

Bosque

ISSN: 0304-8799

revistabosque@uach.cl

Universidad Austral de Chile

Chile

DAVEL, MIGUEL; ORTEGA, ALICIA

Estimación del índice de sitio para pino oregón a partir de variables ambientales en la Patagonia

Andina Argentina

Bosque, vol. 24, núm. 1, enero, 2003

Universidad Austral de Chile

Valdivia, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=173114407005>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

 Revistas Electrónicas UACH

Inicio Web Revistas Web Biblioteca Contacto

Artículos Búsqueda artículos

Tabla de contenido Anterior Próximo Autor Materia Búsqueda Inicio Lista

 **Bosque (Valdivia)**
ISSN 0717-9200 versión on-line

Como citar este artículo
Aregar a favoritos
Enviar a e-mail
Imprimir HTML

Bosque (Valdivia) v.24 n.1 Valdivia ene. 2003

Bosque, Vol. 24 N° 1, 2003, pp. 55-69

ARTICULOS

Estimación del índice de sitio para pino oregón a partir de variables ambientales en la Patagonia Andina Argentina

Predicting site index from environmental variables in Douglas-fir plantations in the Patagonian Andes, Argentina

MIGUEL DAVEL ¹, ALICIA ORTEGA ²

¹ Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP). CC 14, CP9200, Esquel, Chubut, Argentina. Tel/Fax: +54 2945 453948; E-mail: mdavel@ciefap.cyt.edu.ar

² Instituto de Manejo Forestal, Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile, Tel/Fax: 56-63-221489/221231, E-mail: aortega@uach.cl

Summary

Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* [Mirb.] Franco) is the second most important exotic tree species in northern Patagonia, where it grows vigorously with no serious disease or pest problems. Its wood is highly valued. Site index curves have been developed to determine productivity in the two growing zones identified within the region. However, these curves

cannot predict the site index when there are no plantations nearby. One way to overcome this problem is to predict site quality from environmental variables. The objective of this work was to construct a model that can predict site indices from environmental variables in both growing zones. Data were collected from 64 plantations scattered around the region. One plot was established in each plantation and 12 environmental variables were measured. The two final models, constructed with principal components analysis and the least squares method, explained more than 67% of the variation in site indices. Organic matter content, depth of horizon A, aspect, altitude, and total soil depth and texture, were the contributory variables in both growing zones. Organic matter content was the variable that explained by far the most variation in site index in both growing zones.

Key words: Douglas-fir, Patagonia, site index, environmental variables.

Resumen

El pino oregón (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) es la segunda especie en importancia entre las coníferas exóticas cultivadas en la región andino patagónica, siendo muy apreciada por su crecimiento, sanidad y calidad de su madera. Existen curvas de índice de sitio desarrolladas para estimar su productividad en dos zonas de crecimiento identificadas en la región; sin embargo, estas curvas son útiles sólo donde existen plantaciones presentes. Una forma de solucionar este inconveniente es predecir el índice de sitio a través de variables ambientales. El objetivo de este trabajo fue ajustar modelos predictores del índice de sitio para ambas zonas de crecimiento. Los datos fueron obtenidos de 64 plantaciones de toda la región. En cada una de ellas se estableció una parcela y se consideraron doce variables ambientales. Los modelos finales, obtenidos mediante análisis de componentes principales y mínimos cuadrados, explicaron más del 67% de la variación del índice de sitio. El contenido de materia orgánica, profundidad del horizonte A, exposición, altitud, profundidad total del suelo y textura fueron las variables explicatorias considerando las dos zonas de crecimiento. El contenido de materia orgánica fue la variable que explicó la mayor variación del índice de sitio en ambos casos.

Palabras claves: Pino oregón, Patagonia, índice de sitio, variables ambientales.

INTRODUCCION

El pino oregón (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) es una de las especies que mejores crecimientos presenta en la región patagónica, siendo apreciada además por su sanidad y la calidad de su madera. Las plantaciones existentes se encuentran dispersas en una amplia zona que se extiende, aproximadamente, desde los 40° a los 43° de latitud sur y desde los 71° a los 71° 40' de longitud oeste, abarcando parte de las provincias de Neuquén, Río Negro y Chubut (Davel 1998). Esta zona se caracteriza por un fuerte gradiente edafoclimático en sentido oeste-este ([Barros et al. 1983](#), [Mendía e Irizarri 1986](#), [Irizarri y Mendía 1991](#), [Colmet Daage et al. 1995](#)) que se ve reflejado en las diferencias de productividad que presenta la especie en la región.

Una de las primeras dificultades al estudiar el crecimiento de una especie es poder encontrar un camino para cuantificar estas diferencias de sitio en cuanto a su productividad. El método indirecto más ampliamente utilizado y que ha brindado los mejores resultados para estimar la calidad del sitio es el conocido como Indice de Sitio (IS) ([Hägglund 1981](#), [Daniel et al. 1982](#), [Monserud 1984](#), [Ortega y Montero 1988](#), [Thrower 1989](#)).

En esta región [Davel \(1998\)](#) analizó la existencia de diferentes zonas de crecimiento para pino oregón, concluyendo en la no conveniencia de utilizar un modelo común para toda la región y

dividiendo la misma en dos zonas de crecimiento. Para cada una de estas zonas obtuvo modelos de Índice de Sitio/altura dominante para estimar la productividad de la especie en diferentes sitios. Sin embargo, el índice de sitio es útil para predecir el potencial de producción cuando hay rodales existentes. Una gran cantidad de decisiones de manejo requieren de alguna estimación de la productividad potencial para una determinada especie, en sitios donde aún ésta no se halla establecida. En estos casos existen métodos alternativos que son importantes para predecir la productividad a través de la relación entre variables ambientales y el índice de sitio. [Cox \(1982\)](#) menciona que la relación del índice con las variables ambientales tiene dos utilidades importantes, por un lado, poder estimar la productividad en sitios donde la especie está ausente y, por otro lado, identificar las variables del medio que tienen mayor incidencia en la productividad, las cuales pueden ser utilizadas como factores de ajuste dentro de los modelos de rodal a fin de que expresen diferencias en la producción con mayor precisión. [Hägglund \(1981\)](#) sostiene que la estimación del índice de sitio a partir de variables ambientales puede ser una herramienta muy útil como complemento del índice de sitio en lugares sin bosque. Trabajos realizados relacionando el índice de sitio con variables ambientales indican la necesidad de estratificar el área de estudio, a fin de obtener modelos predictivos precisos en sus estimaciones ([Steinbrenner, 1979](#), [Cox 1982](#), [Daniel et al. 1982](#), [Pritchett 1991](#)). Estos autores coinciden en que si las variables ambientales se correlacionan correctamente con el índice de sitio, los errores existentes surgen principalmente de: 1) la falta de solidez de las curvas de sitio con las que se establecen las correlaciones y 2) la incorporación de datos de grandes áreas, fisiográficamente diferentes. Subdividir estas regiones en subunidades más pequeñas y homogéneas sería de utilidad en dichos casos.

En cuanto a la selección de variables a utilizar en estos modelos, [Steinbrenner \(1979\)](#) indica que hay varios principios que deben considerarse para asegurar una correcta y confiable ecuación de estimación: en primer lugar, tanto las curvas de sitio como las variables individuales utilizadas deben ser muestreadas en todo su rango incluyendo situaciones extremas. Desde el punto de vista práctico, las variables deben ser fácilmente medibles en el campo y deben ser relativamente estables en el tiempo. [Alder \(1980\)](#) sostiene además que para que un modelo sea efectivo las variables predictoras no deben ser más de tres o cuatro y deben ser de fácil medición.

A partir de la situación planteada y teniendo en cuenta la escasa superficie forestada en relación a la superficie potencial existente en la región para la especie, se realizó el presente trabajo que tiene como objetivo analizar las relaciones del índice de sitio con variables ambientales para las dos zonas de crecimiento existentes, a fin de obtener modelos predictores del índice de sitio donde la especie está ausente. Esta es una información necesaria que constituirá una valiosa herramienta para la planificación de programas de forestación.

El hecho de que la superficie actualmente forestada sea pequeña, hace que la base de información disponible sea escasa e incompleta en edades y distribución, a lo que debemos agregar el desconocimiento sobre el origen genético de las mismas. Sin embargo, a pesar de estas limitaciones y ante las posibilidades concretas del desarrollo forestal de la región, es necesario generar mayor información que la escasamente existente, en la que se puedan basar, con mayor seguridad, tanto los actuales como los potenciales inversores privados y estatales, como los gobiernos provinciales en la toma de decisiones.

MATERIAL Y METODOS

Área de estudio. La región presenta un relieve caracterizado por la presencia de la Cordillera de los Andes, constituyendo una barrera natural de 2.000 a 3.000 metros de altura, entre Argentina y Chile. Hacia el este, planicies con alturas comprendidas entre 800 y 1.200 ms.n.m., junto con cadenas serranas paralelas a los macizos principales, forman la Precordillera ([Colmet Daage et al. 1995](#)).

Esta alta y continua barrera actúa como un "filtro" de las masas de nubes provenientes del

Océano Pacífico, provocando un fuerte gradiente de precipitación oeste-este que va, en algunos sectores, desde los 3.000 mm en la alta cordillera hasta 500 mm en la estepa en una distancia de sólo 100 km ([Barros et al. 1983](#)).

El paisaje, debido a las erupciones volcánicas de épocas pasadas, fue cubierto por capas de cenizas fácilmente alterables y transformadas, en poco tiempo, en los suelos fértiles sobre los que crecen los bosques de *Nothofagus* sp. y gran parte de las coníferas nativas ([Colmet Daage et al. 1995](#)).

Las características climáticas y fisiográficas han producido, en la misma dirección oeste-este, un gradiente edáfico. En el sector más occidental, ocupado por bosque nativo, la capa de cenizas es regular y profunda debido a que la humedad del clima ha impedido que sea arrastrada por el viento. En cambio en la estepa, hacia el este de la región, esta capa es irregular debido a que ha sido arrastrada por el viento y acumulada en las laderas protegidas ([Colmet Daage et al. 1995](#)). Esto hace que los suelos de laderas con exposición sur presenten mayor desarrollo que los suelos más secos de las laderas con exposición norte y, las laderas este, protegidas del viento, presenten suelos más profundos que las de exposición oeste ([Irizarri y Mendieta 1991](#)).

Dentro de esta región, las plantaciones de pino oregón se encuentran entre los 40° y 43° de latitud sur y desde los 71° a 71° 40' de longitud oeste; y entre los 300 y 1.100 metros sobre el nivel del mar, ocupando sitios protegidos, con suelos profundos y precipitaciones desde 600 mm en el extremo sur de la distribución y desde los 900 mm en el extremo norte. La superficie forestada con esta especie es de aproximadamente 6.000 ha, las cuales están irregularmente dispersas y con edades que predominantemente se encuentran entre los 17 y 30 años. La mayoría de estos rodales carecen de intervenciones silvícolas ([Davel 1998](#)).

Las dos zonas de crecimiento establecidas en la región para la especie tienen límites definidos en base a rangos de precipitación media anual en milímetros, la zona 1 de 500-900 mm y la zona 2-3 por encima de los 900 mm ([figura 1](#)). El presente estudio abarca la zona 1 y la que aparece en la [figura 1](#) como zona 2, ya que el sector que se menciona como zona 3 está ocupado por bosque nativo y no se realizan más forestaciones con especies exóticas en el mismo.

Toma de datos. La secuencia de actividades fue la siguiente:

a) Selección de plantaciones a muestrear: debido a que la información disponible, en cuanto a ubicación, superficie y edades de las plantaciones en la región es muy escasa y a que éstas no se encuentran concentradas en un área sino que son en general de pequeñas superficies y se encuentran dispersas en la región, no fue posible establecer un diseño de muestreo previo. Se recorrió la región tomando información de casi todas las plantaciones existentes que tuvieran edades superiores a los nueve años y tratando de representar la variabilidad de clases de edad, clases de sitio y clases de manejo de la población en estudio.

b) Distribución de parcelas: en cada plantación seleccionada se estableció al azar una parcela circular de 200 m², entrando en promedio 27 árboles por parcela. En el caso de que en la plantación existieran situaciones bien diferenciadas en cuanto a sitio (posición en la ladera, exposición, etc.) se instalaron más parcelas tratando de cubrir estas situaciones. En total se instalaron 67 parcelas distribuidas en 64 rodales de toda la región.

c) Información registrada en las parcelas.

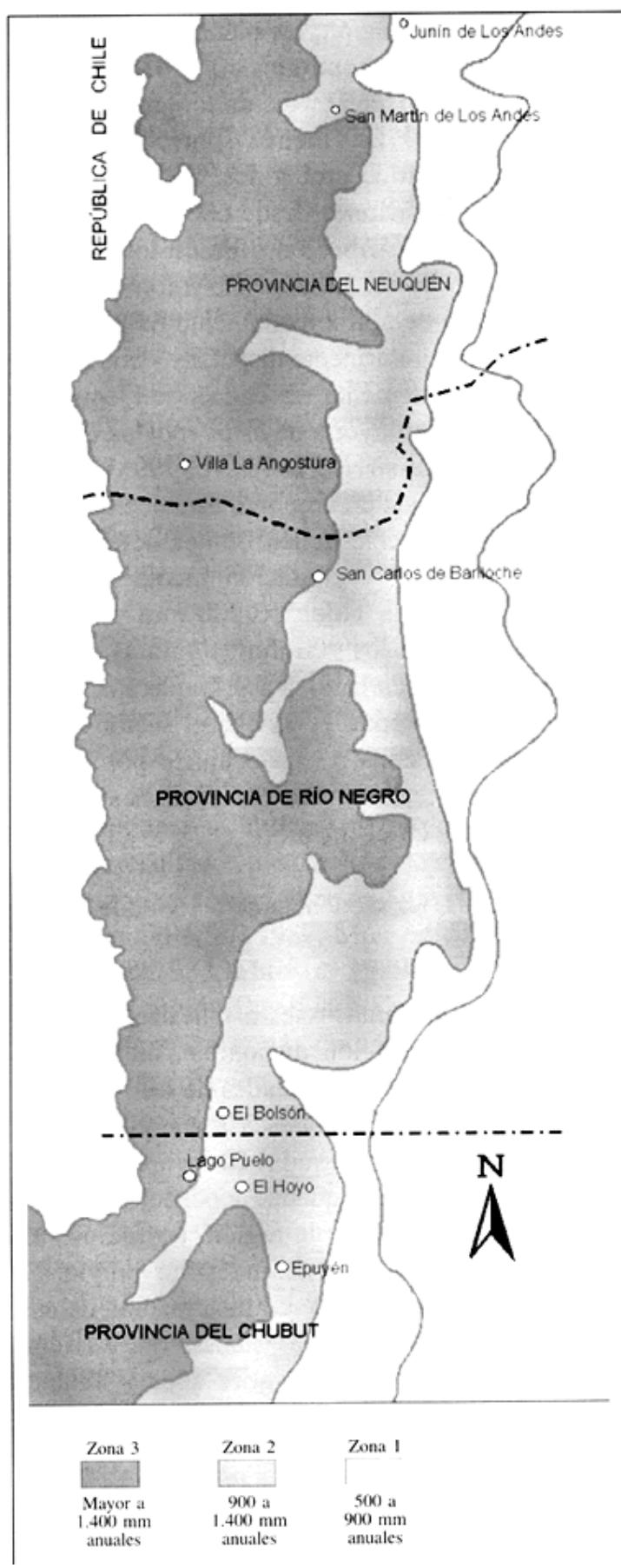


Figura 1: Las tres zonas de crecimiento para de pino oregón en el norte de la Patagonia definidas en base a tres rangos de precipitación media anual limitadas por las isoyetas de 500, 900, 1.400 mm y el límite con Chile (Davel 1998).

The three growing zones for the Douglas-fir in northern Patagonia defined by three mean annual precipitation ranges limited by the isohyets of 500, 900 and 1400 mm and the Chilean border (Davel 1998).

- De los árboles en pie: diámetro a 1,30 m de altura (DAP), clase de copa (dominante, codominante, intermedio, oprimido) y una descripción del estado sanitario y forma. No se midieron alturas en esta etapa.
- Datos topográficos: altitud (en metros sobre el nivel del mar, determinada con altímetro marca Thommen, precisión ± 10 m), exposición (en grados, determinada con brújula Suunto), pendiente (en grados, determinada con clinómetro Suunto), posición en la ladera (valle, ladera baja, media ladera, ladera alta, cumbre), latitud y longitud (en grados, minutos y segundos, determinadas con GPS Garmin 75 con una precisión en XY de 100 m).
- Datos edáficos: profundidad total (en metros, medida con barreno de suelos desde la superficie hasta algún impedimento físico como capa de arcilla, roca, etc., o hasta 1 metro), profundidad del horizonte A (en metros, medida con cinta métrica en calicata desde la superficie hasta el límite inferior del horizonte), textura (estimada a campo). Además se extrajeron muestras de la parte inferior del horizonte A con el fin de determinar pH (pHp y pHKCl) y % de materia orgánica en laboratorio. Los análisis fueron realizados por el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Cinco Saltos de la Universidad Nacional del Comahue.
- Datos climáticos: se consideró la precipitación media anual en milímetros tomada a partir de mapas de isoyetas ([Barros et al. 1983](#), [Cordon et al. 1993](#)) o de datos de estaciones meteorológicas donde existían.
- De los árboles volteados: una vez realizada la medición de los árboles en pie, se procedió al volteo de los dos árboles más gruesos de la parcela que representaban a los 100 árboles más gruesos por ha ([Assman 1970](#)). A estos árboles muestra, se les trozó cada un metro a partir de la base y se les practicó un análisis fustal completo con conteo de anillos. En total se midieron 126 árboles que fueron utilizados para la construcción de las funciones de sitio y altura dominante ([Davel 1998](#)).

Análisis de la información. Una vez obtenidos los índices de sitio para cada parcela a partir de las funciones de Indice de Sitio (IS) ([Davel 1998](#)), se evaluó el grado de asociación entre éstos y las variables ambientales para ambas zonas de crecimiento.

Los datos cualitativos (posición sobre la pendiente y textura) debieron ser codificados para poder realizar el análisis, en ambos casos son datos cualitativos con una secuencia lógica, lo que facilitó la codificación. En el caso de la exposición, debido a que tanto valores cercanos a 0° como a 360° corresponden a exposiciones norte, se trató como un dato cualitativo con una secuencia lógica, desde las mejores a las peores exposiciones. Los rangos establecidos para las variables codificadas se presentan en el [cuadro 1](#).

Con el fin de determinar cuáles de las variables ambientales consideradas son las que tienen mayor influencia sobre el índice de sitio, se evaluó primeramente la relación de cada variable individual con el índice de sitio a través de análisis de regresión simple. Este análisis se realizó para conocer el grado y tipo de relación existente. Posteriormente se realizó un análisis de componentes principales utilizando el programa [NTSYS \(1990\)](#), a fin de seleccionar una combinación de variables de sitio, linealmente independientes, no correlacionadas y que

expliquen gran parte de la varianza total. Los pasos seguidos en este análisis fueron los siguientes:

(1) A partir de las unidades muestrales y sus valores correspondientes a las variables ambientales, se construyó la matriz básica de datos.

(2) Cuando existen diferentes escalas de medida en la matriz básica de datos, se debe realizar una transformación, a fin de que todos los valores se expresen en una sola escala y no haya distorsión en los cálculos de los coeficientes de correlación ([Crisci y López Armengol 1988](#)). La técnica de transformación utilizada fue la estandarización, que consiste en expresar los valores de la matriz básica de datos en unidades de desviación estándar:

$$X_{ij} \text{ estandarizado} = (X_{ij} - \bar{X}_i) / S_i \quad (1)$$

donde:

X_{ij} : valor de la variable i para la unidad muestral j ;

\bar{X}_i : la media de la variable i ;

S_i : desviación estándar de la variable i .

CUADRO 1

Rango de las variables codificadas para el análisis.
Levels of variables coded for the analysis.

Códigos	Variables codificadas				
	Longitud	Latitud	Exposición	Posición sobre la pendiente	Textura
1	71°00'-71°10'	40°-41°	E-S	Valle	Arenoso
2	71°10'-71°20'	41°-42°	E-N	Ladera baja	Arenoso franco
3	71°20'-71°30'	42°-43°	O-S	Media ladera	Franco arenoso
4	71°30'-71°40'	43°-44°	O-N	Ladera alta	Francoarenocarcilloso
5				Cumbre	Arenoarcilloso
6					Franco
7					Franco arcilloso
8					Franco limoso
9					Franco limoarcilloso
10					Limoarcilloso

(3) Construcción de la matriz de similitud. En este caso es una matriz de correlación formada por los valores de los coeficientes de correlación de cada par posible de parcelas. Se utilizó una matriz de correlación y no de varianz covarianza, por ser la recomendada cuando se realiza una estandarización de las variables ([Crisci y López Armengol 1988, Isebrands y Crow 1995](#)). El valor del coeficiente de correlación puede ir de 1 a -1, donde 1 corresponde a la máxima similitud.

(4) Determinación de vectores propios y valores propios a partir de la matriz de correlación.

(5) Interpretación de los componentes derivados y selección de variables.

Posteriormente, las variables seleccionadas entraron como variables independientes en una regresión múltiple, para el desarrollo de una ecuación de estimación del índice de sitio en

ausencia de la especie. Se utilizó la técnica de regresión paso a paso. La calidad del ajuste fue analizada a través del coeficiente de correlación múltiple, que indica el porcentaje de la variación total que se explica por la regresión.

Por último y una vez obtenidos los modelos de predicción del índice de sitio a partir de variables ambientales, se realizó una evaluación de la bondad de predicción de los mismos utilizando, ante la imposibilidad de contar con información adicional, la misma base de datos usada para el ajuste. Para esta evaluación, donde se compararon los datos observados con los estimados por los modelos, se utilizó como medida de error la raíz del error cuadrático medio (RECM) (2) y como medida de sesgo la diferencia agregada (DIFA) (3)

$$RECM = \sqrt{\sum (o - e)^2 / n} \quad (2)$$

$$DIFA = \sum (o - e) / n \quad (3)$$

donde:

o = observado;

e = estimado;

n = número de observaciones;

Mediante la división por la media de los valores observados (\bar{o}) y su multiplicación por 100, se obtienen los valores porcentuales (4) y (5):

$$RECM\% = (RECM * 100) / \bar{o} \quad (4)$$

$$DIFA\% = (|DIFA| * 100) / \bar{o} \quad (5)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Primeramente se presentarán los resultados del análisis de la relación lineal individual de cada variable con el índice de sitio por regresión simple y del conjunto de variables mediante componentes principales. Posteriormente se entregarán los modelos predictores obtenidos por regresión múltiple, a partir de las variables ambientales seleccionadas en los análisis anteriores. Para llevar un orden de la discusión, los resultados son presentados separadamente para la región y las dos zonas de crecimiento.

REGION

Si bien no se consideró la obtención de un modelo predictor del IS para toda la región, debido a los inconvenientes que presentan estos modelos cuando son aplicados a grandes áreas y a los resultados obtenidos al analizar la aplicación de un modelo regional de índice de sitio para la población en estudio (Davel 1998), se entregan algunos resultados interesantes que apoyan las zonas de crecimiento definidas para la especie en la región.

Relación individual de cada variable con el Índice de sitio. De las variables analizadas, la que mejor explica la variación en el IS es el porcentaje de materia orgánica en el horizonte A ($R^2=0,56$) y luego, en menor medida, la precipitación ($R^2=0,26$). La altitud y la longitud explican un 18% a un 14% de la variación respectivamente, mientras que el resto de las variables analizadas están por debajo del 5%. El porcentaje de materia orgánica en el horizonte A es un indicador de las reservas nutritivas del suelo y de importancia en el régimen hídrico del mismo. Muestra una relación lineal con el IS, con incrementos en el valor de éste a medida que incrementa el contenido de materia orgánica. El resto de las variables no muestran una influencia significativa sobre el IS; sin embargo, este primer análisis es sólo orientativo, pues al considerar cada variable individualmente no se está teniendo en cuenta su interrelación con los otros factores del medio.

Análisis de componentes principales. Este análisis se realizó para observar la relación de las variables entre sí y con el índice de sitio y el agrupamiento de las parcelas resultante de estas relaciones.

Partiendo de la matriz de correlación se obtuvieron, en primer lugar, los valores propios y vectores propios. La contribución de una variable a cada componente principal está expresada por el coeficiente de regresión del componente con respecto a ese carácter como se observa en el [cuadro 2](#). Como se ve, cada variable contribuye en cada componente pero de manera diferencial. Por ejemplo, en este caso, la precipitación hace el principal aporte al primer componente pero es pobre para el segundo y el tercero.

CUADRO 2

Variables medidas y su contribución en los tres primeros componentes principales para el total de datos.

Variables measured and the first three eigenvectors from the principal component analysis for the whole data set.

Variables	1 ^{er.} componente	2 ^{do.} componente	3 ^{er.} componente
POS	0,539	0,301	-0,063
ALT	0,404	0,828	-0,069
EXP	0,114	0,191	0,780
PEND	0,487	0,174	-0,013
TEXT	-0,347	0,031	0,336
PROFT	-0,203	0,315	-0,609
PROFA	-0,746	0,253	0,075
pHp	0,691	-0,573	0,235
pHKCl	0,497	-0,504	0,243
MO	-0,495	-0,638	-0,074
PREC	-0,859	0,113	0,205
LAT	0,274	-0,724	-0,368
LONG	-0,702	-0,598	0,100

El cuadrado de la contribución de una variable a un componente representa la varianza de esa variable para ese componente, y la sumatoria de las varianzas de todas las variables para un determinado componente es lo que se denomina valor propio. El componente de mayor valor propio es el primer componente, el que le sigue el segundo y así sucesivamente. La suma de los valores propios constituye la varianza total de las unidades muestrales para las variables utilizadas y el porcentaje de traza es el porcentaje de variación aportado por cada componente principal a esa suma (Crisci y López Armengol 1988). En la [figura 2](#) se observa la representación, en un gráfico tridimensional, de la distribución de las parcelas correspondientes a cada zona en base a los tres primeros componentes, los cuales explican el 61,67% de la variación total.

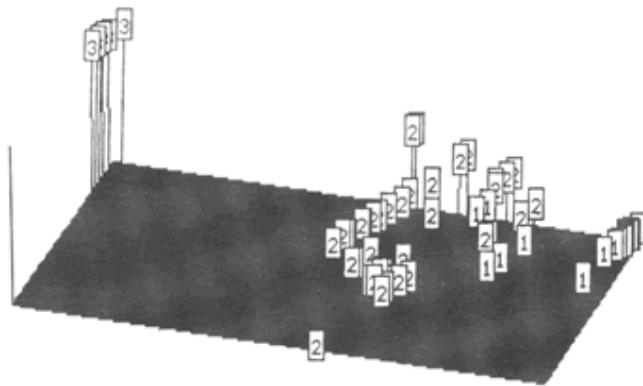


Figura 2: Posición de las parcelas sobre los primeros tres componentes principales. Los números indican la zona de crecimiento en la que está ubicada cada parcela (Tomado de Davel 1998).
Position of the plots along the first three principal components. The label of each plot indicates the growing zone it is located (From Davel 1998).

Analizando los resultados obtenidos para el total de la región, vemos que las variables más ligadas al IS son las que se relacionan con la disponibilidad de agua y nutrientes. Por otro lado, observando el [cuadro 2](#) y la [figura 2](#), encontramos que en el primer componente los principales aportes son realizados por estas mismas variables (en especial la precipitación) y que el agrupamiento de las parcelas en base a este componente, que es el que explica la mayor variación, se corresponde claramente con las zonas de crecimiento definidas por [Davel \(1998\)](#). Sólo se observa una leve superposición entre las zonas 1 y 2 y corresponde a parcelas ubicadas, en terreno, en el límite entre las dos zonas. La distribución de las parcelas dentro de cada zona estaría explicada, además, por el segundo y el tercer componente, donde los principales factores de variación son altitud, latitud y porcentaje de materia orgánica en el horizonte A y profundidad total del suelo y exposición, respectivamente.

ZONA 1

Relación individual de cada variable con el Indice de sitio. Los estadísticos descriptivos de las variables analizadas en la zona 1 se presentan en el [cuadro 3](#).

CUADRO 3

Valores máximo, mínimo, media y desvío estándar de índice de sitio, posición sobre la pendiente, altitud, exposición, pendiente, textura del suelo, profundidad total del suelo, profundidad del horizonte A, pH_P, pH_{KCl}, porcentaje de materia orgánica y precipitación media anual de las 19 parcelas de pino oregón medidas en la zona de crecimiento 1.

Maximum, minimum, mean and standard deviation values of site index, position on slope, elevation, aspect, slope, soil texture, total soil depth, depth of A horizon, pH_P, pH_{KCl}, percentage of organic matter, and annual precipitation ranges of the 19 Douglas-fir plots measured in the growing zone 1.

Variable	Máximo	Mínimo	Media	Desv. est.
----------	--------	--------	-------	------------

Indice de sitio (IS)	18	9	14	2,101
Posición sobre la pendiente (POS)	4	2	3	0,745
Altitud (ALT)	1.124	662	948	153,08
Exposición (EXP)	4	1	2	1,191
Pendiente (PEND)	31	4	16	7,193
Textura (TEXT)	9	1	3	2,437
Profundidad total del suelo (PROFT)	1	0,5	0,95	0,143
Profundidad del horizonte A (PROFA)	0,18	0,03	0,10	0,038
pHp	6,95	5,80	6,37	0,304
pHKCl	6,20	5,18	5,67	0,345
% de materia orgánica (MO)	11	2,13	4,43	2,354
Precipitación (PREC)	900	560	688	138,92

De este análisis surgen, como las variables más significativas en cuanto a su relación con el IS, la materia orgánica en el horizonte A ($R^2: 0,63$), la textura ($R^2: 0,29$) y la profundidad del horizonte A ($R^2: 0,19$). Nuevamente el contenido de materia orgánica en el horizonte A aparece como la variable de mayor influencia sobre la productividad, observándose una relación lineal positiva con el IS ([figura 3](#)). La textura también presenta una relación positiva con el IS, con incrementos de éste al pasar de los suelos arenosos a los franco limosos, lo que está relacionado a una mayor retención de agua a medida que incrementa la fracción más fina en el suelo ([figura 4](#)). La profundidad del horizonte A refleja el status de materia orgánica incorporada al suelo y, por lo tanto, está relacionada a los regímenes nutritivo e hídrico del mismo. También muestra una relación positiva, aunque no muy marcada, con el IS ([figura 5](#)).

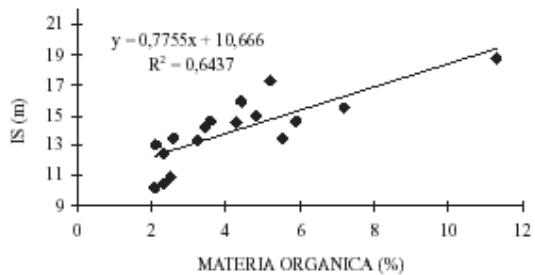


Figura 3: Índice de sitio y porcentaje de materia orgánica en el horizonte A de las 19 parcelas de pino oregón medidas en la zona de crecimiento 1 en el norte de la Patagonia. También se presentan los coeficientes de una ecuación lineal que predice el índice de sitio en función del porcentaje de materia orgánica y el coeficiente de determinación de dicho modelo.

Site index and percentage of organic matter in the surface soil (A horizon) of the 19 Douglas-fir plots measured within the growing zone 1 in northern Patagonia. The coefficients of a lineal equation that predicts site index based on the percentage of organic matter and the coefficient of determination of this model are also presented.

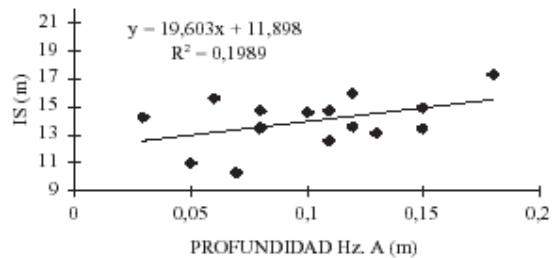


Figura 4: Indice de sitio y textura del suelo de las 19 parcelas de pino oregón medidas en la zona de crecimiento 1 en el norte de la Patagonia. También se presentan los coeficientes de una ecuación lineal que predice el índice de sitio en función de la textura del suelo y el coeficiente de determinación de dicho modelo.

Site index and soil texture of the 19 Douglas-fir plots measured within the growing zone 1 in northern Patagonia. The coefficients of a lineal equation that predicts site index based on the soil texture and the coefficient of determination of this model are also presented.

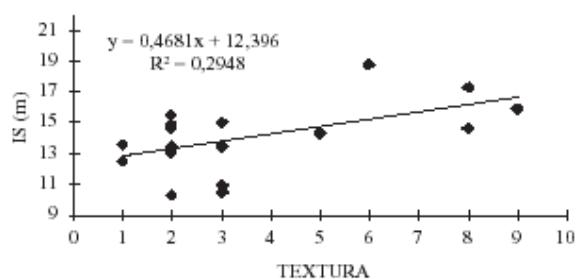


Figura 5: Indice de sitio y profundidad del horizonte A de las 19 parcelas de pino oregón medidas en la zona de crecimiento 1 en el norte de la Patagonia. También se presentan los coeficientes de una ecuación lineal que predice el índice de sitio en función de la profundidad del horizonte A y el coeficiente de determinación de dicho modelo.

Site index and depth of A horizon of the 19 Douglas-fir plots measured within the growing zone 1 in northern Patagonia. The coefficients of a lineal equation that predicts site index based on the depth of A horizon and the coefficient of determination of this model are

also presented.

La exposición, si bien no muestra una relación marcada con el IS, es un factor crítico, principalmente en esta zona que es marginal para la especie. Esta marginalidad se debe principalmente a los bajos valores de precipitación, efecto que se ve agravado en las exposiciones oeste y norte por ser éstas las laderas sometidas a los vientos predominantes y a una mayor insolación, respectivamente. Esto hace que, prácticamente, no existan en esta zona plantaciones de la especie en estas exposiciones.

Algo similar ocurre con la profundidad total del suelo, factor de importancia dado que influye en la capacidad de agua aprovechable del suelo; sin embargo, debido a que la gran mayoría de las plantaciones muestreadas (85%) se encuentran en suelos con profundidades de un metro y más, no surge como un factor de variación importante que influya sobre el IS.

Nuevamente y en este caso en forma más marcada las variables que tienen mayor influencia sobre la productividad son las que se relacionan con la disponibilidad de nutrientes y, especialmente, de agua en el suelo, aspecto fundamental en esta zona para el desarrollo de las plantaciones de la especie.

Análisis de componentes principales. Para la selección de las variables en este análisis se consideran las que tienen el más alto valor de contribución en cada componente, independientemente del signo que posean. Estas variables son las que representan la mayor variación entre las unidades muestrales y, por lo tanto, dentro de este grupo, estarán las que mayor relación tengan con la variación del IS.

En el primer componente las variables con mayor contribución son altitud, longitud y exposición, en el segundo componente los dos pH, latitud y profundidad del horizonte A y en el tercero porcentaje de materia orgánica y textura. Estos tres primeros componentes explican un 68,9% de la variación total.

Modelos predictivos del Índice de sitio para la zona 1. El grupo de variables seleccionadas en el análisis de componentes principales, que incluye a aquellas que resultaron como mayormente relacionadas al IS en los análisis anteriores, fueron analizadas junto con transformaciones (cuadrática, cúbica, inversa, logarítmica) y combinaciones (producto y cociente) de las mismas, en una regresión múltiple para la obtención del modelo predictivo del IS. En el [cuadro 4](#) se presentan los modelos ajustados para esta zona.

CUADRO 4

Parámetros estimados y coeficiente de determinación de los modelos predictores del IS con una, dos, tres y cuatro variables independientes ajustados para la zona de crecimiento 1.
Parameters and coefficient of determination for the models fitted to predict site index in growing zone 1 based on one, two, three, and four independent variables.

Modelo	a	b	c	d	e	R ²
IS=a+b*Log ₁₀ (MO) (1)	9,0562	8,6384	–	–	–	0,68
IS=a+b*Log ₁₀ (MO)+c*(PROFA/EXP) (2)	8,1332	8,14	16,5860	–	–	0,80
IS=a+b*Log ₁₀ (MO)+c*(PROFA/EXP)+d* Log ₁₀ (ALT) (3)	40,7471	6,2520	28,8957	-10,9297	–	0,88
IS=a+b*Log ₁₀ (MO)+c*(PROFA/EXP)+d* Log ₁₀ (ALT)+e*TEXT (4)	50,33	4,73	28,29	-14,08	0,19	0,91

Validación de los modelos. La validación de los modelos se realizó contra la misma base de datos utilizada para el ajuste, obteniéndose medidas de error y sesgo ([cuadro 5](#)).

CUADRO 5

Medidas de sesgo y error para cada modelo seleccionado de una, dos, tres y cuatro variables para la zona de crecimiento 1.

Bias and error of each selected model containing one, two, three and four variables for the growing zone 1.

Modelo	DIFA	DIFA%	RECM	RECM%
Modelo (1)	0,000076	0,00054	1,159	8,28
Modelo (2)	-0,0526	-0,376	0,840	6,00
Modelo (3)	-0,0917	-0,655	0,786	5,62
Modelo (4)	-0,0898	-0,642	0,722	5,16

Si observamos los valores de DIFA vemos que los cuatro modelos son insesgados y que el modelo (1) subestima mientras los otros tres producen sobreestimación. Los valores de error son bajos para los cuatro modelos.

Los modelos (2), (3) y (4) son los que presentan mejor comportamiento, con menores valores de error y sesgo; sin embargo, los dos últimos presentan los mayores valores en los coeficientes de determinación y correlación. Si bien estos dos modelos son muy similares, se recomienda el modelo (3) por tener menor número de variables involucradas. Si comparamos los gráficos de residuales de los modelos vemos que los mejores comportamientos corresponden a los modelos 3 y 4. En todos los casos se observa una buena distribución de los mismos en forma de banda paralela al eje X ([figura 6](#)).

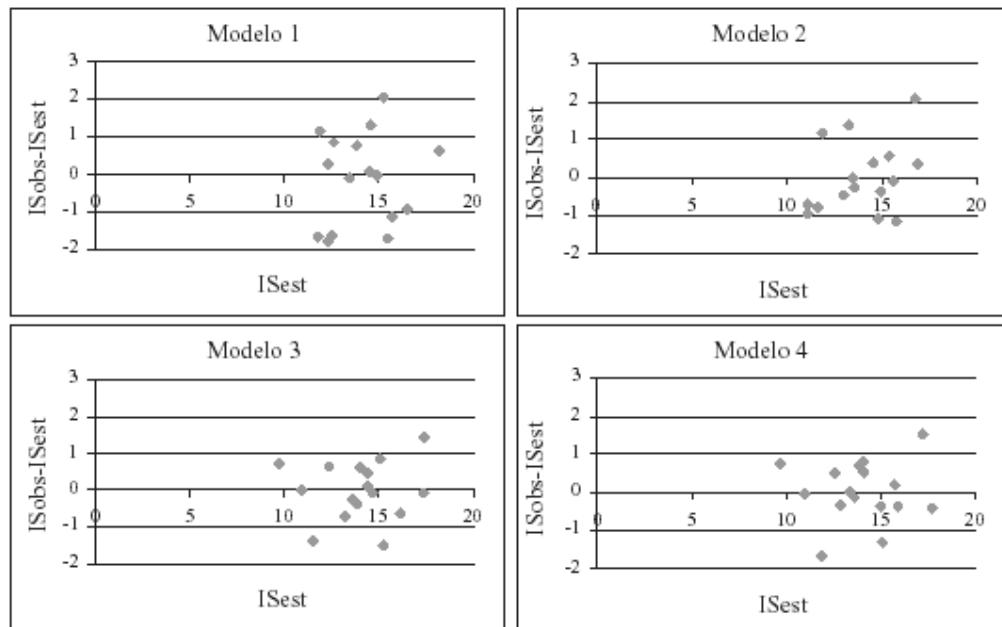


Figura 6: Gráfico de residuales de los cuatro modelos elegidos para predecir el índice de sitio de las plantaciones de pino oregón en la zona de crecimiento 1. Residual plots of the four models selected to predict site index of Douglas-fir plantations in the growing zone 1.

Es importante tener en cuenta que estos modelos no son aplicables en los sitios donde existan condiciones limitantes para la especie en esta zona, es decir, suelos poco profundos, drenaje impedido parcial o permanente, exposiciones O-NO, cumbres y sectores planos donde se produce acumulación de aire frío.

ZONA 2

Relación individual de cada variable con el Índice de sitio. Los estadísticos descriptivos de las variables analizadas en la zona 2 se presentan en el [cuadro 6](#).

CUADRO 6

Valores máximo, mínimo, media y desvío estándar de índice de sitio, posición sobre la pendiente, altitud, exposición, pendiente, textura del suelo, profundidad total del suelo, profundidad del horizonte A, pH, pHKCl, porcentaje de materia orgánica y precipitación media anual de las 48 parcelas de pino oregón medidas en la zona de crecimiento 2.

Maximum, minimum, mean and standard deviation values of site index, position on slope, elevation, aspect, slope, soil texture, total soil depth, depth of A horizon, pH, pHKCl, percentage of organic matter, and annual precipitation ranges of the 48 Douglas-fir plots measured in the growing zone 2.

Variable	Máximo	Mínimo	Media	Desv. est.
Índice de sitio (IS)	21	11	16	2,169
Posición sobre la pendiente (POS)	5	1	3	0,878
Altitud (ALT)	1.068	349	643	245,030

Exposición (EXP)	4	1	2	1,269
Pendiente (PEND)	34	0	13	9,778
Textura (TEXT)	10	1	4	2,904
Profundidad total del suelo (PROFT)	1	0,5	0,93	0,130
Profundidad del horizonte A (PROFA)	0,34	0,06	0,16	0,072
pH _P	6,76	5,35	6,27	0,327
pHK _{Cl}	6,31	4,42	5,58	0,402
% de materia orgánica (MO)	17	2	8	4,175
Precipitación (PREC)	1.400	900	1.067	149,920

La variable que aparece como más significativa en su relación con el IS vuelve a ser la materia orgánica en el horizonte A, aunque esta relación es menos estrecha que en la zona 1 ($R^2: 0,35$) ([figura 7](#)). Las demás variables no muestran una relación marcada con el IS.

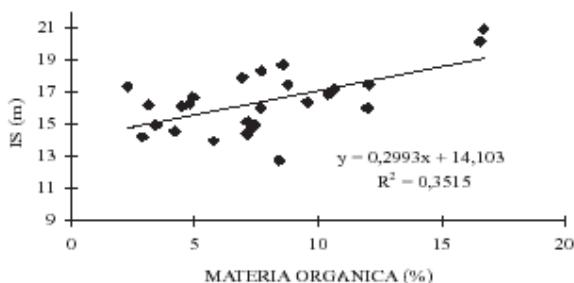


Figura 7: Indice de sitio y porcentaje de materia orgánica en el horizonte A de las 48 parcelas de pino oregón medidas en la zona de crecimiento 2 en el norte de la Patagonia. También se presentan los coeficientes de una ecuación lineal que predice el índice de sitio en función del porcentaje de materia orgánica y el coeficiente de determinación de dicho modelo.

Site index and percentage of organic matter in the surface soil (A horizon) of the 48 Douglas-fir plots measured within the growing zone 2 in northern Patagonia. The coefficients of a lineal equation that predicts site index based on the percentage of organic matter and the coefficient of determination of this model are also presented.

Análisis de componentes principales. En este caso con los tres primeros componentes se explica el 57,22% y se necesitan los 13 componentes para explicar el 100% de la variación total. Las variables seleccionadas por su mayor valor de contribución en cada componente son: en el primero altitud, longitud y latitud, en el segundo precipitación, profundidad total y pH_P y en el tercero, exposición, textura y porcentaje de materia orgánica en el horizonte A.

Modelos predictivos del Indice de sitio para la zona 2. Las variables seleccionadas en los análisis precedentes fueron incluidas en un análisis de regresión múltiple, junto con las

transformaciones y combinaciones mencionadas anteriormente en la zona 1, para la obtención de los modelos predictivos del IS. Los mejores modelos de 1, 2, 3 y 4 variables, encontrados para esta zona, se presentan en el [cuadro 7](#).

CUADRO 7

Parámetros estimados y coeficiente de determinación de los modelos predictores del IS con una, dos, tres y cuatro variables independientes ajustados para la zona de crecimiento 2.

Parameters and coefficient of determination for the models fitted to predict site index in growing zone 2 based on one, two, three, and four independent variables.

Modelo	a	b	c	d	e	R ²
IS=a+b*MO ² /EXP (1)	15,6128	0,0165	–	–	–	0,57
IS=a+b*MO ² /EXP+c*PROFT (2)	11,8488	0,0163	4,0715	–	–	0,67
IS=a+b*MO ² /EXP+c*PROFT+d*TEXT (3)	12,3393	0,0165	4,1940	-0,1357	–	0,72
IS=a+b*MO ² /EXP+c*PROFT+d*TEXT+e*ALT (4)	11,0736	0,0190	4,1697	-0,1594	0,0017	0,77

Validación de los modelos. Las medidas de error y sesgo obtenidas de la evaluación de estos modelos se presentan en el [cuadro 8](#).

CUADRO 8

Medidas de sesgo y error para cada modelo seleccionado de una, dos, tres y cuatro variables para la zona de crecimiento 2.

Bias and error of each selected model containing one, two, three and four variables for the growing zone 2.

Modelo	DIFA	DIFA%	RECM	RECM%
Modelo (1)	-0,0074	-0,045	1,204	7,32
Modelo (2)	-0,0441	-0,268	1,094	6,65
Modelo (3)	-0,0907	-0,552	1,062	6,46
Modelo (4)	-0,0359	-0,218	0,925	5,63

Los valores de DIFA nos indican que los cuatro modelos son insesgados y que producen una leve sobreestimación. Los valores de error son bajos para los cuatro modelos. Para complementar la evaluación de los modelos se presentan los gráficos de residuales ([figura 8](#)).

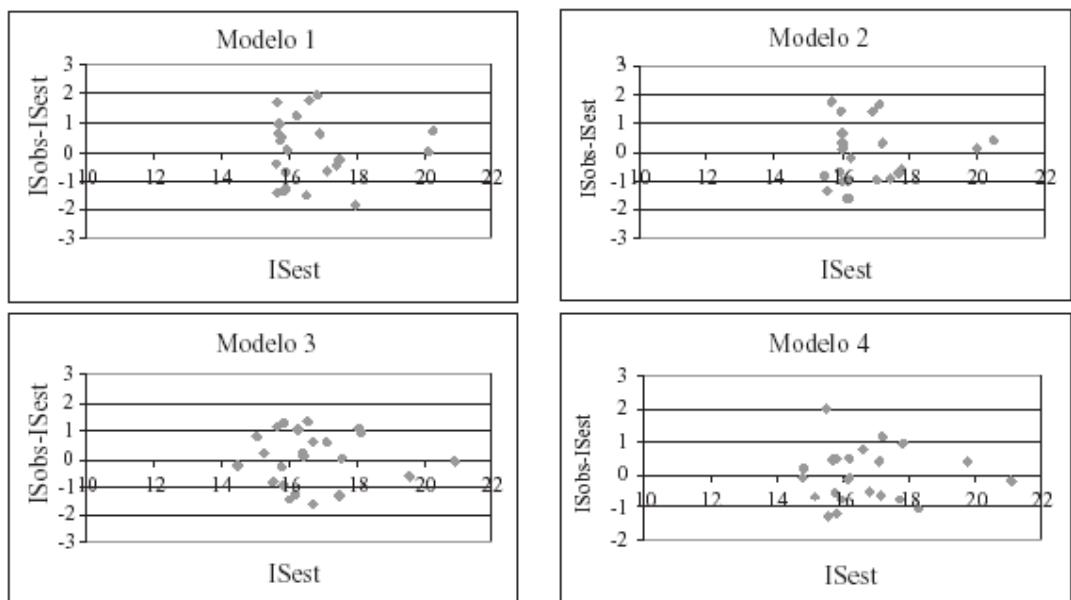


Figura 8: Gráfico de residuales de los cuatro modelos elegidos para predecir el índice de sitio de las plantaciones de pino oregón en la zona de crecimiento 2.

Residual plots of the four models selected to predict site index of Douglas-fir plantations in the growing zone 2.

Al analizar los resultados obtenidos de la validación de los modelos, observando los gráficos de residuales se ve que los modelos (1) y (2) no realizan buenas estimaciones en los IS menores a 15, inconveniente que se ve superado en el modelo (3) con el ingreso de la textura como variable adicional. Este modelo y el (4) presentan un comportamiento muy similar, por lo que al igual que en la zona 1 se lo recomienda por el menor número de variables.

Como en la zona anterior, debemos considerar los factores limitantes de esta zona: cumbres y sectores planos, suelos con drenaje impedido en forma parcial o permanente y suelos poco profundos, condiciones bajo las cuales no son aplicables estos modelos.

COMPARACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS ZONAS 1 Y 2

En ambas zonas, el porcentaje de materia orgánica del horizonte A aparece como el principal factor, dentro de los analizados, influyendo sobre la productividad. Sin embargo, se observa una más estrecha relación de esta variable con la variación del IS en la zona 1. En esta misma zona, como se mencionó anteriormente, la profundidad total no aparece como un factor importante, pero esto se debe a que la variable no presenta prácticamente variación entre las distintas parcelas analizadas, donde las plantaciones se encuentran en su gran mayoría (85% de las plantaciones muestreadas) en suelos de un metro o más de profundidad. Sí aparece como una variable de importancia la profundidad del horizonte A. En la zona 2 ocurre lo contrario, apareciendo como factor de importancia la profundidad total y no la profundidad del horizonte A, debido a que esta última es, en este caso, la que no presenta una variación importante entre las unidades muestreadas. En esta zona el 70% de las plantaciones muestreadas se encuentran en suelos de un metro o más de profundidad, mientras que un 20% de las mismas está en sitios con suelos menores a 70 cm.

La exposición aparece en los modelos de ambas zonas como un factor de corrección, disminuyendo el valor del IS al pasar de las mejores a las peores exposiciones. Esta variable es de importancia fundamental en la zona 1, donde se convierte en un factor limitante para el

desarrollo de la especie.

La textura es una variable predictora de importancia en la zona 1, aumentando el índice de sitio a medida que se pasa de los suelos arenosos a los franco limosos, relacionado esto a una mayor retención de agua. En la zona 2, la textura es un factor de menor importancia en lo que hace a la disponibilidad de agua para las plantas, debido a que ésta se ve incrementada notoriamente por el mayor porcentaje de materia orgánica y de cenizas alofánicas que presentan estos suelos.

COMPARACION CON OTROS TRABAJOS REALIZADOS PARA ESTA ESPECIE

Si se comparan estos resultados con los obtenidos por otros autores, vemos que la mayoría coinciden en la importancia de las variables relacionadas a la retención nutrientes y de agua en el suelo durante el período de crecimiento. [Graham et al. \(1990\)](#) sostienen que de las coníferas existentes en las Montañas Rocosas, el pino oregón es una de las más sensibles a variaciones en los niveles de materia orgánica del suelo. Estas capas orgánicas son altas en humedad, ricas en nutrientes y representan excelentes substratos para la formación de micorrizas. Indican, además, que horizontes superficiales ricos en materia orgánica aumentan la producción de semillas y la productividad. Estos resultados coinciden con lo observado en el presente estudio.

Uno de los principales trabajos realizados con esta especie es el anteriormente mencionado de [Steinbrenner \(1979\)](#), en el oeste de Washington y Oregon. Las variables ambientales utilizadas en su análisis fueron: profundidad total y profundidad efectiva del suelo, pedregosidad, profundidad del horizonte A, contenido de arcilla en horizontes A, B y total, limo+arcilla en horizonte A, altitud, precipitación media anual, pendiente y posición en la pendiente. De estas variables, las que más influencia mostraron sobre el índice de sitio fueron: profundidad efectiva, profundidad del horizonte A y contenido total de arcilla. Según el autor esto se debe a que son las variables que influyen principalmente sobre la disponibilidad de agua en la estación de crecimiento y de nutrientes.

[Contreras y Peters \(1982\)](#) derivaron un índice de sitio para pino oregón a partir de variables edáficas para la provincia de Valdivia (Chile). Encontraron que las variables de suelo seleccionadas (profundidad del horizonte A, drenaje, capacidad de agua aprovechable) y el índice de sitio arrojaron altos valores de correlación (67-73%).

CONCLUSIONES

- La materia orgánica en el horizonte superior aparece como la variable más relacionada con la productividad en toda la región. Este es un aspecto muy importante a tener en cuenta, principalmente al planificar las actividades de manejo y aprovechamiento, ya que las pérdidas de las capas superficiales del suelo podrían producir importantes mermas en la productividad del sitio.
- En toda la región las variables más importantes son las relacionadas a la capacidad de retención del agua en el suelo. Debido a los datos disponibles no se pudo analizar la relación del IS con la capacidad de agua aprovechable. Esta es una variable a tener en cuenta en futuros estudios.
- En la zona 1 las variables que mejor explican la variación del IS son el porcentaje de materia orgánica en el horizonte A, la profundidad del horizonte A, la exposición y la altura sobre el nivel del mar. En el caso de la zona 2 estas variables son el porcentaje de materia orgánica en el horizonte A, la exposición, la profundidad total y la textura del suelo. Estas variables, con excepción de la materia orgánica que requiere de análisis de laboratorio, son fácilmente determinables en el campo.
- La relación del IS con las variables ambientales es consistente desde el punto de vista biológico, confirmando la zonificación realizada y permitiendo, en esta etapa del conocimiento,

su uso para la predicción del IS en lugares posibles de forestar con la especie.

AGRADECIMIENTOS

A los profesores de la Universidad Austral de Chile Juan Schlatter y Guillermo Trincado por sus consejos, aportes y dedicación durante la elaboración del presente trabajo.

BIBLIOGRAFIA

- ALDER, D. 1980. *Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento*. Estudio FAO Montes. Roma, Italia. Vol. II. 80 p.
- ASSMANN, E. 1970. *The Principles of Forest Yield Study*. Pergamon Press. Oxford, New York, 506 p.
- BARROS, V., V. CORDON, C. MOYANO, R. MENDEZ, J. FORQUERA, O. PIZZIO. 1983. Cartas de precipitación de la zona Oeste de las provincias de Río Negro y Neuquén. Universidad Nacional del Comahue, Centro Nacional Patagónico - CONICET. Argentina. 40 p.
- COLMET DAAGE, F., M. LANCIOTTI, A. MARCOLIN. 1995. "Importancia forestal de los suelos volcánicos de la Patagonia Norte y Central", *Climo-topo-secuencias de suelos y vegetación*. ORSTOM (Francia) - INTA (Argentina). Bariloche, Argentina, 27 p.
- CONTRERAS, C., N. PETERS. 1982. "Indices de sitio para Pino oregón en la Pcia. de Valdivia y sus relaciones con sitios para P. insigne. Reunión sobre Evaluación de la productividad de sitios forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. Actas: 98-109.
- CORDON, V., J. FORQUERA, J. GASTIAZORO. 1993. Estudio microclimático del área cordillerana del SO de la provincia de Río Negro. "Cartas de precipitación". Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Cs. Agrarias. Cinco Saltos, Argentina. 17 p.
- COX, F. 1982. "Indices de productividad en la evaluación de la calidad de sitio. Reunión sobre Evaluación de la productividad de sitios forestales". Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. Actas: 7-24.
- CRISCI, J. V., M. F. LOPEZ ARMENGOL. 1988. Introducción a la teoría y práctica de la taxonomía numérica. O.E.A. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. Universidad Nacional de La Plata, Argentina. 131 p.
- DANIEL, P. W., U. E. HELMS, F. S. BAKER. 1982. *Principios de Silvicultura*. Ed. Mc Graw Hill, México, 231-250 p.
- DAVEL, M., 1998. Identificación y Caracterización de Zonas de Crecimiento para Pino Oregón en la Patagonia Andina Argentina. Tesis para optar por el grado de Magíster Mención Manejo Sustentable de Recursos Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 119 p.
- GRAHAM, R. T.; A. HARVEY, P. DUMROSE, M. JURGENSEN. 1990. "Importance of soil organic matter in the development of interior Douglas-fir", *Symposium Proceedings*. Washington. 85-91.
- HÄGGLUND, B. 1981. "Evaluation of forest site productivity", *Forestry Abstracts*. Review Article. Vol. 42 (11): 515-527.
- IRIZARRI, J., J. MENDIA. 1991. Reconocimiento de suelos y evaluación de la aptitud forestal de la región precordillerana de la provincia. de Río Negro. Consejo Federal de Inversiones - Universidad Nacional del Comahue (Fac. de Cs. Agrarias). Argentina, 61 p.

ISEBRANDS, J. G., T. R. CROW 1995. "Introduction to use and interpretation of principal component analysis in forest biology". USDA Forest Service. *General Technical Report NC-17*. 19 p.

MENDIA, J., J. IRISARRI. 1986. Relevamiento de suelos con aptitud forestal en la región occidental de la provincia de Río Negro. Consejo Federal de Inversiones - Universidad Nacional del Comahue (Fac. de Cs. Agrarias). Argentina, 113 p.

MONSERUD, R. A. 1984. "Height Growth and Site Index Curves for Inland Douglas-fir Based on Stem Analysis Data and Forest Habitat Type", *For. Sci.* 30 (4): 943-965.

NTSYS - pc versión 1.60, 1990. Applied biostatistics, Inc.

ORTEGA, A., G. MONTERO 1988. "Evaluación de la calidad de las estaciones forestales". Revisión bibliográfica. Icona, Madrid. *Ecología* (2): 155-184.

PRITCHET, W. L. 1991. *Suelos forestales: propiedades, conservación y mejoramiento*. Ed. Limusa, México, 307-333 p.

STEINBRENNER, E. C. 1979. Forest soil productivity relationships. *Forest soils of the Douglas-fir Region*. Washington State University, pp. 199-229.

THROWER, J. S. 1989. "Site quality evaluation using site index". Silviculture Institute of British Columbia. 11 p.

Recibido: 02.05.2002

Aceptado: 21.10.2002