

RELACIONES ENTRE CAMBIOS DE CRECIMIENTO Y NUTRICIÓN: ANÁLISIS BASADOS EN APROXIMACIONES ESPACIO-TEMPORALES EN FINLANDIA

P. J. Pérez-Martínez

Institute for Forest Growth, University of Freiburg, Tennenbacherstr. 4, 79085 FREIBURG, (Germany) y C/Valdecaleras 1, 7ªA. 28043-MADRID (España). Correo electrónico: pedroperezmartinez@telefonica.net

Resumen

El principal objetivo de este estudio es la detección de las anomalías en las tendencias de crecimiento, su interacción con las tendencias en el clima y en la nutrición. Los crecimientos en altura de la picea noruega (*Picea abies* (L.) Karst) y del pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) son utilizados para describir y modelizar los lugares de ubicación con claro cambio en la calidad de estación. También se pretenden encontrar las relaciones entre los modelos espaciales y las trayectorias espacio-temporales en las desviaciones del crecimiento forestal y las causas potenciales de estos cambios. Las investigaciones de las tendencias de crecimiento se relacionan en distintos terrenos, climas (temperaturas, precipitaciones y balances hídricos), cambios climáticos estacionales, concentraciones de CO₂, nutriciones foliares y deposiciones atmosféricas de nitrógeno. Todos estos factores son medidos para el conjunto de datos (33 lugares y 110 árboles apeados distribuidos de Norte a Sur a lo largo de Finlandia). Las tendencias temporales y modelos espaciales de los cambios en altura se relacionan con las oscilaciones de temperatura del aire, precipitaciones, niveles de nitrógeno en las hojas y deposiciones atmosféricas de nitrógeno. Se calculan las desviaciones en el crecimiento en altura. Se nota un significativo incremento entre el 12 y el 21 % en la picea noruega y el pino silvestre. El valor de la media anual en las desviaciones del crecimiento en altura a largo plazo es traducido en términos de volumen y biomasa de fuste en un 32-24 % y 100-85 m³ ha⁻¹ respectivamente.

Palabras clave: *Calidad de estación, Clima, Deposiciones atmosféricas de nitrógeno, Modelos lineales generales (MLG), Modelos de regresión*

INTRODUCCIÓN

Los cambios recientes en el crecimiento forestal han sido debidos a los cambios en diferentes factores limitantes del mismo (PRIETZEL & REHFUESS, 1999). Una mejora en la calidad de estación ha estado particularmente ligada a la aportación de nitrógeno durante las últimas décadas como muestran diversos experimentos de fertilización forestal (SPIECKER, 1991; LONG

et al., 1997; HALLENBARTER et al., 2002; KISHSCHUK et al., 2002). Las condiciones climáticas variarán mucho dependiendo del lugar, especie y rodal considerado (SPIECKER, 1990). Una alta fluctuación de los parámetros climáticos (KARL et al., 1995), como son la temperatura del aire y precipitación, llevará asociada alternativos periodos de aceleración y retardo en el crecimiento forestal. La prolongación del periodo vegetativo, debido a primaveras y veranos

más calurosos (MYNENI *et al.*, 1997; MYNENI *et al.*, 2001), provocará un temprano florecer de la guía terminal y un incremento máximo del área foliar como consecuencia de las respuestas bioquímicas del árbol a los cambios de temperatura (LUCHT *et al.*, 2002). El crecimiento, en volumen de fuste, de los árboles de los bosques boreales está claramente limitado por la duración del periodo vegetativo (indirectamente influenciado por la temperatura, cuando las células cambiales del fuste se dividen) pero también por el comienzo del deshielo en primavera (VAGANOV *et al.*, 1999). Las tendencias positivas en el crecimiento forestal están vinculadas a cambios positivos en el ciclo del carbono (ALEKSEEV & SOROKA, 2002), especialmente si la nutrición en nitrógeno ha sido mejorada simultáneamente.

El crecimiento en altura es un indicador apropiado de la calidad de estación y ha sido ampliamente utilizado en estudios de producción forestal (SCHMIDT & CARMEAN, 1988; MONSERUD *et al.*, 1990; WANG *et al.*, 1994; WANG, 1995). Además, las diferencias en la altura media de los árboles a una cierta edad base (i.e. diferencias de índice de sitio), árboles con diferentes fechas de germinación creciendo en lugares similares o con diferencias en los ratios de crecimiento (desviaciones de una única generación de árboles respecto a una referencia llamada tabla de producción o/y modelo ecológico de crecimiento), pueden ser consideradas indicativas de cambios en la calidad de estación (KAHLE *et al.*, 2003).

En este estudio se han pretendido detectar las tendencias en el crecimiento y su interacción con el clima y la nutrición. Los incrementos en altura de la picea noruega (*Picea abies* (L.) Karst) y del pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) son utilizados, pretendiendo describir y modelizar los lugares que experimentan un claro cambio en la calidad de estación pero también encontrar relaciones entre modelos espaciales y trayectorias espacio-temporales de los cambios en el crecimiento forestal y las causas potenciales de estos cambios. Las causas investigadas de las tendencias en el crecimiento, referidas a los cambios en la calidad de estación son: clima (más concretamente la temperatura del aire y precipitación), cambio climático estacional, creciente concen-

tración de CO₂, nutrición foliar y deposiciones atmosféricas de nitrógeno. Tendencias temporales y modelos espaciales de los cambios en el crecimiento en altura en relación con los cambios en la temperatura del aire y precipitación, y en relación con los niveles de nutrición foliar en nitrógeno y deposiciones atmosféricas de nitrógeno son analizadas. Con este estudio espero entender mejor los procesos implicados en los detectados cambios en el crecimiento forestal y su asociación con los cambios en el medio ambiente utilizando análisis estadísticos.

MATERIAL Y MÉTODOS

En este estudio se ha contado con datos mediambientales y datos de crecimiento en altura. Los datos de crecimiento en altura fueron obtenidos directamente mediante análisis de fuste en árboles dominantes. Los datos fueron ajustados y comprobados mediante el empleo de un algoritmo Carmean con el fin de calcular la altura del árbol correspondiente a una determinada edad y para cada disco de sección muestreado (DYER & BAILEY, 1987). Comparando el número de medidas anuales con el número de anillos para una altura dada de fuste (edad cambial de las secciones a diferentes alturas en el árbol), la calidad de las mediciones pudo ser controlada (SPECKER, 2002). También fueron utilizados datos de crecimiento en altura a largo plazo procedentes de una red de 25 parcelas de investigación permanentes pertenecientes al METLA (Instituto Forestal Finlandés). Las tablas de producción de GUSTAVSEN (1980) fueron consultadas, con el fin de detectar las desviaciones en el crecimiento.

Se han utilizado a su vez datos medioambientales procedentes de 25 parcelas permanentes y de 8 parcelas del Nivel II (FIMCI, Instituto para el Monitoreo Intensivo de los Ecosistemas Forestales, figura 1). Los datos incluyeron valores de deposiciones atmosféricas, nutrición foliar y clima. Superficies de deposición (fuente EMEP, Programa Cooperativo para el Monitoreo y Evaluación de la Transmisión de Contaminantes en Europa) fueron producidas a lo largo de Finlandia por interpolación espacial de datos de estaciones con una resolución de 50 km² (VESTRENG, 2001).

Superficies climáticas mensuales (fuente CRU, Unidad de Investigación Climática de la Universidad de East Anglia) fueron interpoladas de datos de estaciones a 0.5 grados lat/long. El índice de vegetación global y mensual AVHRR (fuente NOAA, Administración Nacional Oceánica y Atmosférica) fue obtenido para el año 1989 con un tamaño nominal de pixel de 16 km.

Para analizar las tendencias del crecimiento en altura, transformé la serie no estacionaria de incrementos de altura en una serie estacionaria de incrementos de altura relativos que tienen una media definida de 0 y una varianza relativamente constante (COOK & KAIRUKSTIS, 1990). Esto se obtuvo utilizando la siguiente expresión:

$$\Delta ih_t = Ih_dev_t = Ih_obs_t - Ih_exp_t / Ih_exp_t \quad [1]$$

donde Ih_dev_t (%) es la desviación del crecimiento en altura expresada en porcentajes para el tiempo t , Ih_obs_t (m), Ih_exp_t (m), son los incrementos en altura observados (valores absolutos obtenidos directamente de análisis de fuste y/o inventarios forestales) y esperados (de acuerdo con una segunda generación y/o tabla de producción) para el tiempo t . Por ejemplo, valores que excedan 0 indican incrementos mayores que los esperados por la tendencia de edad. Además la tendencia de edad ha sido removida sin eliminar las posibles tendencias en el crecimiento (BECKER, 1989).

Las tendencias temporales en las desviaciones del crecimiento en altura, mostrando la magnitud del cambio detectado, pueden ser dadas mediante el cálculo de líneas de tendencia (regresión lineal simple); ecuaciones de la forma:

$$\Delta ih_t = Ih_dev_t = a + b * Date \quad [2]$$

donde el coeficiente b (pendiente) indica la dirección (creciente o decreciente) así como la magnitud de los parámetros de crecimiento dentro de un lapso de tiempo dado (HASENAUER et al., 1999); el coeficiente a (intersección) caracteriza el nivel inicial del cambio del crecimiento en altura. De la misma forma, las regresiones lineales fueron calculadas para las variables explicativas (acorde con las hipótesis de investigación principales, cambios en la temperatura y precipitación estacional, estado nutricional de nitrógeno y valores de deposición de nitrógeno atmosférico). El periodo de estas tendencias solapó el periodo de la variable respuesta.

La determinación de las relaciones entre los modelos espaciales y las trayectorias espaciotemporales en las desviaciones del crecimiento forestal y las causas potenciales de estos cambios fueron analizadas mediante el uso de la estadística convencional (técnicas de regresión múltiple y análisis de varianza). El efecto de una variable cualitativa como es la especie arbórea fue examinada tratándola como una variable dummy. El análisis fue realizado utilizando los procedimientos GLM y REG (modelos lineales generalizados) en el programa estadístico SAS (versión 8.02). Además el siguiente modelo lineal fue asumido:

$$SD_{Ih_dev} = \beta_0 + \beta_c x_c + \beta_d x_d + \beta_n x_n + \beta_{**} x_{**} + \varepsilon \quad [3]$$

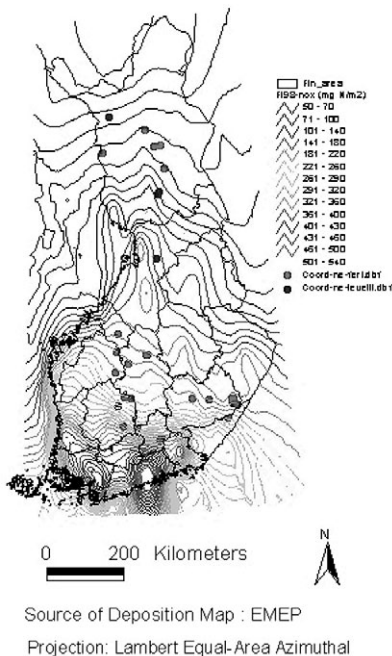


Figura 1. Mapa del área de estudio incluyendo la superficie de deposición de nitrógeno-ox (mg N/m2, húmeda y seca) durante el año 1998 (Programa Cooperativo de Monitoreo y Evaluación de la Transmisión de los Contaminantes Atmosféricos de Largo Alcance en Europa: fuente EMEP). Los lugares de muestreo (parcelas permanentes de investigación del METLA y parcelas del Nivel II), son representados

donde, SD_{lh_dev} es la pendiente de la tendencia lineal en la ecuación (2); x_c , x_d , x_n , x_s , son los vectores de las variables que corresponden al clima (temperatura y precipitación), la deposición (nitrógeno), factores de la nutrición (contenido foliar en nitrógeno y fósforo) así como otras variables combinatorias (longitud, latitud, índice de vegetación), los β representan los coeficientes del modelo y ε es el término aditivo del error.

RESULTADOS

Las líneas de tendencia temporales de los cambios en el crecimiento en altura fueron determinadas. Junto con las líneas de tendencia de las variables respuesta, líneas de tendencia de las variables explicativas fueron calculadas (Ecuación 2). Los valores estimados, significativos, fueron dados. Un Modelo Lineal General (MLG) fue ajustado (Tabla 1 y figura 2). Las estimaciones de las desviaciones de crecimiento en altura de los lugares de pino silvestre son incrementadas en un +1.89% respecto de los lugares de picea noruega (Tabla 1). Los modelos de las desviaciones de crecimiento en altura mostraron un valor medio de 20.91% y 12.16% para el pino silvestre y la picea noruega respec-

tivamente (Figura 3), los incrementos en altura de las generaciones observadas tanto de la muestra de árboles de pino silvestre como de picea noruega son significativa y consistentemente mayores que las correspondientes a las referencias). Hay que tener en cuenta que algunos pequeños cambios en las series agregadas de los datos son debidos a desequilibrios, por ejemplo, a la diferencia en la longitud de solapamiento de edades entre la generación de árboles juveniles y adultos, el número de observaciones en los primeros años de las series temporales no es constante a lo largo del tiempo (Figura 3). Los rangos de los valores absolutos de $\Delta ih_{1960-2000}$ difieren también entre especies: la diferencia entre los valores máximo y mínimo es mayor para el pino silvestre, reflejando una heterogeneidad considerable en esta muestra. El coeficiente de variación relativo ($CV(\%) = (SD/\bar{x})/\sqrt{n} * 100$) de $\Delta ih_{1960-2000}$ es mayor en el pino silvestre (72.25 vs. 51.16) indicando que la precisión de la señal de la tendencia estimada en el crecimiento es menor para el pino silvestre que para la picea noruega. Los valores medios, considerada una edad fisiológica, fueron 24.72%, 10.28%. Los valores de desviación de crecimiento en altura de 20.91% y 12.16% implicaron un superávit de volumen de 32 % y 24% (100.4 y 85.1 m³ ha⁻¹).

Response: Sd_ih					
R-square	0.6246	Root MSE	1.0377		
Adj R-square	0.5813	C.V.	93.877		
Source	DF	SS	MS	F	Pr > F
Model	3	46.59	15.53	14.42	0.0000
Error	26	28.00	1.077		
Total	29	74.58			
Term	DF	Estimate	SE	T	Pr > t
Intercept	1	-0.145	0.727	-0.199	0.8435
Si_tem ¹	1	11.65	3.629	3.211	0.0035
Pa ²	1	-1.887	0.394	-4.790	0.0001
Ps ³	0	0	.	.	.
Si_Nred ⁴	1	285.4	86.3	3.308	0.0028

Tabla 1. Ecuación de regresión final (SAS regresión múltiple y ANOVA) utilizada para predecir las desviaciones del crecimiento en altura para el pino silvestre y picea noruega en Finlandia utilizando variables indicadoras (principalmente clima y deposición). La especie de árbol es incluida como variable dummy. Las estimaciones de las desviaciones de crecimiento en altura de los lugares potenciales de picea noruega son reducidos en un -1.89%. 1 Pendiente independiente de la temperatura para el período vegetativo (Mayo-Septiembre) (°C) año⁻¹. 2 Picea noruega. 3 Pino silvestre. 4 Pendiente independiente de la deposición de nitrógeno reducido (mg N/m²) year⁻¹

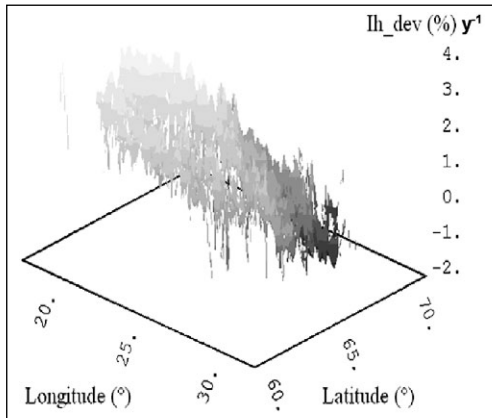


Figura 2. Desviación del incremento en altura medio modelado para el periodo 1960-2000

Los valores de 24.72%, 10.28% implicaron a su vez 38.8% y 20.2% (120.6 y 70.9 m³ ha⁻¹).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

He demostrado que el crecimiento en altura media anual, presenta una desviación positiva durante los últimos cuarenta años comparado con las referencias (generación antigua o tablas de producción). Este hallazgo general confirma los hallazgos resumidos por SPIECKER (1996). La tasa de aceleración del crecimiento en altura

en todas las muestras fue más o menos constante durante los últimos cuarenta años. Sin embargo, quisiera destacar un comportamiento diferente entre especies. El pino silvestre en Finlandia mostró una desviación negativa durante los primeros diez años (1960-1970), lo más probable debido a un efecto de manejo silvícola (regeneración natural de las generaciones juveniles). La picea noruega reaccionó tímidamente a las nuevas condiciones de crecimiento siendo para algunas parcelas de muestreo insignificante o incluso negativa.

Los resultados indican, que en un clima futuro más caluroso, un incremento en la disponibilidad de nitrógeno en condiciones boreales, combinado con una mayor duración del periodo vegetativo, puede incrementar considerablemente la producción forestal, independientemente de la fertilidad de los sitios y con la incertidumbre si las respuestas observadas son transitorias o de larga duración (STRÖMGREN & LINDER, 2002).

La calidad de estación ha cambiado, siendo el cambio más pronunciado para el pino silvestre que para la picea noruega. La tasa de crecimiento ha variado considerablemente de un lugar a otro, debido a las variantes condiciones micro climáticas, prácticas de manejo silvícola y procedencias del material (SPIECKER, 2003). El incremento en la temperatura del aire pudo estimular el incremento en la producción de biomasa en el fuste.

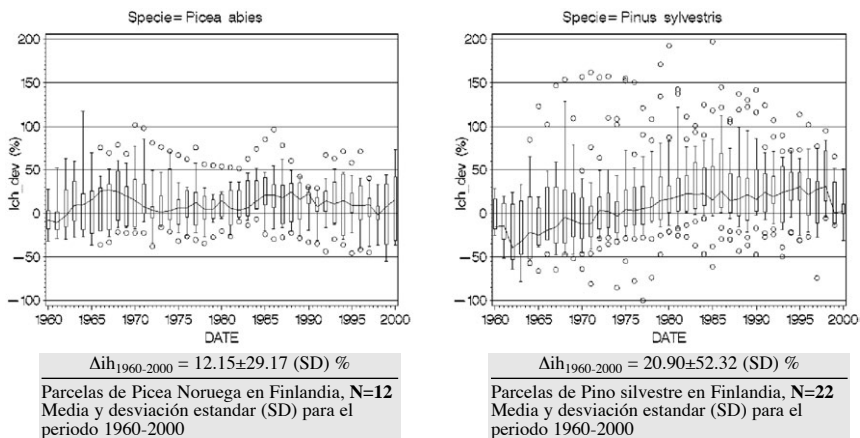


Figura 3. Gráficos Box y Whisker respecto a los modelos estacionales de las desviaciones de crecimiento en altura referidos a una edad biológica-cronológica

Un modelo estadístico espacial fue calculado; el modelo fue capaz de explicar una cantidad significativa de la variabilidad espacial de las desviaciones de crecimiento en altura de la picea noruega y del pino silvestre en Finlandia. Las superficies de desviación de crecimiento en altura y las tendencias seculares fueron representadas siguiendo un Modelo Lineal General (MLG) utilizando las deposiciones de nitrógeno y los cambios medios en la temperatura del aire. El efecto del calentamiento climático y el incremento en la disponibilidad de nitrógeno combinados con una mayor duración del periodo vegetativo pudo haber incrementado la productividad forestal en términos de crecimiento en altura, siendo más evidente en las zonas del suroeste que en las del noreste (gradiente de suroeste a noreste). Las estimaciones de las desviaciones de crecimiento en altura de los lugares potenciales de picea noruega son reducidos en un 1.89%.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Comisión Europea mediante el proyecto RECOGNITION, FAIR6-CT98-4124 y por el programa LGFG del Ministerio de Educación Alemán.

BIBLIOGRAFÍA

- ALEKSEEV, A. & SOROKA, A.R.; 2002. Scots pine growth trends in Northwestern Kola Peninsula as an indicator of positive changes in the carbon cycle. *Climatic Change* 55: 183-196.
- BECKER, M.; 1989. The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges Mountains of northeastern France. *Can. J. For. Res.* 19: 1110-1117.
- COOK, E.R. & KAIRIUKSTIS, L.A.; 1990. *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- DYER, M.E. & BAILEY, R.L.; 1987. A test of six methods for estimating true heights from stem analysis data. *For. Sci.* 33: 3-13.
- HALLENBARTER, D.; LANDOLT, W.; BUCHER, J.B. & SCHÜTZ, J.P.; 2002. Effects of Wood Ash and Liquid Fertilization on the Nutritional Status and Growth of Norway Spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Forstw. Cbl.* 121: 240-249.
- HASENAUER, H.; NEMANI, R.R.; SCHADAUER, K. & RUNNING, S.W.; 1999. Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria. *For. Ecol. Manage.* 122: 209-219.
- KAHLE, H.P.; SPIECKER, H.; UNSELD, R.; PÉREZ MARTÍNEZ, P.J.; PRIETZEL, J.; MELLERT, K.H.; STRAUSSBERGER, R. & REHFUESS, K.E.; 2003. Spatial variations and patterns in forest growth in relation to tree nutrition, temperature, water supply, and nitrogen deposition. In: Karjalainen T. & Schuck A. (eds.), *Causes and Consequences of Forest Growth Trends in Europe – Results of the RECOGNITION Project*.
- KARL, T.R.; KNIGHT, R.W. & PLUMMER, N.; 1995. Trends in high-frequency climate variability in the twentieth century. *Nature* 377: 217-220.
- KISHSCHUK, B.E.; WEETMAN, G.F.; BROCKLEY, R.P. & PRESCOTT, C.E.; 2002. Fourteen-year growth response of young lodgepole pine to repeated fertilization. *Can. J. For. Res.* 32: 153-160.
- LONG, R.P.; HORSLEY, S.B. & LILJA, P.R.; 1997. Impact of forest liming on growth and crown vigor of sugar maple and associated hardwoods. *Can. J. For. Res.* 27: 1560-1573.
- LUCHT, W.; PRENTICE, C.; MYNENI, R.B.; SITCH, S.; FRIEDLINGSTEIN, P.; CRAMER, W.; BOUSQUET, P.; BUERMANN, W. & SMITH, B.; 2002. Climatic control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect. *Science* 296: 1687-1689.
- MONSERUD, R.A.; MOODY, U. & BREUER, D.W.; 1990. A soil-site study for inland Douglas-fir. *Can. J. For. Res.* 20: 686-695.
- MYNENI, R.B.; DONG, J.; TUCKER, C.J.; KAUFMANN, R.K.; KAUPPI, P.E.; LISKI, J.; ZHOU, L. & ALEXEYEV, V.; 2001. A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests. *PNAS* 98: 14784-14789.
- MYNENI, R.B.; KEELING, C.D.; TUCKER, C.J.; ASRAR, G. & NEMANI, R.R.; 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature* 386: 698-702.

- PRIETZEL, J. & REHFUESS, K.; 1999. The RECOGNITION project. In: T. Karjalainen, H. Spiecker & O. Laroussinie (eds.), *EFI Proceedings*: 119-124. EFI. Joensuu.
- SCHMIDT, M.G. & CARMEAN, W.H.; 1988. Jack pine site quality in relation to soil and topography in north central Ontario. *Can. J. For. Res.* 18: 297-305.
- SPIECKER, H.; 2003. Silvicultural management in maintaining biodiversity and resistance of forests in Europe—temperate zone. *J. Env. Manage.* 67: 55-65.
- SPIECKER, H.; 2002. Tree rings and forest management in Europe. *Dendrochronologia* 20: 191-202.
- SPIECKER, H.; MIELIKAINEN, K.; KOHL, M. & SKOVSGAARD, J.P.; 1996. *Growth Trends in European Forests*. Springer-Verlag, Berlin.
- SPIECKER, H.; 1991. Liming, nitrogen and phosphorus fertilization and the annual volume increment of Norway spruce stands on long-term permanent plots in Southwestern Germany. *Fertilizer Research* 27: 87-93.
- SPIECKER, H.; 1990. Growth variation and environmental stresses: long-term observations on permanent research plots in Southwestern Germany. *Water, Air and Soil Pollution* 54: 247-256.
- STRÖMGREN, M. & LINDER, S.; 2002. Effects of nutrition and soil warming on stemwood production in a boreal Norway spruce stand. *Global Change Biol.* 8: 1195-1204.
- VAGANOV, E.A.; HUGHES, M.K.; KIRDYANOV, A.V.; SCHWEINGRUBER, F.H. & SILKIN, P.P.; 1999. Influence of snowfall and melt timing on tree growth in subarctic Eurasia. *Nature* 400: 149-151.
- VESTRENG, V.; 2001. *Emission data reported to UNECE/EMEP: Evaluation of the spatial distributions of emissions*. EMEP/MS-CW.
- WANG, G.G.; 1995. White spruce site index in relation to soil, understory vegetation, and foliar nutrients. *Can. J. For. Res.* 25: 29-38.
- WANG, G.G.; MARSHALL, P.L. & KLINKA, K.; 1994. Height growth pattern of white spruce in relation to site quality. *For. Ecol. Manage.* 68: 137-147.