

Secuestro de carbono en bosques – El papel del suelo

Robert Jandl, Centro de Investigación Forestal, 1131 Viena, Austria

Resumen

Los suelos forestales son los mayores depósitos de carbono en los ecosistemas terrestres. Contienen cuatro veces la cantidad de carbono que la vegetación. Por eso merecen atención cuando se buscan mecanismos del secuestro de carbono. Aumentar el nivel de C en el suelo podría ser un servicio ambiental precioso. El carbono del suelo se encuentra en la hojarasca, en el sistema radicular vivo y muerto, y el "carbono negro". En promedio, las moléculas orgánicas son mineralizadas en cuatro años; una parte de ellas es extremadamente recalcitrante y su tasa de mineralización es baja. La edad de esta fracción de la materia orgánica, ligada a óxidos y arcillas, es de algunos cientos a miles de años. Es necesario entender los procesos claves en el suelo y su relación con otros factores como la temperatura, la humedad del suelo, y los nutrientes (particularmente nitrógeno). Dado este entendimiento, es posible manejar los bosques de manera que fijen y conserven sosteniblemente carbono en el suelo, el cual se puede manipular mediante la selección de especies de árboles, la ordenación de bosques, con medidas de mejora de los suelos y por la duración del turno de los bosques.

1 Introducción

El contenido de CO₂ en la atmósfera aumenta cada año y, sin

duda, seguirá subiendo en el futuro. Según los sondeos hechos en el hielo antártico, la concentración del CO₂ oscilaba entre 180 y 280 partes por millón (ppm) durante los pasados 420.000 años, pero solamente en los pasados 50 años aumentó en 30 % para llegar a un nivel sin precedentes de 380 ppm (Petit *et al.*, 1999), datos en <http://cdiac.esd.ornl.gov/ftp/ndp001/maunaloa.co2>. Los temas 'clima del futuro' y 'consecuencias para la biosfera' pueden ser tratados de manera individual. Se acepta que el CO₂, como gas con efecto invernadero (GEI), cambia el clima mundial, pero las discusiones en los últimos años dejan como enseñanza que los procesos reguladores complican las predicciones sobre el clima futuro.

Los ecologistas forestales entienden bastante bien las consecuencias fisiológicas. La creciente oferta de carbono aumenta el intercambio de C entre la atmósfera y las plantas en un 15 % cada año y los bosques aún captan una gran parte de estas emisiones. El carbono en la biosfera terrestre está distribuido entre la atmósfera, la biomasa y el suelo; el 80 % del carbono en las plantas se encuentra en los árboles, y los ecosistemas forestales contienen el 40 % del carbono terrestre (Tabla 1). Desafortunadamente, solo el 10 % de estos bosques están ordenados (Dixon *et al.*, 1994). La cantidad de "carbono negro" en el suelo es igual a la suma del C contenido en los bosques y del bióxido de carbono en el aire. En consecuencia, los suelos forestales desempeñan un determinado papel en el ciclo de carbono.

No obstante, el papel de los bosques como moderador del ciclo biogeoquímico del carbono es mínimo, por lo que la solución óptima sería adoptar medidas para disminuir la

quemada de combustibles fósiles. Sin embargo, para los ecologistas, es un reto el definir las opciones que pueden ofrecerse para ayudar en los esfuerzos para mitigar los efectos adversos sobre nuestros recursos naturales. Recientemente, se han originado discusiones acerca de la manera en que los bosques pueden mitigar las consecuencias del cambio del clima, como resultado de la adopción de medidas silviculturales. Los bosques del mundo no tienen la capacidad de almacenar todo el C que se emite, pero tienen el potencial de retenerlo durante algunas décadas. ¡El sector forestal ofrece la opción de comprar tiempo!

El ciclo mundial de carbono se caracteriza por largos y variables flujos naturales entre la atmósfera, los océanos y la vegetación, comparativamente, este almacenamiento temporal es pequeño. En la actualidad, el 30 % del carbono emitido, "el carbono desaparecido", se disipa en los ecosistemas terrestres, pero no se sabe todavía cuánto tiempo se mantiene este secuestro de carbono, o si solamente es un efecto transitorio.

El ciclo de carbono necesita algunas claras definiciones para evitar malentendidos. La *productividad primaria bruta (PPB)* incluye todo el carbono asimilado. La *productividad primaria neta (PPN)* es el PPB menos la respiración de las plantas. La *productividad neta del ecosistema (PNE)* es la PPN menos la respiración del suelo, es decir la respiración de los microbios y las raíces; estos procesos son razonablemente regulares y se pueden predecir. Al final, la *productividad neta del bioma (PNB)* disminuye la PNE por pérdidas irregulares no-respiratorias como fuegos o talas (IGBP-TC-WG, 1998).

Si bien los inventarios forestales resultan efectivos para medir la biomasa por encima del suelo, es decir los troncos y el follaje en bosques uniformes, existe incertidumbre acerca de la medición de la biomasa debajo del suelo, esto es las raíces y los microorganismos. Además, a escala mundial, existen opiniones divergentes acerca de la definición de áreas de vocación forestal.

Aún cuando existiera consenso en este aspecto, aparecen otras dificultades: un problema serio es que no somos capaces de medir el C del suelo con precisión a causa de la enorme variabilidad espacial. La cuestión que surge en todos los

2 Relación entre productividad de bosques y los suelos forestales

El efecto fertilizante de CO₂ es conocido desde siempre. Se han obtenido muchas experiencias en proyectos de corta duración, pero existe menos conocimiento sobre árboles maduros. Estudios fisiológicos demuestran que el efecto fertilizante del CO₂ disminuye después de varios años (Körner, 2000); otro aspecto a considerar es la respuesta de la biomasa subterránea, las raíces, que se sabe aumenta si aumenta también la biomasa de los troncos.

Hay varios modelos geoquímicos que proyectan las consecuencias de

menor en solo algunas décadas (Cao & Woodward, 1998). Si se estabiliza el contenido de CO₂ en la atmósfera, la productividad neta del ecosistema bajará rápidamente.

3 La materia orgánica de los suelos forestales

El control más importante de la cantidad de materia orgánica en el suelo sigue siendo la erosión y la forma del manejo de la tierra; pero también tiene influencia el cambio de la vegetación. El carbono del suelo es un subsistema bastante complicado; hay componentes que son utilizados en horas, como los carbohidratos con energía abundante y partes oxidadas de los cuales los microorganismos no pueden captar casi ninguna energía.

Existen tres opciones de cómo el suelo forestal puede contribuir a la secuestro de C:

- crear nuevos sumideros de carbono = aforestación. Que es mejor porque los suelos agrarios contienen menos carbono que los suelos forestales.
- reducir la tasa de liberación de C. Hay circunstancias cuando el C recicla lentamente, como en suelos ácidos o húmedos o fríos.
- Mejorar los depósitos existentes mediante sistemas de ordenación.

El nitrógeno es el nutriente que limita frecuentemente el crecimiento de las plantas en ecosistemas terrestres. Experimentos en bosques boreales demuestran que el crecimiento de árboles responde bastante bien a la disponibilidad de CO₂ si hay disponible suficiente nitrógeno (Hättenschwiler & Körner, 1996). Muchos bosques en Europa central y en América del Norte siguen aumentando su productividad a causa de la fertilización de C y nitrógeno,

Tabla 1: Carbono presente en diferentes formas de vegetación y en los suelos a profundidad de 1 m; fuente: Reportaje del Panel Intergubernamental para Cambio Climático (IPCC), 1994.

	Área boscosa	Vegetación	Suelo	Suma
	[mil ha]	[Pg C]	[Pg C]	[Pg C]
Bosques tropicales	1755	212	216	428
Bosques templados	1038	59	100	159
Bosques boreales	1372	88	471	559
Sabanas tropicales		66	264	330
Pastos templados		9	295	304
Desiertos		8	191	199
Tundra		6	121	127
Áreas húmedas		15	225	240
Tierras de cultivo		3	128	131
Suma	4165	466	2011	2477

Pg C = pentagramos (10¹² gramos) de C

métodos que miden los cambios en depósitos de carbono, es que sean conservadores en caso de incrementos y sensitivos en caso de reducciones (Hamburg, 2000) para evitar el "carbono imaginado", que no tiene ningún efecto. Los conocimientos actuales sobre los procesos del carbono en el suelo son incompletos hasta ahora. Además, son frecuentemente desconocidos los datos químicos de los suelos a la profundidad de 1 metro.

crecientes concentraciones de CO₂ correspondientes (IS92A = aumento del CO₂ al doble de 1992) a la tasa de crecimiento de los bosques mundiales; según estos modelos, la fijación de C en la biomasa debe aumentar hasta alrededor del año 2030, después, desaparecerá el efecto fertilizante. Aunque estos resultados son poco seguros, queda claro que existe un límite para los bosques, porque el ciclo de C apunta al equilibrio entre la fotosíntesis (producción) y la respiración (Cramer *et al.*, 2001). Por eso el efecto fertilizante es transitorio. Debido al aumento de la respiración del suelo (por raíces y microorganismos) el efecto se hace

pero no es fácil separar estos efectos de las consecuencias del cambio en la silvicultura o de prolongados tiempos de crecimiento, o del modo en cómo la tierra es manejada (Spiecker *et al.*, 1996; Caspersen *et al.*, 2000). Con respecto al nitrógeno, existe la preocupación de que deposiciones largas conducen a la acidificación de los suelos a causa de la nitrificación, o que otros nutrientes se transformen en factores limitantes (Nihlgard, 1985; Aber *et al.*, 1998). Hasta ahora, son limitadas las indicaciones para este proceso; al contrario, el nitrógeno adicional solamente sube la productividad de los bosques tal como se ha demostrado en Suecia (Binkley & Högberg, 1997).

Si suben las tasas de crecimiento de los bosques, implica una demanda creciente de nitrógeno y un cambio en su ciclo geoquímico porque la biomasa contiene carbono y nitrógeno. Las deposiciones antropogénicas de N parecen suficientes según los estándares recientes, pero se espera que el N vuelva a limitar el crecimiento (Schimel, 1998). El efecto del nitrógeno depende también de su destino final en el suelo; si es filtrado por el suelo al agua freática, no tiene ningún efecto salvo que ensucia el agua. Si se queda en el sistema, puede ser fijado en la madera con una relación C:N de alrededor de 500 o en el suelo con relación C:N de alrededor de 30. El "nitrógeno leñoso" puede contribuir mucho más al almacenamiento de carbono que el del suelo, especialmente si la madera es utilizada para productos de mayor longevidad (Nadelhoffer *et al.*, 1999). El camino del nitrógeno en el suelo es a veces sorprendente; teóricamente, el tamaño del depósito potencial es pequeño, pero algunos experimentos demuestran que muchos suelos absorben grandes cantidades de nitrógeno.

4 La ordenación de bosques

La primera medida es mantener bosques, porque son el tipo de vegetación que contiene la máxima cantidad de carbono (Tabla 1). La deforestación baja la cantidad de C en las plantas y también en los suelos. Otro factor es el *tiempo de rotación*. Entre los conceptos más aceptados de la ecología forestal está la baja de la productividad por el aumento de la respiración. Además, es posible que las razones sean la producción de más raíces, que sustraen nutrientes y agua de la biomasa encima del suelo. Los bosques viejos retienen más carbono que las plantaciones. Este hecho fue demostrado en los árboles gigantes de Oregon, EEUU (Harmon *et al.*, 1990). Un estudio en un bosque de pinos en Siberia muestra que el recurso carbono sigue subiendo desde hace más de cien años; a esta edad, la biomasa encima del suelo ha llegado a su tamaño final desde hace mucho tiempo, pero el sistema radicular sigue creciendo (Schulze *et al.*, 2000).

La conservación de bosques viejos tiene un efecto sobre el secuestro de carbono que sobrepasa al de las aforestaciones. Este aspecto tendría que ser incluido en el propuesto contrato mundial que sigue al Protocolo de Kyoto. En contradicción con el "paradigma del equilibrio ecológico", el depósito de carbono aumenta en los bosques viejos; en ellos, hay más tiempo para que el carbono pueda moverse a depósitos estables a causa de la acumulación de carbono en el sistema radicular y carbono negro. Por eso, los futuros incentivos para los propietarios de los bosques para el almacenamiento de carbono en bosques, debe incluir recompensas para no alterarlos en vez de remunerar las re- y las aforestaciones. Fijar carbono es un valor razonable para el ser humano. El establecimiento de bosques intocables merece una compensación pecuniaria; desgraciadamente la propuesta

solamente trata de la aforestación, deforestación y reforestación, pero evita situaciones donde los bosques ya son manejados de modo sostenible. Muchas veces, la opción sería escoger tiempos de rotaciones largas a favor del clima.

En varios ecosistemas existe la opción de establecer árboles que fijen nitrógeno de la atmósfera. Bastante famosos son los estudios sobre alisos (*Alnus spp.*) en América del Norte y sobre *Albizia sp.* en Hawai (van Miegroet *et al.*, 1992; Ewers *et al.*, 1996). El proceso clave es aumentar la disponibilidad de nitrógeno y por eso aumentar la productividad. En sitios con fijadores de nitrógeno, el sumidero de C normalmente es más alto que en bosques sin ellos, incluso si la productividad de la biomasa encima del suelo es más baja.

4.1 Mejora de suelos

La restauración de suelos degradados tiene un gran valor para el secuestro de carbono; Incluso en los suelos agrarios hay 2 de 10 hectáreas de tierras degradadas que podrían almacenar todo el carbono de emisiones antropogénicas durante 25 y 50 años; muchas veces, las limitaciones tienen que ser salvadas antes, por ejemplo debido al déficit de nutrientes (Lal, 1999).

En Europa Central se encuentran muchos bosques degradados en el pasado a causa del uso de la tierra de modo explotador, hasta aproximadamente el año 1950. La consecuencia fue que en muchos sitios se hallan bosques que están lejos de la etapa climax. Con frecuencia hay pinos en lugares donde debe haber robles y hayas y otras especies caducifolias; allí, la hojarasca consiste en agujas que se pudren lentamente. En esta capa orgánica de los suelos hay grandes cantidades de carbono. La eutrofización de los sitios implica que estas capas son mineralizadas y pierden carbono, como en un ejemplo

de un bosque de pinos (*Pinus silvestris*) de 30 años (Tabla 2).

5 Influencia de la temperatura

La temperatura influye muchos procesos en relación al carbono: la productividad neta, la mineralización de nitrógeno, las especies presentes, la humedad del suelo, la cantidad y la calidad de la hojarasca y la respiración. Esta compleja red de interacciones causa que las predicciones sobre los efectos de procesos individuales sean inciertas. Ya que hay dos veces más carbono en el suelo que en la atmósfera, los cambios del contenido de C en el suelo afectan la concentración de CO₂.

Parece lógico que el aumento de la temperatura del suelo acelere los procesos microbiológicos. Como resultado, el saldo de los efectos de la creciente productividad se vuelve cero con la respiración del suelo. Existen claros gradientes geográficos, con los más altos sumideros de carbono en regiones frías; en latitudes altas, el ciclo de carbono es más lento que en regiones calientes (Davidson *et al.*, 2000; Liski & Westman, 1997). En realidad las relaciones entre la descomposición de la materia orgánica con otros factores son complejos y dependen en parte de la temperatura, pero también del contenido de agua en el suelo y de las características químicas de los suelos, del contenido de arcilla, de la actividad de la macrofauna y, muy particularmente, de las alteraciones entre ellos.

En relación a la temperatura, un estudio en base a 82 sitios en cinco

continentes no mostró la relación indicada, por lo que se concluye que la temperatura no figura como factor

pino (*Pinus sylvestris*) que tienen propiedades diferentes respecto al almacenamiento de carbono. Algunas

Tabla 2: La distribución de carbono entre los compartimentos 'biomasa' y suelo después de varios tratamientos de mejora de sitios. C [g/m²]

	Control	Suministro de Ca, N	Fijadores de N	Ambos tratamientos
Agujas	391,3	1.100,0	830,1	874,3
Madera	1.760,9	4.949,8	3.735,3	3.934,1
Hojarasca	5.572,0	2.040,0	2.300,0	3.600,0
Suelo 0-5cm	2.020,0	1.720,0	1.960,0	2.020,0
Suelo 5-10cm	1.150,0	1.109,0	1.230,0	1.320,0
Suelo 10-20cm	1.361,0	1.311,0	1.010,0	1.590,0
Suelo total	10.103,0	6.180,0	6.500,0	8.530,0
Total	12.255,2	12.229,8	11.065,4	13.338,4
Total % de control	100,0	99,8	90,3	108,8

limitante para la acción de los microorganismos, siendo más bien falta de un sustrato carbónico de enlaces débiles (Giardina & Ryan, 2000). Según esta teoría, la importancia del sector forestal puede ser considerable, porque se puede tener influencia en factores que no solamente son estimulados por el clima.

6 Medidas del secuestro de carbono en bosques de Europa Central

En Europa Central, la cobertura forestal es bastante grande y hay pocos lugares donde se hacen nuevas aforestaciones. Entre las opciones que se manejan está la selección de las especies de árboles; los árboles autóctonos que dominan los bosques en Europa Central son picea (*Picea abies*), haya (*Fagus sylvatica*), roble (*Quercus robur*), alerce (*Larix decidua*) y

de las características decisivas son: (1) en qué modo afecta la acidez del suelo, porque determina la actividad de los microorganismos y la velocidad del ciclo de nutrientes, (2) la tasa del crecimiento, porque es primeramente la productividad de los bosques la que define la cantidad de carbono en la biomasa, (3) la longevidad, determina cuánto tiempo el carbono puede residir en la biomasa y (4) la sostenibilidad del bosque, determina si el efecto intentado se efectúa con alta probabilidad. El stock de carbono (5) en la hojarasca y (6) en el suelo mineral, define el efecto instantáneo que se puede lograr en pocos años (Tabla 3).

Tabla 3: Características de árboles autóctonos en Europa Central en cuanto a factores que afectan el secuestro de carbono

	Acidez del suelo	Tasa de crecimiento	de Longevidad	Sostenibilidad	C en hojarasca	C en suelo mineral
Picea	↑	↑	↓	↓	↑	↓
Haya	↓	↓	↑	↑	↓	↑
Roble	↓	↓	↑	↑	±	±
Alerce	±	↓	↑	↑	±	±



Pino	↓	↓	↓	↑	↑	↓
------	---	---	---	---	---	---

↑ aumenta, ↓ disminuye el secuestro de carbono, ± factor indiferente.

Incentivos para el establecimiento de bosques de árboles caducifolios serían necesarios en Europa. La Figura 3 demuestra que especies diferentes de árboles difieren en aproximadamente el 20 % en la densidad de la madera y, en consecuencia, en el almacenamiento de carbono. En las regiones bastante pobladas, los bosques sirven para cumplir al mismo tiempo con muchas demandas. Los bosques son lugares de recreación, de purificación del agua, de protección de suelos y de pueblecitos de montaña y la producción de madera. Los bosques tienen una larga historia de manejo de modo sostenible. Uno de las pocas posibilidades para obtener "bonos de carbono" es elevar el potencial como sumidero de carbono de los bosques existentes y minimizar el riesgo de la producción forestal por medio de bosques extremadamente estables. El ejemplo de Austria demuestra que el depósito de carbono ya es largo (Tabla 4).

Muchas veces, los efectos de largos depósitos de carbono son complementarios con otros objetivos y recursos ambientales de la ordenación de bosques de modo sostenible: la protección del agua, de los suelos y la prevención de deslizamientos.

Bibliografía

Aber, John, McDowell, William, Nadelhoffer, Knute, Magill, Alison, Berntson, Glenn, Kamakea, Mark, McNulty, Steven, Currie, William, Rustad, Lindsey, & Fernandez, Ivan. 1998. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems. *Bioscience*, 48, 921–934.

Binkley, Dan, & Högberg, Peter. 1997. Does atmospheric deposition of nitrogen threaten Swedish forests? *Forest ecology and management*, 92, 119–152.

Tabla 4: Área de bosques y el depósito de carbono en bosques austriacos en el año 1990 (Weiss et al., 2000)

Característica	Cantidad	Unidades
Area boscosa	3,8 mill ± 46.000	hectáreas
Biomasa encima y debajo del suelo	320 ± 42	toneladas
Hojarasca + suelo mineral 0-50 cm	783 ± 190	toneladas

Cao, Mingkui, & Woodward, F. Ian. 1998. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 393, 249–252.

Caspersen, John P, Pacala, Stephen W, Jenkins, Jennifer C, Hurtt, George C, Moorcroft, Paul R, & Birdsey, Richard A. 2000. Contributions of land-use history to carbon accumulation in U.S. forests. *Science*, 290, 1148–1151.

Cramer, Wolfgang, Bondeau, Alberte, Woodward, F Ian, Prentice, I. Colin, Betts, Richard A, Brovkin, Victor, Cox, Peter M, Fisher, Verónica, Foley, Jonathan A, Friend, Andrew D, Kucharik, Chris, Lomas, Mark R, Ramankutty, Navin, Sitch, Stephen, Smith, Benjamin, White, Andrew, & Young-Molling, Christine. 2001. Global response of terrestrial ecosystem structure and function of CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, 7, 357–373.

Davidson, Eric A, Trombore, Susan E, & Amundson, Ronald. 2000. Soil warming and organic carbon content. *Nature*, 408, 789–790.

Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C., & Wisniewski, J. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263, 185–190.

Ewers, Brent, Binkley, Dan, & Bashkin, Michael. 1996. Influence

of adjacent stand on spatial patterns of soil carbon and nitrogen in *Eucalyptus* and *Albizia* plantations. *Canadian journal of forest research*, 26, 1501–1503.

Giardina, Christian P, & Ryan, Mark G. 2000. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature*, 404, 858–861.

Hamburg, Steven P. 2000. Simple rules for measuring changes in ecosystem carbon in forestry-offset projects. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 5, 25–37.

Harmon, Mark E., Ferrell, William K., & Franklin, Jerry F. 1990. Effects of carbon storage of conversion of old-growth forests to young stands. *Science*, 247, 699–702.

Hättenschwiler, Stephan, & Körner, Christian. 1996. System-level adjustments to elevated CO₂ in model spruce ecosystems. *Global Change Biology*, 2, 377–387.

IGBP-TC-WG. 1998. The terrestrial carbon cycle: implications for the Kyoto Protocol. *Science*, 280, 1393–1394.

Körner, Christian. 2000. Biosphere responses to CO₂ enrichment. *Ecological Applications*, 10, 1590–1619.

Lal, Rattan. 1999. World soils and the greenhouse effect. *IGBP newsletters*, 37, 4–5.

- Liski, Jari, & Westman, Carl Johan. 1997. Carbon storage in forest soils of Finland – 1. Effect of thermoclimate. *Biogeochemistry*, 36, 239–260.
- Nadelhoffer, Knute J., Emmett, Bridget A., Gundersen, Per, Kjønaas, O. Janne, Koopmans, Chris J., Schleppi, Patrick, Tietema, Albert, & Wright, Richard F. 1999. Nitrogen deposition makes a minor contribution to carbon sequestration in temperate forests. *Nature*, 398, 145–148.
- Nihlgard, B. 1985. The ammonium hypothesis - an additional explanation to the forest dieback in Europe. *Ambio*, 14, 2–8.
- Petit, JR, Jouzel, J, Raynaud, D, Barkov, NI, Barnola, JM, Basile, I, Benders, M, Chappellaz, J, Davis, M, Delaygue, G, Delmotte, M, Kotlyakov, VM, Legrand, M, Lipenkov, VY, Lorius, C, Pépin, L, Ritz, C, Saltzman, E, & Stievenard, M. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399, 429–436.
- Schimmel, David S. 1998. The carbon equation. *Nature*, 393, 208–209.
- Schulze, Ernst-Detlef, Wirth, Christian, & Heimann, Martin. 2000. Managing forests after Kyoto. *Science*, 289, 2058–2059.
- Spiecker, H., Mielikäinen, K., Köhl, M., & Skovsgaard, J.P. 1996. *Growth trends in Europe*. EFI Publications. Berlin: Springer.
- van Miegroet, H., Homann, P.S., & Cole, D.W. 1992. Soil nitrogen dynamics following harvesting and conversion of red alder and Douglas fir stands. *Soil Science Society America Journal*, 56, 1311–1318.
- Weiss, Peter, Schieler, Karl, Schadauer, Klemens, Radunsky, Klaus, & Englisch, Michael. 2000. *Die Kohlenstoffbilanz des österreichischen Waldes und Betrachtungen zum Kyoto-Protokoll*. Monographien 106. FBVA Umweltbundesamt.