988, Girardin y Broquen 1995). Para determinar las unidades de muestreo se aplica un criterio relativo al componente sitio y su representatividad areal y otro relativo a las características dasométricas, que incluye las condiciones que debe reunir una plantación para poder utilizar la altura máxima como indicadora de las condiciones de sitio (Girardin y Broquen 1995, FAO Montes 1982, Curtis *et al.* 1974, Parde y Bouchon 1988).

La localización de las parcelas fue condicionada por la presencia de la especie ya sea en las plantaciones comerciales o en las parcelas experimentales de introducción de especies.

El comportamiento y la productividad del pino ponderosa se explican en general en base a las propiedades físicas del suelo. Le siguen luego las fisicoquímicas, en particular el porcentaje de materia orgánica. Dada la influencia que tiene la ceniza volcánica en la zona de estudio se tuvieron en cuenta las propiedades particulares que ésta le imprime al suelo (Egawa 1980, Maeda *et al.* 1977, Mizota y Van Reeuwijk 1989, Shoji *et al.* 1993), así como su importancia para el manejo forestal (Meurise *et al.* 1985, Meurise 1987). No se incluyó la textura dado que los suelos ándicos presentan finos agregados muy estables dando una sensación al tacto de limo (Mizota y Van Reeuwijk 1989), con un tamaño de agregados similar al limo

o a la arena. Esto determina grandes diferencias entre las determinaciones a campo y de laboratorio, no reflejando este valor el comportamiento del suelo. Se hace uso de los términos pseudolimo y pseudoarena como modificadores de la textura a campo (Colmet Daage *et al.* 1988). En base a las particularidades, respecto a sus propiedades, se incluye el agua al fin de la estación seca y su relación con el contenido de humedad a 1.500 kPa punto de marchitez permanente (P. M. P) como indicador del agua disponible en la estación de crecimiento.

Se midió la pendiente dominante en porcentaje, la exposición expresada en grados respecto al Norte, la altitud en metros sobre el nivel del mar y la profundidad total correspondiente a la profundidad efectiva del perfil del suelo en centímetros. Por horizonte: materia orgánica expresada en porcentaje, pH en agua, pH en KCl 1N, pH en NaF 2' y 60', retención de fosfato en porcentaje; capacidad de campo: porcentaje de agua a 33 kPa; punto de marchitez permanente: porcentaje de agua a 1.500 kPa; agua al final de la estación seca: porcentaje gravimétrico y densidad aparente en g/cm³. Se calcula agua útil por horizonte y total en mm y la relación expresada en milímetros entre el contenido de humedad al fin de la estación seca y el contenido de humedad en P.M.P. por horizonte y en todo el perfil. El reconocimiento, descripción, toma de muestras a campo del suelo se realizan siguiendo las normas y claves de la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff 1993).

Se descartan para el análisis de regresión múltiple los sitios con características particulares que aportan datos puntuales distorsionando las pautas de crecimiento, como ser presencia de fragipan, influencia de napa freática permanente y variables con una distribución areal restringida.

Para la comparación de los crecimientos se utiliza la altura máxima como indicadora de las condiciones de sitio, por ser relativamente insensible dentro de cierto rango a las variaciones de densidad del rodal utilizando las curvas altura-edad obtenidas por Girardin y Broquen (1995) a partir del análisis fustal de los ejemplares dominantes. En las parcelas no contempladas por los análisis de crecimiento disponibles se siguió la misma metodología (Girardin y Broquen 1995), determinando la altura máxima promedio del rodal, y confeccionando la curva altura máxima edad. Se utiliza el

análisis fustal del ejemplar dominante, la curva altura-edad para poder luego comparar los sitios uniformizando a una cierta edad (Dahms 1963, Fabbio *et al.* 1994).

Para explicar estadísticamente la relación de los factores del sitio seleccionados sobre el índice de sitio, se confecciona una matriz de Pearson como primer análisis para determinar las variables que influyen en forma preponderante en la que se incluyen como variables independientes los factores del sitio seleccionados y como variable dependiente el índice de sitio. Se realiza luego el análisis de regresión múltiple por el método paso a paso (stepwise forward), lo que permite, partiendo de una sola variable, apreciar más claramente las relaciones del conjunto (Montgomery 1991). El análisis estadístico se realizó utilizando el programa SAS (SAS 1997).

Considerando las clases de aptitud forestal (Ferrer *et al.* 1991), se muestrearon situaciones que representan aproximadamente el 52% del área forestable. En el resto de la superficie no hay plantaciones o las mismas no cumplen los requisitos para incluirlas como parcelas. Las unidades cartográficas que abarcan la clase por aptitud forestal muy apta y las que se corresponden a la clase apta están representadas en su totalidad. La clase moderadamente apta tiene una representatividad areal del 30% y la clase marginalmente apta un 6%. Los sitios muestreados reflejan la variabilidad existente actualmente en las forestaciones comerciales.

Se determinaron 28 parcelas en una amplia distribución, entre los 37° y 41° S con variación longitudinal desde la Cordillera de los Andes y los 70° 29' W, entre 640 m snm y 1.660 m snm; 15 en la zona sudoeste y 13 en la zona noroeste. Las precipitaciones medias anuales oscilan entre 500 a 2.000 mm; las variaciones de pendiente comprenden los rangos: <5%, entre el 5 y el 25%, entre el 25 y el 45%; con un mínimo de 0-2% y un máximo de 53% en cuatro posiciones, pie de loma, media loma, cima y zonas planas correspondientes a valles fluvioglaciales, fondo de valle y perillago, estando representadas la mayor parte de las exposiciones existentes en la región. Las alturas máximas oscilan entre 8.70 m y 39.55 m, con edades entre 14 y 50 años, volúmenes entre 44.30 y 2.743.14 m³/ha, crecimientos medios entre 2.5 y 42.8 m³/ha/año.

RESULTADOS Y DISCUSION

De la aplicación de la metodología citada para el reconocimiento, descripción, análisis y clasificación de los suelos, se obtuvieron resultados que permiten afirmar que los suelos corresponden a los órdenes Andisoles, Molisoles y Entisoles, abarcando el régimen údico, el xérico y el xérico-seco, con profundidades entre 200 cm y 35 cm, un rango de materia orgánica entre 7.9% y 1.1%, con pH en agua entre 4.6 y 6.3.

A partir de las curvas de crecimientos se determinó la altura máxima a los 14 años, IS_{14} . Los IS_{14} están entre 5.77 m y 13.3 m. El IS_{14} de 5.77 m corresponde a una situación muy particular de suelo-clima, con una fase frágica cementada con una baja profundidad efectiva de enraizamiento y el IS_{14} de 13.3 m con régimen hídrico xérico seco con presencia de napa freática permanente. Por lo que el rango de variación considerado para el IS_{14} fue entre 6.14 m y 12.95 m.

Las variables incluidas en la matriz de correlación se presentan en el cuadro 1 y corresponden a las 22 parcelas que cumplen los requisitos fijados.

Interpretación de la matriz de correlación. Luego de analizada la matriz de correlación, se construye un cuadro a modo de síntesis, incluyendo aquellas variables que presentaron una estimación del coeficiente de correlación (R) mayor o igual a 0.50, no rechazando la hipótesis nula con una significación del 0.05 (cuadro 3).

Del análisis de la matriz de correlación se desprende que:

- el IS_{14} presenta una alta correlación lineal positiva con la profundidad total, significativa ($R = 0.68501$, $Prob > r = 0.0004$)
- el IS_{14} presenta una alta correlación lineal positiva con el contenido de agua en relación al punto de marchitez permanente al fin de la estación seca, altamente significativa ($R = 0.58367$, $Prob > r = 0.0043$)
- el IS_{14} presenta una alta correlación lineal positiva con la materia orgánica, significativa ($R = 0.52541$, $Prob > r = 0.0120$).

La variable que mejor explica linealmente el comportamiento del IS_{14} es la profundidad total, dado que es la que presenta mayor coeficiente de correlación ($R = 0.68501$, $Prob > r = 0.0004$).

Para el resto de las variables se encontraron, en todos los casos, correlaciones bajas y no significativas. Se puede afirmar que el grado de explicación de la variable dependiente, el índice de sitio, por las otras variables incluidas en la matriz de Pearson, es muy bajo o casi ausente, determinando esto su exclusión de los modelos. Esto se corrobora con los resultados que se discuten a continuación (cuadro 6).

Analizando la correlación que existe entre las variables que mejor explican la variación del IS_{14} , se observa que la materia orgánica está correlacionada en forma altamente significativa con la profundidad total ($R = 0.75418$, $Prob > r = 0.0001$) y con el agua disponible al final de la estación seca ($R = 0.59348$, $Prob > r = 0.0036$).

Interpretación de la regresión múltiple. Para hallar el mejor modelo de ajuste lineal de regresión múltiple para estimar el IS_{14} se realiza el análisis de regresión múltiple utilizando el Stepwise, modalidad forward (SAS 1997) a dos niveles de significancia de entrada $\alpha = 0.05$ y $\alpha = 0.10$. Se realiza el análisis de significancia a dos niveles por considerar que la zona comprendida es heterogénea y amplia, abarcando una gran variabilidad, estando el "n" muestral restringido al bajo número de plantaciones que se encuentran en condiciones de ingresar como unidades de muestreo.

MODELOS OBTENIDOS

Modelo 1. Para el nivel de entrada de $\alpha = 0.05$, resulta como modelo predictor una ecuación que contempla el uso de una variable predictora, la profundidad total o efectiva del suelo (PFT) con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.515$ y cuadrado medio del error CME = 1.7167: $IS_{14} = 6.5658 + 0.02987 PFT$

La prueba global de F verifica la explicación del IS_{14} por parte de la profundidad total con $F = 21.24$ con probabilidad < 0.0002 , altamente significativa. Las otras variables superan el nivel crítico de entrada, por lo que no ingresan más variables al modelo (cuadro 4).

Modelo 2. Para el nivel de entrada de $\alpha = 0.10$ resulta como modelo predictor la siguiente ecuación que contempla el uso de dos variables predictoras, profundidad total (PFT) y contenido

CUADRO 1

Variables incluidas en la matriz de correlación:
estadísticos sencillos (n = 22).
Variables included in the correlation matrix:
simple statistics (n = 22).

Variable	Media	Mínimo	Máximo
PFT	103.77	35	200
MO	3.06	1.1	7.9
NaF	10.4	8	11.8
PHw	5.6	4.6	6.3
pHs	5.3	4.7	5.7
PO ₄ =	52	20	86
CC	20.5	10.6	36.4
PMP _s	10.3	5.2	19.4
PMP _p	12.9	7.8	35.6
ÚTIL	10.1	5.4	20.3
FES _s	10	1.4	23.2
FES _p	15	3.6	49.5
Da _s	1.07	0.81	1.52
PP	1.011	500	2.000
EXP	Se trabajó como variable angular comprendiendo los 360°		
PEND	24.59	2	53
ALT	1.105	640	1.660
MFP	22.93	-39	172
IS ₁₄	9.75	6.14	12.95

CUADRO 2

Coefficientes de correlación de Pearson entre IS₁₄ y
las variables consideradas.
Pearson correlation coefficients between IS₁₄ and
considered variables.

Variable	R	Prob>r
PFT	0.68501	0.0004
MO	0.52541	0.0120
NaF	0.36123	0.0986
PHw	-0.25950	0.2435
pHs	0.10157	0.6529
PO ₄ =	0.31434	0.1542
CC	-0.08878	0.6944
PMP _s	-0.01383	0.9513
PMP _p	-0.26507	0.2332
ÚTIL	-0.15581	0.4887
FES _s	0.31884	0.1481
FES _p	0.33411	0.1286
Da _s	-0.26562	0.2322
PP	0.38278	0.0787
PEND	-0.18985	0.3974
EXP	0.10104	0.6546
ALT	-0.33745	0.1246
MFP	0.58367	0.0043

Referencias: PFT: Profundidad efectiva del suelo en cm; MO: Materia orgánica del horizonte superficial en %; NaF: pH en NaF en 60" del horizonte superficial; pHw: pH en agua 1:2.5; pHs: pH en K Cl 1N; PO₄: Porcentaje de Retención de fosfato; CC: Porcentaje de Retención Hídrica a 33 kPa. PMP_s, PMP_p: Porcentaje de Retención Hídrica a 1.500 kPa (superficie, en profundidad). ÚTIL: CC-PMP en porcentaje; FES_s, FES_p: Porcentaje de Retención Hídrica: fin de la estación seca (superficie, profundidad). Da_s: Densidad aparente del suelo en superficie en g/cm³; PP: Precipitación media anual en mm.; PEND: pendiente en porcentaje. EXP: Exposición en grados; ALT: Altitud sobre el nivel del mar en m. MFP: Diferencia entre el contenido de humedad al fin de la estación seca (FES) y el contenido de humedad a 1.500 kPa (PMP) en todo el perfil, expresado en mm; IS₁₄: Altura máxima en m a los 14 años.

Referencias: PFT: Profundidad efectiva del suelo en cm; MO: Materia orgánica del horizonte superficial en %; NaF: pH en NaF en 60" del horizonte superficial; pHw: pH en agua 1:2.5; pHs: pH en K Cl 1N; PO₄: Porcentaje de Retención de fosfato; CC: Porcentaje de Retención Hídrica a 33 kPa. PMP_s, PMP_p: Porcentaje de Retención Hídrica a 1.500 kPa (superficie, en profundidad). ÚTIL: CC-PMP en porcentaje; FES_s, FES_p: Porcentaje de Retención Hídrica: fin de la estación seca (superficie, profundidad). Da_s: Densidad aparente del suelo en superficie en g/cm³; PP: Precipitación media anual en mm.; PEND: pendiente en porcentaje. EXP: Exposición en grados; ALT: Altitud sobre el nivel del mar en m. MFP: Diferencia entre el contenido de humedad al fin de la estación seca (FES) y el contenido de humedad a 1.500 kPa (PMP) en todo el perfil, expresado en mm.

de agua en relación al punto de marchitez permanente al fin de la estación seca (MFP), con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.6058$ y cuadrado medio del error $CME = 1.468$: $IS_{14} = 7.0227 + 0.02301 PFT + 0.101810 MFP$.

La prueba global de F verifica la explicación del IS_{14} por parte de PFT ($F = 11.34$, $p < 0.0032$) altamente significativa y por parte de MFP ($F = 4.38$, $p < 0.0501$) significativo. Las otras variables superan el nivel crítico de entrada ($p > 0.1$), por lo que no ingresan más variables al modelo. La profundidad total explica, junto con el contenido de humedad disponible al fin de la estación seca, expresado en mm, el 60.6% del IS_{14} con un nivel de significancia del 10% para el pino ponderosa en la zona de estudio (cuadros 5 y 6).

Análisis de los residuales. Para ambos modelos se realizó el análisis gráfico de los residuales estudentizados contra el valor estimado del IS_{14} (figuras 1, 2).

Del análisis de los gráficos se desprende que:

- no aparecen observaciones extremas ('outliers'), por lo que el modelo se ajusta a todos los valores y no aparecen evidencias de que se haya omitido alguna variable independiente del modelo;
- los puntos se distribuyen equilibradamente alrededor del cero, sin ninguna tendencia sistemática a ser positivos o negativos;
- no se observa incremento de la variancia de los errores con el incremento de V (ausencia de conicidad en la distribución de los puntos), mostrando la homocedasticidad de los errores;
- se muestra una situación prototípica de un buen ajuste al modelo lineal, con constancia de la variancia del error, tanto para el modelo generado con el nivel de significancia del 0.05 como para el generado con un nivel de significancia del 0.10.

De los dos modelos obtenidos se recomendaría: $IS_{14} = 7.0227 + 0.02301 PFT + 0.10181 MFP$ ($R^2 = 0.6058$ y $CME = 1.468$), dado que de existir más plantaciones en condiciones de ingresar como parcelas podría mejorarse el modelo. Hasta que no se llegue a ese momento, teniendo en cuenta los aspectos estadísticos, se considera que la explicación del índice de sitio por parte de las dos variables es actualmente suficiente para aceptar el modelo, con una probabilidad del 90% de que el

CUADRO 3

Coefficientes de correlación de Pearson significativos entre IS_{14} y variables relacionadas.
Significant Pearson correlation coefficients between SI_{14} and related variables.

Variable	PFT	MFP	MO	Estadísticos
IS_{14}	0.68501**	0.58367**	0.52541*	R
	0.0004	0.0043	0.0120	Prob > r
MO	0.75418**	0.59348**	1.000	R
	0.001	0.0036	0.0	Prob > r

Referencias: PFT: Profundidad efectiva del suelo en cm; MO: Materia orgánica horizonte superficial %; MFP: Diferencia entre el contenido de humedad al fin de la estación seca (FES) y el contenido de humedad a 1.500 kPa (PMP) en todo el perfil, expresado en mm; R: coeficiente de correlación de Pearson; * $\alpha = 0.05$; ** $\alpha = 0.01$.

CUADRO 4

Análisis de varianza del modelo obtenido de la regresión múltiple paso a paso. (Nivel de significancia de entrada al modelo $\alpha = 0.05$).
Analysis of variance for the model obtained by multiple regression stepwise (significance level for entry into the model $\alpha = 0.05$).

$$R^2 = 0.5150$$

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Prob > F
Regresión	1	36.4628	36.4628	21.24	0.0001
Error	20	34.3344	1.7167		
Total	21	70.79373			

Variable	Parámetro	Suma de cuadrados	F	Prob > F
Intercepción	6.568	139.4709	81.24	0.0001
PFT	0.02987	0.006483	21.24	0.0002

Referencias: PFT: Profundidad efectiva del suelo en cm.

CUADRO 5

Procedimiento stepwise para la variable dependiente IS₁₄ ($\alpha = 0.10$).

Stepwise procedure for dependent variable IS₁₄ ($\alpha = 0.10$).

Variable	Estadísticos de entrada: Paso 1 gl = 1, 20			Estadísticos de entrada: Paso 2 gl = 1, 19		
	R ²	F	Prob > F	R ²	F	Prob > F
PFT	0.5150	21.2398	0.0002			
MO	0.2936	8.3107	0.0092	0.5150	0.0002	0.9887
NaF	0.1214	2.7634	0.1120	0.5151	0.0040	0.9503
PHw	0.0726	1.5664	0.2252	0.5382	0.9539	0.3410
pHs	0.0070	0.1419	0.7104	0.5331	0.7356	0.4018
PO ₄ =	0.0814	1.7732	0.1980	0.5168	0.706	0.7933
CC	0.0108	0.2184	0.6453	0.5529	1.6102	0.2198
PMP _s	0.012	0.0244	0.8775	0.5485	1.4100	0.2497
PMP _p	0.0759	1.6433	0.2145	0.5339	0.7675	0.3919
ÚTIL	0.0255	0.5234	0.4778	0.5398	1.042	0.3242
FES _s	0.0970	2.1474	0.1584	0.5182	0.1248	0.7278
FES _p	0.1158	2.6194	0.1212	0.5163	0.0492	0.8268
DA _s	0.0646	1.3824	0.2535	0.5187	0.1430	0.7095
PP	0.1777	4.3235	0.0507	0.5218	0.2686	0.6103
PEND	0.0176	0.3575	0.5566	0.5311	0.6522	0.4293
EXP	0.135	0.2743	0.6062	0.5227	0.3070	0.5860
ALT	0.1297	2.9817	0.0966	0.5234	0.3345	0.5698
MFP	0.3707	11.7796	0.0026	0.6058	4.3777	0.0501
	Paso 1 Variable PFT ingresada			Paso 2 Variable MFP ingresada		

Referencias. PFT: Profundidad efectiva del suelo en era; MO: Materia orgánica del horizonte superficial en %; NaF: pH en NaF en 60" del horizonte superficial; pHw: pH en agua 1:2.5; pHs: pH en K Cl IN; PO₄⁼: Porcentaje de Retención de fosfato; CC: Porcentaje de Retención Hídrica a 33 kPa. PMP_s, PMP_p: Porcentaje de Retención Hídrica a 1.500 kPa (superficie, en profundidad). ÚTIL: CC-PMP en porcentaje; FES_s, FES_p: Porcentaje de Retención Hídrica: fin de la estación seca (superficie, profundidad). DA_s: Densidad aparente del suelo en superficie en g/cm³; PP: Precipitación media anual en mm.; PEND: pendiente en porcentaje. EXP: Exposición en grados; ALT: Altitud sobre el nivel del mar en m. MFP: Diferencia entre el contenido de humedad al fin de la estación seca (FES) y el contenido de humedad a 1.500 kPa (PMP) en todo el perfil, expresado en mm.

mismo sea válido y de utilidad hasta que se pueda mejorar incrementando la población de datos cuando las plantaciones lo permitan. El uso de dos variables predictoras, no estando correlacionadas entre sí la PFT con la MFP, mejora la estimación por tener un R² mayor y Cuadrado medio del error menor, aunque a un nivel de significancia menor (90%).

Por otro lado, considerando los aspectos técnicos a los que pertenecen las variables y el conocimiento que se tiene de las relaciones entre las mismas, dada la importancia de la disponibilidad de agua para el crecimiento de las coníferas junto con la profundidad, sería demasiado riesgoso desde lo biológico estimar el índice de sitio con una sola variable.

CUADRO 6

Análisis de varianza para la significancia de la regresión múltiple paso a paso. (Nivel de significancia de entrada al modelo $\alpha = 0.10$).

Analysis of variance for the model obtained by multiple regression stepwise (significance level for entry into the model $\alpha = 0.10$).

$$R^2 = 0.6058$$

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F	Prob > F
Regresión	2	42.8923	21.44158	14.60	0.0001
Error	19	27.9049	1.46868		
Total	21	70.7973			

Variable	Parámetro	Suma de cuadrados	F	Prob > F
Intercepción	7.022748	144.3898	98.31	0.0001
PFT	0.023014	16.6502	11.34	0.0032
MFP	0.101810	6.4249	4.38	0.0501

Referencias: PFT: Profundidad efectiva del suelo en cm; MFP: Diferencia entre el contenido de humedad al fin de la estación seca (FES) y el contenido de humedad a 1.500 kPa (PMP) en todo el perfil.

CONCLUSIONES

De todas las variables analizadas, que incluyen el suelo, el clima y la topografía, las significativas al nivel 5% fueron las asociadas al suelo.

Dentro de las variables analizadas la Profundidad Total del Suelo es la más explicativa y la de mayor ponderación dentro del modelo lineal de regresión múltiple para estimar el IS_{14} .

La profundidad total explica en forma altamente significativa el 55.1% del IS_{14} para el pino ponderosa en la zona de estudio.

Se acepta el modelo predictor 2, $IS_{14} = 7.0227 + 0.02301 PFT + 0.10181 MFP$ ($R^2 = 0.6058$ y CME - 1.468, $\alpha = 0.10$), el que presenta características satisfactorias que se desprenden del análisis de los errores.

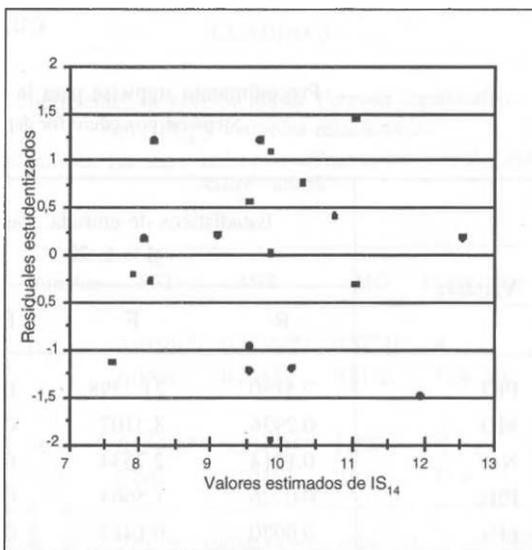


Figura 1: Residuales estudentizados. Studentized residuals.

$$IS_{14} = 6.568 + 0.0297 PFT$$

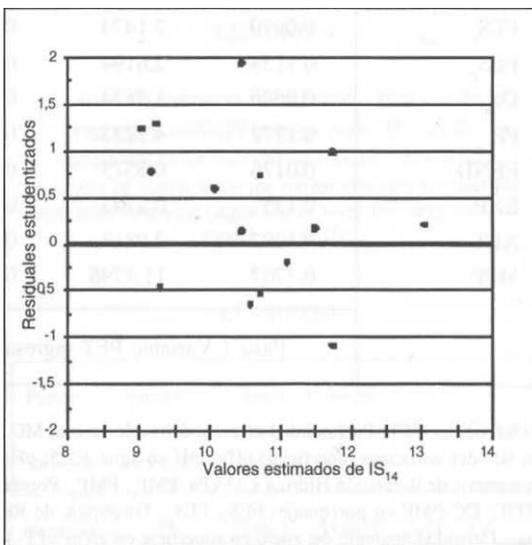


Figura 2: Residuales estudentizados. Studentized residuals.

$$IS_{14} = 7.0227 + 0.02301 PFT + 0.10181 MFP$$

Se debe restringir el uso del modelo predictor aceptado a la región andinopatagónica en la provincia del Neuquén en zonas para forestación en seco.

El modelo aceptado deberá validarse y mejorarse cuando exista un número suficiente de plantaciones de catorce años o más en la región que

cumplan los requisitos para ingresar como parcelas. Las parcelas a ser incluidas para la validación deberán abarcar situaciones comprendidas dentro del rango de variación de condiciones de sitio contempladas por el modelo que no hayan sido utilizadas para generar el modelo.

BIBLIOGRAFIA

- BARROS V., V. CORDON. 1983. Cartas de precipitaciones del oeste de las provincias de Río Negro y Neuquén. Primera contribución. Fac. Cs. Agrarias UNC CEMPAT CONICET, 100 p.
- BROQUEN, P. 1987. Estimación de la calidad de sitio forestal con especial referencia a coníferas. Revisión bibliográfica. Cátedra de Edafología A.U.S.M.A. - U.N.C. SE.C.Y.T. III Jornadas Forestales Patagónicas Esquel, 14 p.
- COLMET DAAGE, F., A. MARCOLIN, C. LOPEZ, M. LANCIOTTI, J. AYESA, D. BRAN, E. ANDENMATTEN, P. BROQUEN, J. L. GIRARDIN, G. CORTES, J. IRISARRI, E. BESOAIN, G. SADZAWKA, S. SEPULVEDA, S. MASSARO, P. MILLOT, P. BOULEAU. 1988. Características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de la cordillera y precordillera del norte de la Patagonia. INTA - ORSTOM. S. C. Bariloche, Argentina, 167 p.
- COX, G.S., M. Mc CONNEL. 1960. Ponderosa pine productivity in relation to soil and landform in Western Montana. *Soil Sci. Amer. Proc.*: 139-142.
- CURTIS, R., D. DE MARS, F. HERMAN. 1974. "Which dependent variable in site index- height - age regressions?", *Forest Sc.* (20): 74-90.
- DAHMS, W. 1963. "Correction For a Possible Bias In Developing Site Index Curves From Sectioned Tree Data", *Journal of Forestry* (541) 25: 27.
- EGAWA, T. 1980. Propiedades de los suelos derivados de cenizas volcánicas en suelos derivados de ceniza volcánica en Japón. Ed. Ishizuka & Black. EE.UU.: 47-55.
- FABBIO, G., M. FRATTEGANI, M. C. MANETTI. 1994. Height estimation in Stem Analysis Using Second Differences, *Forest Sci.* 40 (2): 329-349.
- FAO MONTES. 1982. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. FAO Montes N° 22/2. 92 p.
- FERRER J., J. M. MENDIA, J. IRISARRI. 1991. Estudio regional de los suelos de la prov. Neuquén. Volumen 1. T. 2. 3. CFI-COPAIDE- PROV. NQN Bs. As. 244 p.
- GIRARDIN J. L., P. BROQUEN. 1995. El crecimiento del *Pinus ponderosa* Dougl. y del *Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Dougl. en diferentes condiciones de sitio. (Neuquén, R. Argentina), *Bosque* 16 (2): 57-67.
- JONES, J. R. 1967. Review of site evaluation methods and range experiments. USDA Rocky Mountains Forest and Range Experiments Forest Service. Research Paper. RM-51: 1-27.
- MAEDA, T., A. TAKENAKA, B.P. WARKETIN. 1977. Physical properties of allophane soils, *Adv. Agron.* (29): 229-264.
- MEURISE, R. 1987. Forest soil management of U.S. Andisols. Proceedings of the first ISCOM Characterization, Classification and utilization of Andisols. USDA -USAID.: 130 -142.
- MEURISE R., F.H. BEINROTH, W. LUZIO, F. MALDONADO, H. ESWARAN. 1985. Properties of Andisols important to forestry. Taxonomy and management of Andisols. Proceedings of the Sixth International Soil Classification Workshop Chile and Ecuador: 53-67.
- MIZOTA C., P. van REEUWIJK. 1989. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions. International soil reference and information centre. Soil Monograph 2. 103 p.
- MONTGOMERY, D. C. 1991. *Diseño y análisis de experimentos*. Grupo Ed. Iberoamérica, 538 p.
- PARDE, J., J. BOUCHON. 1988. Dendrometrie. ENGREF 2^{ed}. Nancy, 340 p.
- RALSTON, C. W. 1964. "Evaluation of Forest Site", *Int. Rev. of For. Research*. Vol. 1: 171-201.
- SAS. 1997. Institute Inc. Cary NC 275128000 USA.
- SCHLATTER, J., V. GERDING. 1995. Método de clasificación de sitios para la producción forestal, ejemplo en Chile. Simposio IUFRO para Cono Sur Sudamericano, Valdivia, Chile: 1-16.
- SHOJI S., M. NANZYU, R.A. DAHLGREN. 1993. Volcanic Ash Soils. Genesis. Properties and Utilization Developments in Soil Sci. Elsevier, Amsterdam, 288 p.
- SOIL SURVEY STAFF. 1993. Soil Survey Manual. 5th. ed. Handbook N° 18 AID, USDA, 411 p.
- STANSFIELD W. F., J.P. TAGUE, R. LACAPA. 1991. Dominant-height and site index equations for ponderosa pine in east-central Arizona, *Can. J. Forest Res.* 21: 406-611.
- WADA, K. 1985. Distinctive properties of Andisols. Advances in soil, Sc. Springer Verlag, New York Inc.: 175-229.