

MODIFICACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA DE LLUVIA EN UN ECOSISTEMA MEDITERRÁNEO (monte de *Quercus pyrenaica*, Navasfrías, oeste español)

JUAN F. GALLARDO Y GERARDO MORENO*

RESUMEN

La lluvia es el primer proveedor de agua de los ecosistemas forestales. En las áreas de estación seca tiene gran importancia además al contabilizarse las entradas de bioelementos que se depositan como polvos atmosféricos durante la sequía y se disuelven parcialmente al inicio de la estación húmeda. Más tarde, las aguas de lluvia se enriquecen de bioelementos al atravesar el dosel arbóreo (aunque no siempre es así, puesto que algunos nutrientes pueden ser absorbidos en medios oligotrofos). Posteriormente, el agua atraviesa la hojarasca forestal en descomposición donde se producen intercambios de bioelementos, a veces con ganancias, a veces con pérdidas.

En algunos ecosistemas cobra importancia (por la alta concentración en bioelementos) el escurrimiento cortical, fracción hídrica que se concentra en el área de las raíces de los árboles.

Gran parte de los bioelementos que han enriquecido el agua de lluvia al alcanzar el epipedon edáfico son absorbidos en los primeros centímetros del suelo, por lo que la concentración de los mismos en el agua que circula por los macroporos edáficos disminuye al atravesar el horizonte superior. Por otro lado, la concentración de la solución edáfica que ocupa los microporos varía dependiendo tanto de la presión utilizada para extraer el agua, como también de la intensidad de la actividad vegetal.

Por último, parte del agua de drenaje profundo puede aflorar a la superficie para formar arroyos con una composición química generalmente similar al agua libre del suelo.

Para ilustrar toda esta dinámica se exponen la metodología y resultados obtenidos en un bosque (Monte Medio de unos 60 años) de rebollo (*Quercus pyrenaica* Willd.), situado en la Sierra de Gata (Sistema Central español) próximo a la frontera portuguesa (Barrera dos Foios, Navasfrías, Provincia de Salamanca); la pluviometría es cercana a los 1500 L m⁻² año⁻¹ con acusada sequía estival y la temperatura media anual próxima a los 11 °C. Son dominantes los esquistos, originándose *Cambisoles húmicos* (suelo forestal ácido poco evolucionado), sin que existan síntomas erosivos de importancia (pendientes entre el 5 y el 15%).

Palabras clave: Agua, lluvia, transcolación, escurrimiento cortical, agua libre, solución edáfica, macroporos, microporos, *Quercus pyrenaica*, clima mediterráneo.

SUMMARY

Rainfall is the first input of water in forest ecosystems. In areas with dry season, it is important to quantify the inputs of bioelements by bulk precipitation but also those inputs provoked by the atmospheric dusts, part of which could be dissolved during the rainy season (autumn and spring in Mediterranean areas).

* IRNA/C.S.I.C., Apartado 257, Salamanca 37071 (España). E-mail: <jgallard@gugu.usal.es>

Recibido: 31/07/98.
Aceptado: 07/04/99.

In general, the rain water is enriched by bioelements when it crosses the forest canopy (throughfall); nevertheless, sometimes it is possible to observe leaf absorption of some bioelements). There is also an element concentration because of the partial evaporation of the rain water at the canopy level (water interception). Both processes can exist together.

Later on, throughfall water leaches the forest litter, modifying the chemical composition. In some cases can also exist a superficial runoff, which is very low in the Mediterranean forest ecosystem studied. In addition, stemflow concentrates bioelements close to the trunk area.

When the leaching water moistens the soil, there is an exchange of bioelements that frequently drives to an impoverishment of the water solution owed to soil and plant bioelement-sorptions. In this way, the water solution is generally diluted when reaches the inorganic, deeper soil-horizon depth.

Also, soil pores hold water solutions that change their composition according to pore sizes.

A part of the water that crosses the soil can spring up, creating/lausing (more or less intermittent) streams; the composition of this water is quite similar to the soil solution at the deepest soil horizon.

To illustrate these dynamics and processes, the results obtained in an oak (*Quercus pyrenaica*) coppice located at Navasfrías ('Sierra de Gata', Western Spain) are shown and discussed. The forest plot has a mean annual pluviometry near 1500 L m⁻² yr⁻¹, a mean annual temperature close to 11 °C, and dominant soils are *humic Cambisols* on Palaeozoic schist; the slopes range from 5 till 15 % and the catchment area of the intermittent stream that drains the forest plot is about 20 ha.

Key words: Water, rainfall, water interception, throughfall, stemflow, runoff, soil water, evapotranspiration, soil solution, soil pores, *Quercus pyrenaica*, oaks, coppice, Mediterranean climate.

INTRODUCCIÓN

La lluvia es el primer proveedor de agua de los ecosistemas forestales; sin embargo, en las áreas de estación seca tiene gran importancia, cuando se contabilizan las entradas de bioelementos al ecosistema, también los polvos atmosféricos que se depositan durante la sequía y se disuelven parcialmente al inicio de la estación húmeda (MORENO *et al.* 1996b). Posteriormente, las aguas de lluvia se enriquecen de bioelementos al atravesar el dosel arbóreo (aunque no siempre es así, puesto que algunos nutrientes pueden ser absorbidos en medios oligotrofos; LIKENS *et al.* 1977; RAMBAL 1984). Posteriormente, el agua atraviesa la hojarasca forestal en descomposición, donde se producen intercambios de bioelementos, unas veces con ganancias, otras con pérdidas. En algunos ecosistemas cobra importancia (por la alta concentración en bioelementos) el escurrimiento cortical, fracción hídrica que se concentra en el área de las raíces de los árboles

(DUVIGNEAUD 1974). Gran parte de los bioelementos que han enriquecido el agua de lluvia al alcanzar el epipedón edáfico son absorbidos en los primeros centímetros del suelo, por lo que la concentración de estos bioelementos en el agua que circula por los macroporos edáficos disminuye al atravesar el horizonte superior (MORENO *et al.* 1996b). Por otro lado, la concentración de la solución edáfica que ocupa los microporos varía dependiendo tanto de la presión utilizada para extraer el agua, como también de la intensidad de la actividad vegetal (MENÉNDEZ *et al.* 1995). Por último, parte del agua de drenaje profundo puede aflorar a la superficie para formar arroyos (con una composición química en la zona de estudio generalmente similar al agua libre del suelo (VICENTE & GALLARDO 1998).

El objetivo del presente trabajo es exponer un ejemplo bien estudiado en el que se concreten las concentraciones de bioelementos en cada compartimento (o subsistema) teórico de un

ecosistema forestal, indicando la dinámica existente.

Se ha seleccionado una cuenca forestal conformada por un Monte Medio de rebollo (*Quercus pyrenaica* Willd.), de unos 60 años de edad, situado en la Sierra de Gata (Sistema Central español) y próximo a la frontera portuguesa (Barrera dos Foios, Navasfrías, Provincia de Salamanca, España). La pluviometría es cercana a los $1500 \text{ L m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ con acusada sequía estival y la temperatura media anual próxima a los $11 \text{ }^\circ\text{C}$. A partir de esquistos meteorizados se han originado *Cambisoles húmicos* (suelo forestal ácido poco evolucionado), sin que existan, en general en el área de estudio, síntomas erosivos de importancia (pendientes entre el 5 y el 15%). También se expone la metodología utilizada para la obtención de los resultados correspondientes.

Este ecosistema se supone característico del Oeste ibérico (poco antropozogenizado); el suelo se considera un subsistema de aquél.

MATERIAL Y MÉTODOS

Características de la zona de estudio

El área de estudio se encuentra en la vertiente norte de la «Sierra de Gata» (oeste español), a escasos kilómetros de la frontera portuguesa y lejos de cualquier área industrializada, por lo que se considera poco afectada por la contaminación industrial o urbana (figura 1). El Océano Atlántico se encuentra a poco más de 200 km hacia el oeste. El influjo antropozógeno es actualmente escaso, al ser considerada una comarca forestal de interés económico marginal, poseyendo escasa carga ganadera o aprovechamiento maderero.

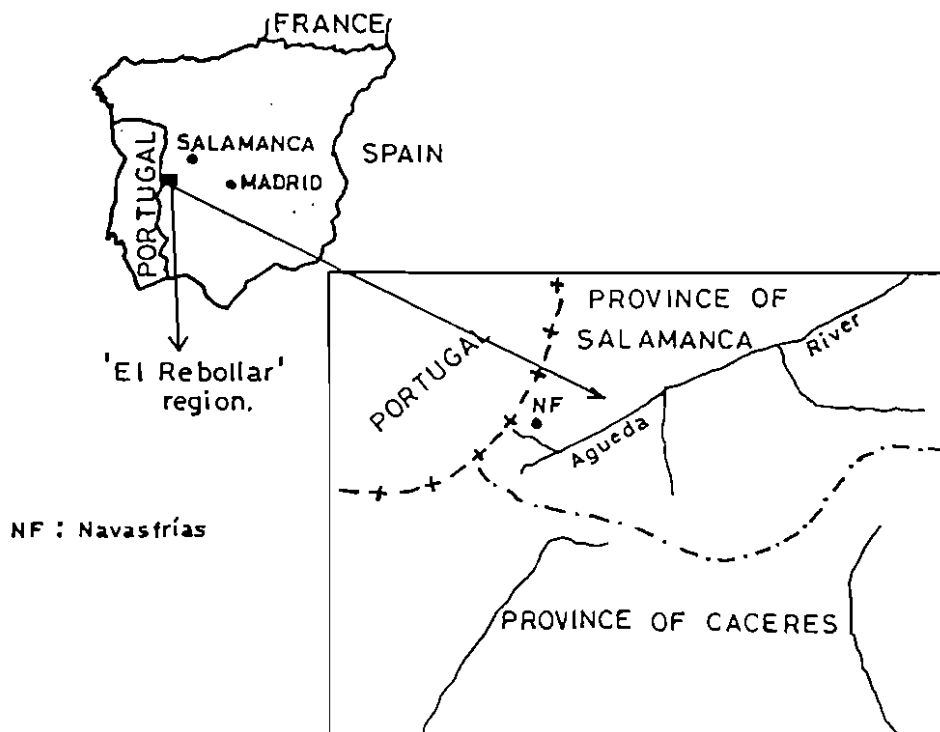


Fig. 1. Situación de la parcela forestal de Navasfrías (Provincia de Salamanca, España). [Location of the experimental forest plot of Navasfrías (province of Salamanca, Western Spain).]

La especie forestal dominante es el rebollo (*Quercus pyrenaica* Willd). Se ha seleccionado una parcela forestal, localizada en la Sierra de Gata' (40° 2' 40" N; 3° 0' 50" W, provincia de Salamanca, España), cercana a la localidad de Navasfrías (NF). En el área dominan los esquistos Paleozoicos (MENÉNDEZ *et al.* 1995).

El clima se puede considerar Mediterráneo húmedo (MORENO *et al.*, 1993), concentrándose la mayor parte de las lluvias en otoño y primavera, por lo que gran parte del periodo activo vegetal coincide con el periodo estival seco; ello ocasiona un déficit estival de humedad, variable de año en año, más en relación con la distribución de las lluvias que por la intensidad de éstas (MORENO *et al.* 1996a). La precipitación media anual es de 1580 L m⁻² año⁻¹ (observatorio de Navasfrías), mientras que la temperatura media anual es de 10.4 °C (figura 2).

Las más importantes características de la parcela forestal de NF se resumen en la tabla 1.

Suelos

Los suelos dominantes son los *Cambisoles húmicos* (F.A.O., 1989); localmente pueden aparecer *Leptosols húmicos* dependiendo de la posición topográfica (o intensidad de la erosión: fases de pendiente acusada). Algunas características físicas y fisicoquímicas aparecen en la tabla 2.

Son suelos ácidos con variación lateral en profundidad. La textura del epipedón suele ser franca, pero en profundidad se hace más limosa dependiendo del grado de alteración de los esquistos. La densidad aparente y la porosidad varía en función del contenido orgánico edáfico (GALLARDO *et al.* 1980a y 1980b), siendo éste en superficie alto (tabla 2). Sin embargo, la reserva de agua útil puede considerarse baja (media del 15% en superficie, aumentando generalmente poco más en profundidad).

Toma de muestras

Las muestras se tomaron mayoritariamente desde marzo de 1990 hasta septiembre de 1993.

TABLA 1
CARACTERÍSTICAS DE LA PARCELA FORESTAL DE NAVASFRÍAS (Provincia de Salamanca, España)

Forma del terreno circundante:	Montañoso.
Posición fisiográfica:	Ladera, parte media.
Pendiente:	Inclinado, 5-15 %.
Orientación:	Este.
Altitud:	960 m s.n.m.
Clima:	Mediterráneo húmedo.
Precipitación (media):	1580 L m ⁻² año ⁻¹
Temperatura (media):	11.4 °C.
Evapotransp. por. (media):	800 L m ⁻² año ⁻¹
Material original:	Complejo esquisto-grauváquico (Paleozoico, pizarras mosqueadas y grauvas).
Afloramientos rocosos:	Ocasionales.
Vegetación:	<i>Quercus pyrenaica</i> , <i>Pteridium aquilinum</i> , <i>Cytisus scoparius</i> , <i>Erica australis</i> , <i>Arenaria montana</i> , <i>Achillea millefolium</i> .
Uso:	Monte Bajo/Medio regular.
Influencia humana:	Limpieza cada diez años; última corta hace poco más de 30 años.
Densidad arbolado:	820 pies ha ⁻¹
Altura árbol (media):	13 m.
D.B.H. árbol (medio):	16.5 cm.
Índice foliar:	1.8 m ² m ⁻²
Área basimétrica:	15.63 m ² ha ⁻¹
Biomasa aérea:	64.53 Mg ha ⁻¹
Producción aérea (media):	2.60 Mg ha ⁻¹ , año ⁻¹

NAVASFRÍAS (EL REBOLLAR)

(Province of Salamanca, Spain)

(40° 17' 45" N; 6° 49' 12" W)

Plot ha.s.l.; 960m: Navasfrías ha.s.l.: 902m.

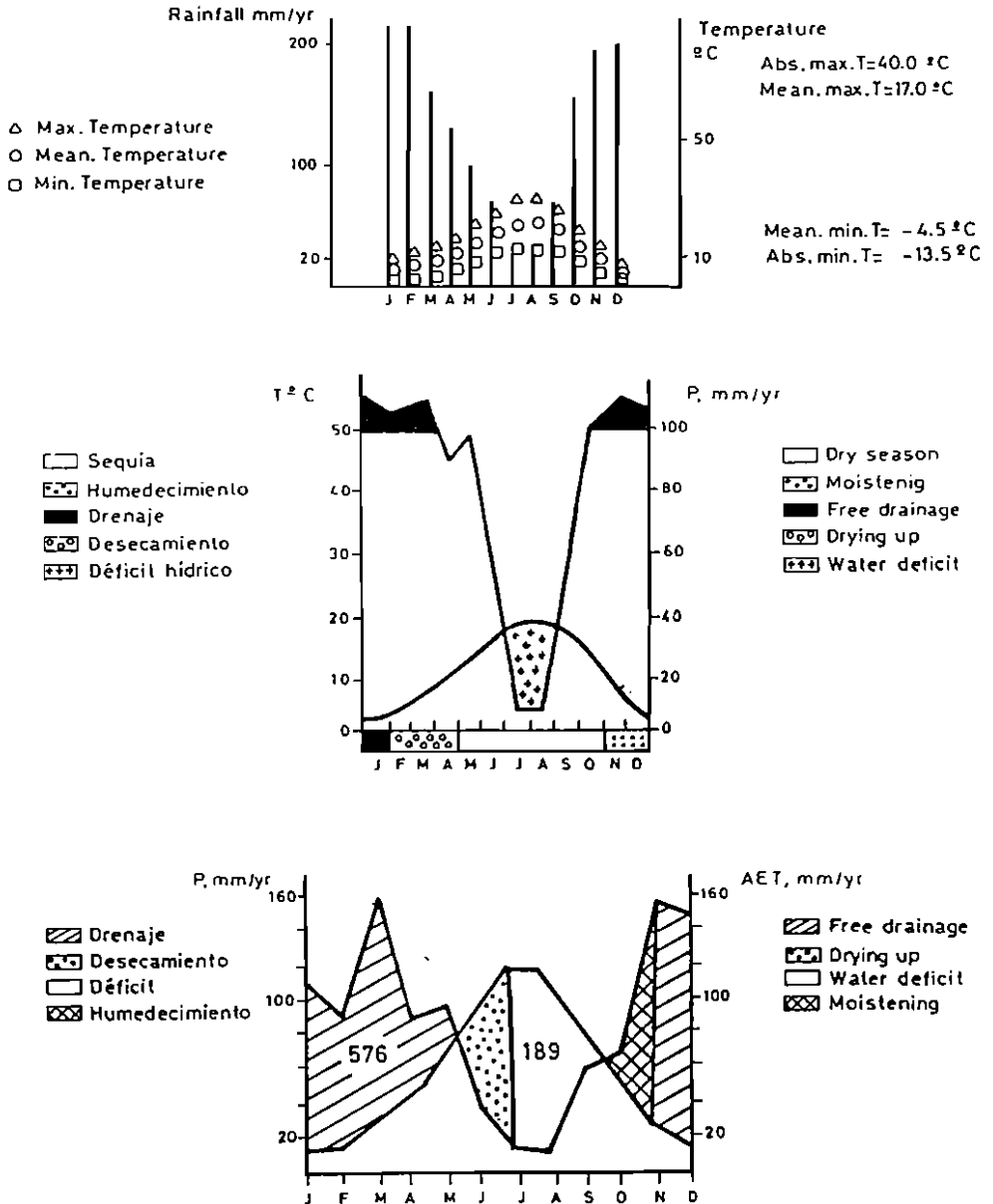


Fig. 2. Datos climáticos de Navasfrías (oeste español). [Climatic data of the Navasfrías village (Western Spain).]

TABLETA
PROPIEDADES FÍSICAS EDÁFICAS (granulometría)

NAVASFRIAS Horizontes	Gravas (%)	Arenagr. (%)	Arenaf. (%)	Limo gr. (%)	Limo f. (%)	Arcilla (%)	M. O. (%)
Perfil I							
Ah1	40	20	2	19	19	21	16.2
Ah2	45	16	3	21	25	19	12.4
BC	65	9	8	26	35	16	1.5
CR	29	9	12	27	30	16	0.4
Perfil II							
Ah1	17	9	3	16	32	17	18.3
Ah2	40	20	1	23	30	14	10.1
Bw	31	11	1	29	48	7	0.9
Perfil III							
Ah1	22	17	14	18	23	14	14.6
Ah2	59	11	13	21	28	17	7.3
C	44	18	17	23	25	13	1.0
CR	36	22	18	13	24	20	0.7

TABLETA
PROPIEDADES FÍSICAS EDÁFICAS (permeabilidad) y pH

NAVASFRIAS Horizontes	Permeabil. (mm/1h)	Permeabil. (mm/3h)	Permeabil. (mm/24h)	Permeabil. (mm/48h)	pH (H ₂ O)
Perfil I					
Ah1	307	158	7	3	4.8
Ah2	206	125	7	4	4.9
BC	225	121	17	12	5.1
CR	15	12	8	8	5.0
Perfil II					
Ah1	122	120	9	3	4.9
Ah2	280	191	17	6	4.8
Bw	154	62	17	13	5.0
Perfil III					
Ah1	148	146	166	11	5.1
Ah2	566	450	176	48	5.2
C	288	148	5	3	5.1
CR	91	51	11	8	4.9

TABLETA
PROPIEDADES FÍSICAS EDÁFICAS (porosidad y pF)

NAVASFRIAS Horizontes	d. real (g/cm ³)	d. apar. (g/cm ³)	Poros. total (% vol.)	Macropor. (% vol.)	micropor. (% vol.)	pF0 (% vol.)	pF1.0 (% vol.)	pF2.0 (% vol.)	pF2.7 (% vol.)	pF4.2 (% vol.)	Agua útil (% vol.)	pP/MP
Perfil I												
Ah1	2.26	0.80	64.6	24.9	39.7	112	105	58.1	39.7	27.4	12.4	1.6
Ah2	2.44	0.84	65.6	28.5	37.1	87.6	85.0	62.5	37.1	18.9	18.2	1.3
BC	2.71	1.14	57.9	33.3	24.6	50.4	47.3	36.5	24.6	8.1	16.5	0.7
CR	2.65	1.45	45.3	23.2	22.1	43.9	40.6	32.5	22.1	7.9	14.1	1.0
Perfil II												
Ah1	2.27	0.59	74.0	27.4	46.6	117.6	114	73.3	46.6	24.9	21.7	1.7
Ah2	2.41	0.83	65.6	23.6	42.0	91.8	90.0	70.5	42.0	16.7	25.3	1.8
Bw	2.71	1.09	59.8	29.2	30.6	47.1	44.8	38.4	30.6	8.7	22.0	1.1
Perfil III												
Ah1	2.41	0.66	72.6	38.3	34.3	85.8	80.5	48.2	34.3	18.2	16.1	0.9
Ah2	2.48	0.73	70.6	37.1	33.5	72.9	70.1	49.3	33.5	13.5	20.0	0.9
C	2.60	0.92	64.6	38.5	26.2	52.1	50.8	38.0	26.2	9.8	16.4	0.7
CR	2.67	1.20	55.1	29.7	25.4	50.9	47.9	35.6	25.4	10.5	14.8	0.9

Sobre el dosel arbóreo. Se colocaron tres pluviómetros, más otros tres provistos de pantallas aerodinámicas que recogían también polvos atmosféricos, todos ellos de polietileno (MILLER & MILLER 1980).

Bajo los árboles. Se dispusieron 12 lisímetros al azar dentro de la parcela forestal para recoger los pluviolavados. Otras 12 espirales se colocaron en los troncos de los árboles teniendo en cuenta las

clases diamétricas con el fin de recoger el agua de escurrimiento cortical (CAPE *et al.* 1991).

Sobre y en el suelo. Se colocaron 6 cajas de Gerlach (dos por cada perfil edáfico) para recoger el agua de escorrentía (SALA 1988), otros 6 lisímetros (dos por cada perfil) a una profundidad de 20 cm para recoger el agua que drenaba del horizonte húmico, y otros 6 entre los 60 y 100 cm (dependiendo de la profundidad y morfología

de cada perfil) para recoger el agua de drenaje edáfico.

Todos los lisímetros fueron construidos de PVC inerte. Las muestras de agua recogida se filtraron con fibra de vidrio.

La evolución de la humedad edáfica fue seguida mediante una sonda de neutrones, cada 20 cm de profundidad, disponiendo para ello de 12 tubos permanentes de accesos en el suelo (cuatro alrededor de cada perfil); las determinaciones de calibración de la humedad edáfica fueron realizadas mediante simple gravimetría (VA-CHAUD *et al.* 1977).

Para el balance total del agua se utilizó la siguiente ecuación (RAMBAL 1984; JOFFRE & RAMBAL 1993):

$$dS/dt = Bp - (AET + Sr + D)$$

siendo S la humedad del suelo, Bp la pluviometría, AET la evapotranspiración real, Sr la escorrentía superficial y D el drenaje edáfico profundo (debajo de la zona radicular).

Se ha considerado igualmente el agua interceptada (Int) por el dosel arbóreo.

El volumen de agua se midió tras cada lluvia, recogándose para su posterior análisis químico.

Solución edáfica. La solución edáfica se obtuvo mediante lisímetros de tensión con cápsula de porcelana (*Soilmoisture*), con una succión de -0.8 MPa, a diferentes profundidades (15, 25, 30, 60 y 90 cm; MENÉNDEZ *et al.* 1994), durante 15 días en la época húmeda del suelo (noviembre-julio). Se filtraron a través de lana de vidrio y se analizaron antes de 48 h de la toma de muestra. No se determinaron P ni amonio debido a las adsorciones de la cerámica (MENÉNDEZ 1995).

Procedimientos analíticos químicos

El pH del agua se midió con un pHmetro (Beckman), mientras que el C orgánico disuelto (DOC) en un analizador de Carbono orgánico (T.O.C.A., Varian), inmediatamente después de la llegada del agua al laboratorio (mismo día de la toma de muestra).

El Na y el K se analizaron por espectrometría de emisión; Ca y Mg mediante espectrometría de absorción (E.A.A., Varian); Fe, Mn y Al por Plasma (I.C.P., Perkin Elmer).

El anión $H_2PO_4^-$ se determinó mediante el método colorimétrico del azul de Molibdeno; Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} y NH_4^+ por cromatografía iónica (Dionex).

Un análisis completo del agua se realizó una vez cada semana en el periodo de lluvias o con agua edáfica.

Flujos de nutrientes

Los flujos de nutrientes se calcularon multiplicando el contenido medio de nutrientes ($mg L^{-1}$) por la correspondiente cantidad de agua ($L m^{-2}$), bien medida (Bp, Sr) o bien calculada (D).

Los cálculos del balance de nutrientes (entradas menos salidas) se hicieron utilizando la ecuación (LANKANI & MILLER 1980; MORENO 1994; MORENO *et al.* 1996b):

$$GL = (Bp + Dd) - (Sr + D)$$

siendo Dd la deposición seca (los demás símbolos ya son conocidos) y GL las ganancias o pérdidas, de acuerdo con el signo resultante.

A su vez ésta Dd fue calculada:

$$Dd = (Tf + Sf) - (Bp + CE)$$

siendo Tf el agua transcolada, Sf el escurrimiento cortical, y CE (el intercambio iónico del dosel arbóreo, según el signo positivo o negativo, señala lavado o absorción).

La deposición por aerosoles (Ad) se puede estimar mediante la ecuación siguiente:

$$Ad = Fg - Bp$$

siendo Fg el agua recogida en el lisímetro con captadores de polvos atmosféricos y Bp el agua recogida en el lisímetro normal (pluviometría).

Tratamientos estadísticos

Se realizaron análisis de la varianza (ANOVA), junto con su posterior contraste (prueba de

Tukey), para detectar las diferencias entre fechas de toma de muestras u origen de éstas, para igual probabilidad (cuando no se dice nada en contra, $p < 0.05$). Se utilizaron regresiones para la búsqueda de correlaciones; los resultados se expresaron mediante el coeficiente de regresión (r), indicando el nivel de significancia (p) y el número de muestras (n).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Balance hídrico

El factor pluviometría es muy decisivo en la dinámica de los ecosistemas mediterráneos. En las figuras 2 y 3 podemos observar que el periodo lluvioso alcanza desde octubre a mayo, con dos zonas: la primera bien definida desde octubre a febrero, y otra, más variable en intensidad y tiempo, de marzo a mayo. Obviamente, la composición del agua de lluvia tiene gran influencia en el ciclo biogeoquímico del ecosistema (GODT *et al.* 1986).

El agua trascola a través del dosel arbóreo (pluviolavados) o discurre por los troncos de los árboles (escurrimiento cortical), en ambos casos enriqueciéndose en bioelementos (aunque también puede existir una absorción o intercambio, principalmente en las hojas; POTTER *et al.* 1991). Parte del agua es evaporada antes de llegar al suelo (intercepción hídrica). No obstante, la fracción mayor llega a mojar el suelo, aumentando la humedad de éste (reserva hídrica). La

figura 3b muestra cómo cambia la humedad edáfica durante los años 1990-93.

Variación interanual

La figura 3a o la tabla 3 muestran la amplia variación de las lluvias de un año a otro, por lo que las cantidades hídricas puestas en circulación oscilan significativamente cada año (tabla 4), variando el agua puesta a disposición de las plantas (evapotranspiración real; tabla 5). Téngase en cuenta que la AET depende en gran medida de la lluvia del periodo mayo-junio; por ello, MORENO *et al.* (1996a) encontraron que las peculiaridades anuales afectaban por igual a una misma región, aunque existan diferencias en lluvia total recibida.

Distribución anual

a) *Intercepción.* El porcentaje de agua interceptada en el área de estudio fue baja (alrededor del 15%); AUSSENAC (1980) y MORENO *et al.* (1996a) aducen que ello es debido a que los árboles están sin hojas cuando la lluvia es más abundante (periodo invernal). Estos últimos autores han calculado que la intercepción sólo representa poco más del 25% del agua evapotranspirada.

b) *Escurrimiento cortical.* El volumen de escurrimiento cortical es muy bajo (generalmente no

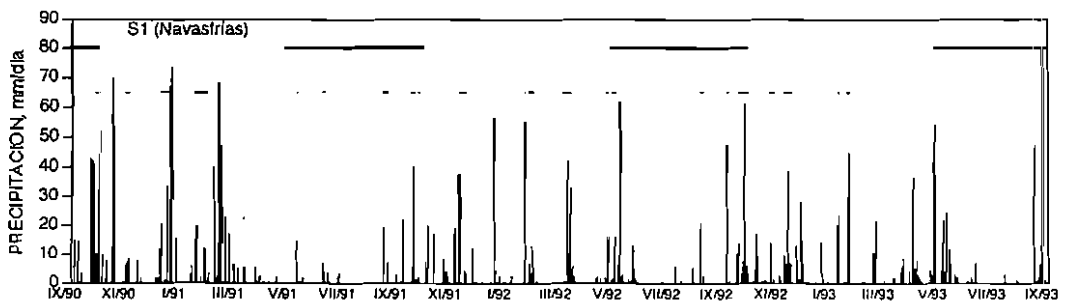


Fig. 3a. Precipitación diaria en Navasfrías durante el periodo 21/IX/1990 al 20/IX/1993 (la línea continua superior indica el periodo vegetativo del rebollo). [Daily rainfall of Navasfrías during 1990/9/21 to 1993/9/20 (a line at the upper part means the length of the period of tree activity).]

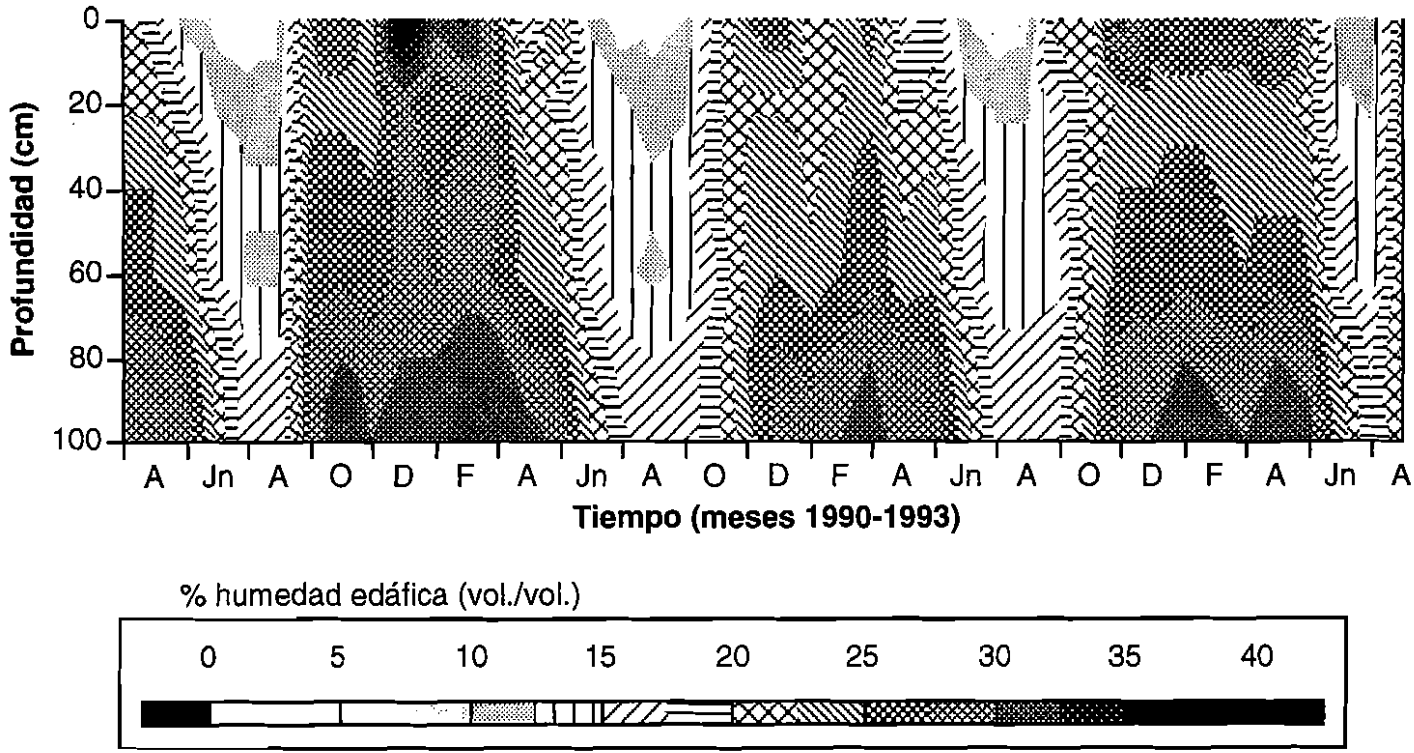


Fig. 3b. Evolución de la humedad del suelo durante 1990-1993 (en porcentaje volumétrico). [Evolution of soil water content along 1990-1993 (expressed in percentage vol./vol.).]

TABLA 3
REPARTO DE LA PLUVIOMETRÍA DURANTE
TRES AÑOS (1990-93)

Periodo	Pluviometría L m ⁻² (año ⁻¹)
<i>Media de series (m² año⁻¹)</i>	1580
Primer trimestre	623
Segundo trimestre	254
Tercer trimestre	137
Cuarto trimestre	566
<hr/>	
<i>III/1990-III/1991</i>	1078
enero-marzo/90	254
abril-junio/90	165
julio-septiembre/90	88
octubre-diciembre/90	500
<hr/>	
<i>III/1991-III/1992</i>	852
enero-marzo/91	665
abril-junio/91	47
julio-septiembre/91	77
octubre-diciembre/91	231
<hr/>	
<i>III/1992-III/1993</i>	858
enero-marzo/92	226
abril-junio/92	255
julio-septiembre/92	86
octubre-diciembre/92	312

supera los 10 L m⁻² año⁻¹; tabla 4) debido a que, en el rebollo, la disposición de las ramas es casi de 90° en relación al tronco (MORENO 1994); valores inferiores al 1 % de la pluviometría total han sido también encontrados por PARKER (1983) y VAN BREEMEN *et al.* (1989) en árboles similares, encontrándose cifras muchos más altas en árboles de diferentes formas (BELLOT 1989). MORENO *et al.* (1996a) encontraron una correlación significativa ($p < 0.01$) entre el escurrimiento cortical y la pluviometría total.

c) *Escurrimiento superficial*. El volumen de la escurrimiento superficial fue también muy bajo (inferior al 1% de la pluviometría total; tabla 5); ello es debido a la buena permeabilidad del suelo (tabla 2; MORENO *et al.* 1996a), sin que existan pendientes acusadas (tabla 1), ni tampoco capas endurecidas por debajo del epipedón edáfico (RAMBAL 1984; Francis & THORNES 1990; SOLER & SALA 1992).

d) *Drenaje profundo*. Los valores encontrados varían ampliamente, dependiendo, como es obvio,

TABLA 4
REPARTO DEL AGUA DE LLUVIA
(en mm/año y porcentaje)

Reparto del agua de lluvia	Unidades	1990-91	1991-92	1992-93	Media
Lluvia total	L m ⁻² año ⁻¹	1307	777	1086	1057
Trascolación	L m ⁻² año ⁻¹	1154	621	911	895
	%	88.3	80.0	83.9	84.7
Intercepción	L m ⁻² año ⁻¹	144	147	163	151
	%	11.0	18.9	15.0	14.3
Escurrimiento cortical	L m ⁻² año ⁻¹	9.1	8.5	11.9	9.5
	%	0.7	1.1	1.1	0.9

TABLA 5
BALANCE HÍDRICO EN EL ECOSISTEMA FORESTAL
DURANTE TRES AÑOS (NF)

NAVASFRÍAS (años)	Flujos de agua (L m ⁻² año ⁻¹)	(%)	
1990/91	Precipitación	1306	100
	Intercepción	144	11
	Escurrimiento sup.	2.1	0.2
	Drenaje profundo	868	66
	Otros	16	1.2
(21/IX-20/IX)	Evapot. real	408	31
	Evapot. potencial	817	(Cálculo)
1991/92	Precipitación	777	100
	Intercepción	147	19
	Escurrimiento sup.	4.0	0.5
	Drenaje profundo	212	27
	Otros	49	6.3
(21/IX-20/IX)	Evapot. real	506	65
	Evapot. potencial	806	(Cálculo)
1992/93	Precipitación	1086	100
	Intercepción	163	15
	Escurrimiento sup.	6.0	0.6
	Drenaje profundo	404	37
	Otros	54	5.0
(21/IX-20/IX)	Evapot. real	525	48
	Evapot. potencial	753	(Cálculo)

de la pluviometría total invernal (tabla 5); MORENO *et al.* (1996b) encontraron la siguiente correlación para la comarca de estudio:

$$D = 0.98 * Bp - 521 \quad (r = 0.93)$$

lo cual indica que para la cuenca en estudio es difícil que exista drenaje profundo a menos que llueva, como mínimo, alrededor de 525 L m⁻² (cifra que se puede considerar la máxima capaci-

dad de retención hídrica de los suelos en estudio). El volumen medio recogido en los lisímetros de profundidad durante los años de estudio fue de 450 L m⁻² año⁻¹, lo cual significa que más de la mitad del agua total llovida fue evaporotranspirada, dada la baja pluviometría que se detectó entre 1990 y 1993 (tabla 3).

e) *Evapotranspiración*. El valor medio de la evapotranspiración potencial (PET) de NF es aproximadamente 800 L m⁻² año⁻¹ (tabla 1), con fluctuaciones (según se dijo anteriormente); la AET es de 567 L m⁻² año⁻¹, y también varía ampliamente de año en año (tabla 5), dependiendo más de la forma de repartición de la lluvia que del total recibido (MORENO *et al.* 1996a); estos autores encontraron una correlación significativa entre la precipitación de los meses de mayo a julio y la AET ($r = 0.85$; $p < 0.001$). Más de la mitad de la precipitación se evaporotranspiró en el periodo 1990-93, pero hay que tener en cuenta que según la cantidad y distribución de las lluvias, la AET puede representar del 50 al 75 % de la PET, lo cual tiene fuerte repercusión en el balance hídrico, ciclo de bioelementos y productividad forestal.

Modificación de la composición hídrica

La composición química del agua de lluvia cambia desde el mismo momento que arrastra las partículas de polvo atmosférico (abundantes tras un periodo seco) y/o toca las hojas de los árboles, mucho antes de que el agua llegue al suelo (PARKER 1983). En este sentido, el bosque es un sistema abierto en el que continuamente existen entradas de bioelementos desde la atmósfera (ULRICH 1983). Por tanto, se puede distinguir entre entradas exógenas (atmosféricas) y redistribución interna (en el dosel arbóreo) aunque sea difícil distinguirlo en la práctica. Por ello, es más práctico repasar la composición de cada compartimento (tablas 6 y 7), esto es:

a) *Agua de lluvia*. La composición del agua de lluvia es variable, como es obvio; sin embargo una media ponderada indica un pH cercano a 5.4, con concentraciones superiores a 5 mg L⁻¹ de C orgánico (DOC) y a 1 mg L⁻¹ de cloruros. En general, las concentraciones se elevan en periodo seco (verano), debido al enriquecimiento que causan los polvos atmosféricos, aunque ese enriquecimiento ocasionado disminuye rá-

TABLA 6
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS (\pm error estándar)

Concentración (mg L ⁻¹)	Lluvia	Trascolación	Escurrim. cortical	Escorrentía superficial	Drenaje superficial	Drenaje profundo
pH	5.43±0.07	5.45±0.06	5.19±0.08	5.73±0.04	5.74±0.08	5.49±0.20
Conduct. (nS/cm)	15.2±1.7	24.3±3.5	71.8±14.0	48.9±7.2	35.2±3.9	27.4±2.9
C-DOC	6.4±0.6	9.9±2.0	62.3±15.5	48.8±6.7	21.0±3.4	8.4±2.3
Cl	1.50±0.12	1.85±0.33	3.73±1.07	3.07±0.42	3.09±0.86	2.81±0.47
N-NO3	0.10±0.03	0.12±0.03	0.08±0.03	0.35±0.05	0.11±0.04	0.15±0.04
N-NH4	0.21±0.08	0.20±0.03	0.28±0.07	0.61±0.25	0.47±0.23	0.18±0.15
N-total	0.31±0.11	0.32±0.06	0.36±0.10	0.99±0.30	0.58±0.27	0.33±0.19
P-H2PO4 (inog.)	0.014±0.003	0.05±0.02	0.04±0.01	0.13±0.03	0.011±0.004	0.011±0.001
P-H2PO4 (total)	0.04±0.01	0.08±0.03	0.09±0.02	0.22±0.05	0.04±0.01	0.04±0.02
S-SO4	0.54±0.10	0.53±0.10	2.32±0.5	0.91±0.20	1.27±0.24	0.99±0.38
Al	0.038±0.007	0.05±0.01	0.28±0.09	0.34±0.07	0.77±0.08	0.46±0.07
Ca	0.64±0.14	1.36±0.28	4.46±1.10	2.58±0.40	1.08±0.15	1.22±0.25
Mg	0.14±0.03	0.50±0.13	2.10±0.52	1.59±0.23	1.08±0.12	0.63±0.08
K	0.21±0.06	0.85±0.30	6.89±1.8	5.87±1.01	1.72±0.30	0.54±0.08
Na	0.48±0.06	0.53±0.07	1.43±0.30	0.73±0.07	1.02±0.22	1.06±0.17
Mn	0.009±0.003	0.05±0.02	0.22±0.07	0.18±0.05	0.03±0.01	0.09±0.03
Fe	0.010±0.002	0.03±0.01	0.06±0.01	0.12±0.02	0.04±0.01	0.08±0.01
Cu	0.004±0.001	1.36±0.28	0.03±0.01	0.003±0.001	0.002±0.002	0.001±0.000
Zn	0.16±0.04	0.19±0.05	0.03±0.03	0.03±0.01	0.08±0.02	0.011±0.002

TABLA 7
DIFERENCIAS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA ENTRE
AGUAS (un signo - significa dilución)

Bioelementos (mg L ⁻¹)	Tf-Pg	Sr-Tf	Ds - Sr	D-Ds
pH	0.02	0.28	0.01	-0.25
Conduct. (µS cm ⁻¹)	9.1	24.6	-13.7	-7.8
C-DOC	3.5	38.9	-27.8	-12.6
Cl	0.35	1.22	0.02	-0.28
N-NO ₃	0.02	0.23	-0.24	0.04
N-NH ₄	-0.01	0.41	-0.14	-0.29
N-total	0.01	0.67	-0.41	-0.25
P-H ₂ PO ₄ (inog.)	0.04	0.08	-0.12	0
P-H ₂ PO ₄ (total)	0.04	0.14	-0.18	0
S-SO ₄	-0.01	0.38	0.36	-0.28
Al	0.01	0.29	0.43	-0.31
Ca	0.72	1.2	-1.5	0.14
Mg	0.36	1.09	-0.51	-0.45
K	0.64	5.0	-4.2	-1.2
Na	0.05	0.2	0.29	0.04
Mn	0.04	0.13	-0.15	0.06
Fe	0.02	0.09	-0.08	0.04
Cu	1.36	-1.36	-0.001	-0.001
Zn	0.03	-0.16	0.05	-0.07

pidamente cuando la precipitación continúa (figura 4; MORENO 1994) y que le dan un carácter más continental (mayor concentración de Ca, K y NO₃); pero que luego disminuye a medida que aumenta el volumen de la precipitación); en general, en invierno las lluvias son netamente oceánicas, con predominio de Cl⁻ y Na⁺.

b) *Agua de transcolación.* El paso del agua de lluvia a través del dosel arbóreo significa automáticamente una concentración de bioelementos (debido a la intercepción o evaporación de parte de aquella), pero también una lixiviación de nutrientes provocadas en hojas y ramas. Así, la concentración iónica del agua de transcolación aumenta (tabla 6) significativamente al atravesar el dosel arbóreo, como se pone de manifiesto en los valores de la conductividad, y cationes (Ca, Mg y K); el P aumenta ligeramente. El S y el N modifican escasamente su concentración; respecto a este último, MORENO *et al.* (1996b) encontraron que la causa de la pequeña variación es la absorción de N por las hojas. Es interesante el relativo fuerte aumento del Cu, cuyo origen deben ser los polvos atmosféricos (MORENO 1994).

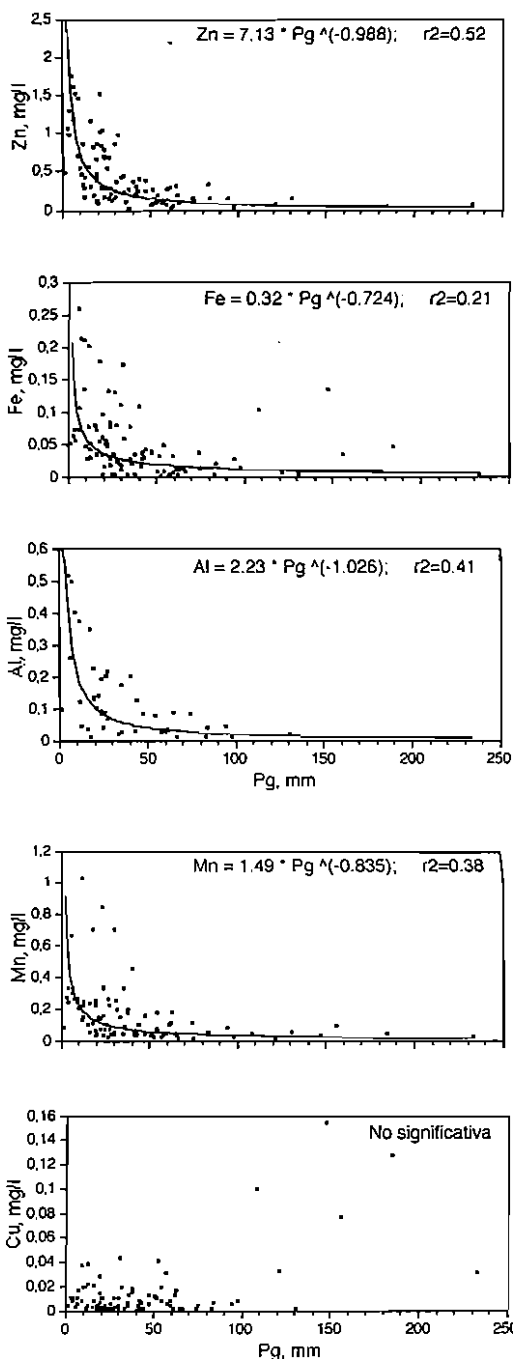


Fig. 4a. Evolución de las concentraciones de bioelementos con la intensidad de la lluvia. [Variation of the bioelement concentrations of the rainwater in relation to the rain intensity.]

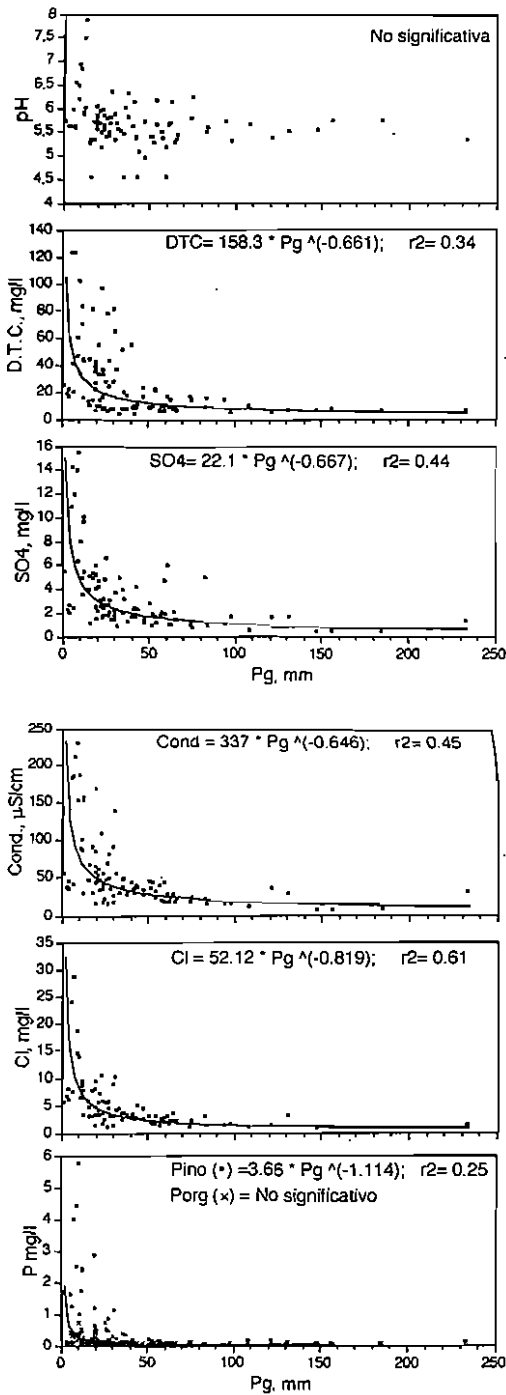


Fig. 4b.

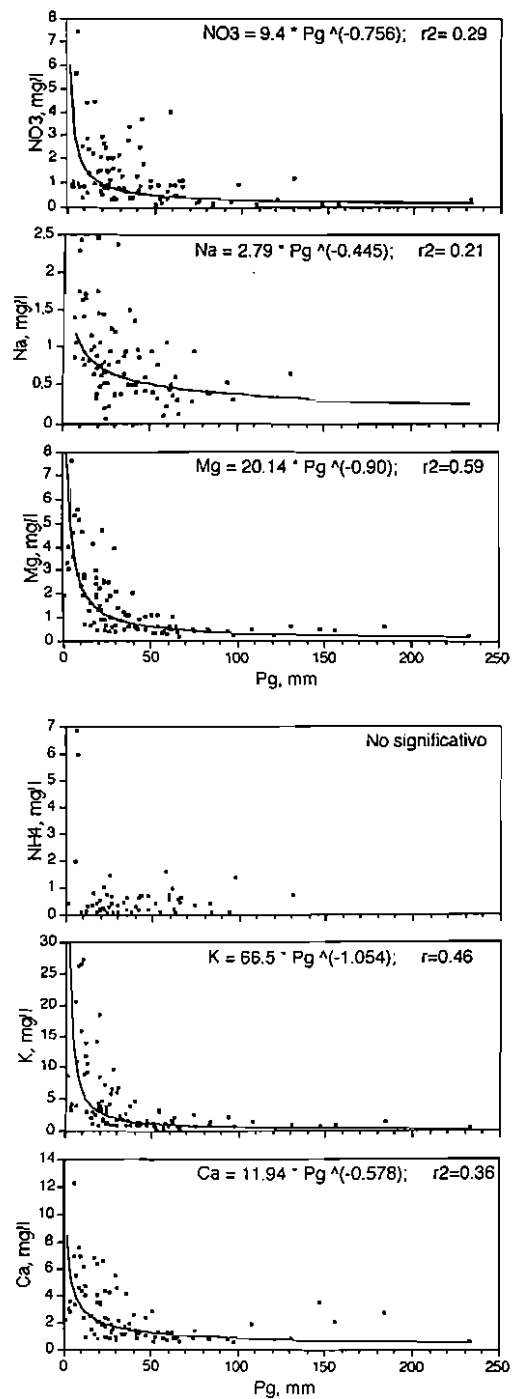


Fig. 4c.

c) *Agua de escurrimiento cortical.* En este caso, dado el mayor contacto, la lixiviación es más intensa como se observa en el fuerte aumento de la conductividad y el C orgánico (tabla 6); esta vez, además de los cationes C, Mg y K, también aumentan significativamente su concentración el Mg, Na y Al.

d) *Agua de escorrentía superficial.* El agua de escorrentía superficial discurre sobre el suelo, una vez atravesada la hojarasca existente sobre éste (más o menos permanente). Por tanto, puede también existir una lixiviación, o bien, un intercambio de nutrientes con la hojarasca en descomposición. El resultado es una pérdida catiónica notable (tabla 7), aunque la mineralización orgánica produce una liberación de N y P (MARTÍN *et al.* 1997) que se refleja en las concentraciones de estos bioelementos.

e) *Agua de drenaje superficial.* El agua que ha atravesado el epipedon (horizonte Ah) continúa perdiendo cationes y DOC por absorción radicular y/o adsorción por las micelas edáficas (TURRION *et al.* 1996). Por tanto se observa (tabla 7) una disminución de la concentración de Ca, K, Mg, DOC y P orgánico; por contra, continúa aumentando la concentración de Al y S, por lo que es previsible que se pierdan en el sistema, como se verá cuando se haga el balance final.

f) *Solución edáfica.* La solución edáfica va cambiando según la profundidad del suelo (tablas 8 y 9). El pH aumenta hacia los 30 cm, junto con la conductividad, lo cual indica que hay ganancias catiónicas; dicho máximo se refleja para la mayoría de los bioelementos. Este comportamiento ha sido observado en otros ecosistemas (STEVENS *et al.* 1989). El agua matricial a los 30 cm es similar al agua drenada a esa profundidad (Ds); la mayor diferencia estriba en la baja concentración de Al de la solución edáfica en relación al agua de drenaje libre. El incremento de la concentración de la solución matricial con la disminución de la humedad no es clara (MENÉNDEZ *et al.* 1995). Así, ambas han perdido gran parte del DOC debido a la intensa mineralización producida en superficie cuando el suelo está húmedo (MARTÍN *et al.* 1997).

g) *Agua de drenaje profundo.* El agua que llega al contacto con la roca y que previsiblemente pue-

de moverse lateralmente (en topografías colinadas) y alimentar los arroyos si las lluvias se hacen continuas, posee una concentración aniónica casi similar a la del agua de lluvia (tabla 6), por lo que podemos considerarla «limpia»; se diferencia de ésta en que ha aumentado relativa y significativamente su contenido en Al (diez veces), Mn (diez veces), Fe (ocho veces) y Mg (cuatro veces); incrementos menores se observan para Ca y K. Es notable observar que los relativamente altos contenidos orgánicos, de K, Ca y Zn, que poseyó en algún momento el agua del sistema, fueron absorbidos por los múltiples procesos que van ocurriendo en el flujo hídrico descendente.

TABLA 8
VALORES MEDIOS (± error estándar) DE PARÁMETROS DE AGUAS DE SUCCIÓN (-50 a -80 cb)

Composición (mg L ⁻¹)	Profundidad			
	15 cm	30 cm	60 cm	90 cm
pH	5.9 ±0.07	6.1 ±0.06	5.7 ±0.05	5.9 ±0.04
Conductividad (µS cm ⁻¹)	25 ±2	33 ±4	16 ±1	13 ±1
C-DOC	10.0 ±0.9	15.0 ±1.2	13.0 ±1.9	5.0 ±0.4
Cl	2.4 ±0.44	4.3 ±1.1	1.7 ±0.20	1.2 ±0.10
N-NO3	0.05 ±0.01	0.14 ±0.06	0.05 ±0.005	0.05 ±0.007
S-SO4	0.80 ±0.08	1.5 ±0.4	0.74 ±0.09	0.50 ±0.10
Si	3.0 ±0.4	6.1 ±1.1	3.0 ±0.6	2.0 ±0.2
Al	0.38 ± 0.02	0.21 ±0.02	0.11 ± 0.02	0.08 ± 0.01
Ca	1.0 ± 0.09	1.1 ±0.21	0.5 ±0.08	0.3 ±0.04
Mg	0.9 ±0.05	1.0 ±0.15	0.7 ±0.02	0.5 ±0.02
K	1.5 ± 0.14	1.7 ±0.23	0.8 ± 0.11	0.6 ± 0.08
Na	1.8 ± 0.16	2.4 ±0.36	1.8 ± 0.11	1.9 ± 0.15
Mn	0.07 ± 0.03	0.07 ±0.03	0.08 ± 0.02	0.05 ± 0.01
Fe	0.11 ± 0.02	0.12 ±0.04	0.06 ± 0.02	0.04 ± 0.01
Cu	0.001 ± 0.00	0.002 ±0.00	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00
Zn	0.79 ± 0.27	0.67 ±0.24	0.37 ± 0.12	0.27 ± 0.05

TABLA 9
DIFERENCIAS MEDIAS (pérdidas o ganancias, según signo, en mg L⁻¹) DE LA SOLUCIÓN EDÁFICA (M) A DIFERENTES PROFUNDIDADES (la de 15 cm respecto al agua de escorrentía superficial Es)

Diferencia composición aguas matriciales (mg L ⁻¹)	M 15 cm - Es	M 30 cm - M 15 cm	M 60 cm - M 30 cm	M 90 cm - M 60 cm
pH	0.2	0.2	-0.4	0.2
Conductividad (µS cm ⁻¹)				
C-DOC	-23.9	8.0	-17.0	-3.0
Cl	-0.7	1.9	-2.6	-0.5
N-NO3	-0.3	0.1	-0.1	0.0
S-SO4	-0.1	0.7	-0.7	-0.2
Si	N.d.	3.1	-3.1	-1.0
Al	0.0	-0.2	-0.1	-0.0
Ca	-1.6	0.1	-0.6	-0.2
Mg	-0.7	0.1	-0.3	-0.2
K	-4.4	0.2	-0.9	-0.2
Na	1.1	0.6	-0.6	0.1
Mn	-0.1	0.0	0.0	-0.0
Fe	-0.0	0.0	-0.1	-0.0
Cu	-0.0	0.0	-0.0	0.0
Zn	0.8	-0.1	-0.3	-0.1

Balance de nutrientes

Los valores de concentraciones no tienen un sentido globalizador si no se refieren a los volúme-

nes de agua puestos en movimiento (LIKENS *et al.* 1981); es obvio que volúmenes inferiores al 1 % de la pluviometría (caso de la escorrentías, tanto fustal como superficial; tablas 4 y 5) no deben considerarse por su escasa importancia dentro del sistema. El problema causado por la variabilidad de las lluvias se minimiza utilizando medias ponderadas (obtenidas mediante la multiplicación de cada fracción hídrica por su composición, para sumar luego todos los productos obtenidos).

La tabla 10 muestra los valores de las medias ponderadas de las entradas atmosféricas, diferenciando entre deposición húmeda (llegada con la precipitación, Bp) y seca (calculada, Dd), trascolación (Tc) y escurrimiento cortical (Sf). También se expresa el intercambio (CE) que sucede entre el agua de lluvia y el dosel arbóreo: normalmente ocurre una lixiviación de nutrientes, excepto cuando se indica con un signo menos, lo cual significa que existe absorción de ese nutriente, normalmente por ser escaso (como forma asimilable) en el sistema (MARTIN *et al.* 1997).

En la tabla 11 se exponen el total de entradas de bioelementos en el sistema (Bp+Dd), las pérdidas por escorrentía superficial (Sr, la cual es

TABLA 10
BALANCE ANUAL DE BIOELEMENTOS (deposición seca calculada: el signo - indica absorción)

«Bioelementos (kg ha ⁻¹ , año ⁻¹)»	Deposición con precipitación	Deposición seca	Trascolación	Escurrim. cortical	Intercambio (lixiviación o absorción)
C-DOC	67.5±7.0	1.5	90±18	6.3±1.6	28±24
H ⁺	0.038	0.05	0.041±0.01	0.001±0.000	-0.044
Cl	11.0±1.3	7.0	16.8±16.8	0.38±0.11	-0.82±1.1
N-NO3	1.06±0.34	2.6	1.09±0.32	0.007±0.000	-2.5±0.36
N-NH4	2.18±0.86	2.1	1.87±0.23	0.03±0.01	-2.4±0.34
N-total	3.2±1.2	4.7	2.95±0.55	0.04±0.01	-4.6±0.7
P-inorg.	0.14±0.03	0.31	0.49±0.21	0.004±0.001	0.04±0.19
P-total	0.42±0.09	0.32	0.69±0.26	0.009±0.002	0.11±0.19
S-SO4	5.8±1.0	0.80	4.9±0.9	0.23±0.05	-0.87±0.27
Al	0.41±0.07	0.02	0.44±0.09	0.028±0.010	0.29±0.13
Ca	6.8±1.4	4.3	12.3±2.5	0.45±0.11	1.7±1.6
Mg	1.5±0.3	0.7	4.5±1.2	0.21±0.05	2.5±0.7
K	2.2±0.6	1.7	7.7±2.7	0.7±0.18	2.8±1.1
Na	5.1±0.6	1.4	4.8±0.6	0.14±0.03	-1.6±0.6
Mn	0.09±0.03	0.09	0.42±0.13	0.022±0.007	0.26±0.12
Fe	0.10±0.02	0.14	0.26±0.09	0.006±0.001	0.02±0.04
Cu	0.04±0.01	0.03	0.25±0.10	0.003±0.001	0.18±0.10
Zn	1.65±0.45	0.26	1.70±0.42	0.03±0.003	-0.21±0.14

TABLA 11
BALANCE ANUAL DE NUTRIENTES (el signo - significa pérdidas)

Bioelementos (kg ha ⁻¹ , año ⁻¹)	Deposición total	Escurrentía superficial	Drenaje profundo	Suma	Pérdidas o ganancias
C-DOC	69.0	-2.0	-37.9	-39.9	29.2
H ⁺	0.09	0.0	0.0	0	0.1
Cl	18.0	-0.1	-12.7	-12.8	5.2
N-NO ₃	3.6	0.0	-0.68	-0.68	2.9
N-NH ₄	4.3	0.0	-0.86	-0.86	3.4
N-total	7.9	0.0	-1.6	-1.6	6.3
P-total	0.74	-0.01	-0.05	-0.06	0.6
S-SO ₄	6.0	0.0	-4.5	-4.5	1.5
Al	0.43	-0.01	-2.1	-2.1	-1.7
Ca	11.1	-0.1	-5.5	-5.6	5.4
Mg	2.2	-0.1	-2.9	-3.0	-0.8
K	3.9	-0.2	-2.4	-2.6	1.2
Na	6.5	0.0	-4.8	-4.8	1.7
Mn	0.18	-0.01	-0.39	-0.40	-0.21
Fe	0.25	0.00	-0.36	-0.36	-0.12

insignificante), el drenaje profundo (D) y el orden de pérdidas (o ganancias, según resulte un signo positivo o negativo) de bioelementos del ecosistema (GL).

a) *Deposiciones atmosféricas.* Aunque el cálculo de Dd sea sólo aproximado (MORENO *et al.* 1996b), los resultados indican que la deposición húmeda es mayor que la seca, al contrario que en otros sistemas mediterráneos con inferior pluviometría; la deposición total (Dd + Bp) suele ser del mismo orden que la que existe en la bibliografía (MORENO *et al.* 1996b). En general, la aportación por deposición atmosférica puede considerarse baja (VAN BREEMEN *et al.* 1989; BELILLAS & RODA 1991; TIETEMA & VERSTRATEN 1991), sobretudo para H⁺, S y N (definidores de las lluvias ácidas). Más importantes son para P y K, probablemente de origen local (MORENO *et al.* 1996b).

b) *Trascolación.* La trascolación (Tf) debe considerarse una mera transferencia dentro del sistema, ya que es el flujo de nutrientes que pasa desde la parte superior del dosel arbóreo, a éste o al suelo. Dentro de este flujo destacan por sus cantidades absolutas el C orgánico (ampliamente oscilante según la distribución de lluvias), Cl, Ca y K (tabla 10); con cantidades ya menos importantes aparecen el Na, Mg,

S, N y, sorprendentemente, el Zn. La composición descrita señala un origen de las aguas equilibrado entre marítimo y continental (MORENO 1994).

c) *Intercambio de bioelementos en el dosel arbóreo.* La tabla 10 expone dicho intercambio, ya que mientras que algunos nutrientes son absorbidos (N, S, Cl), otros se lixivian (K, Mg, P, DOC). La lixiviación es importante para el DOC, mientras que la absorción para el N total. MORENO *et al.* (1996b) encontraron que la intensidad de estos intercambios depende de la intensidad de la pluviometría anual, que a su vez también incide en la fertilidad del suelo (MARTIN *et al.* 1995), al existir más lixiviación y pérdidas de bases en los ecosistemas con lluvias invernales más intensas. Obviamente, ello también se manifiesta en la composición de la hoja de rebollo a lo largo del año (RICO *et al.* 1994; GALLEGO *et al.* 1994).

d) *Escurrentías cortical y superficial.* Dados los insignificantes volúmenes de estos flujos (tablas 10 y 11), la cantidad de bioelementos es despreciable frente a las cantidades totales puestas en juego en el ecosistema forestal.

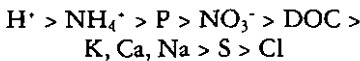
e) *Agua matricial.* Esta fracción hídrica no entra en el balance de nutrientes, ya que son meras transferencias dentro del sistema. MENÉNDEZ

(1995) demostró que la cesión de bioelementos por la alteración del roquedo en este ecosistema forestal es insignificante, a excepción de una reducida de alcalinos (Na, K).

f) *Drenaje profundo*. Dada la escasa cuantía de la escorrentía superficial (tabla 10), el drenaje profundo marca las pérdidas de bioelementos del sistema. El volumen de agua es ampliamente variable cada año (tabla 5), por lo que las pérdidas de bioelementos lo será también. En la tabla 11 se observa que para la media de años 1990-1993, se pierde casi 40 kg ha⁻¹ año⁻¹ de C orgánico, 13 de Cl, 5.5 de Ca, 4.5 de S y Na, y poco más de 2 kg ha⁻¹ año⁻¹ de Mg, K y Al.

g) *Ganancias o pérdidas netas*. Las pérdidas del sistema serán o no compensadas por las entradas, por lo que conviene hacer un balance para conocer las ganancias o pérdidas netas del ecosistema global. Para gran número de nutrientes, las entradas atmosféricas superan las pérdidas por el agua de drenaje (tabla 11), por lo que hay un incremento paulatino de bioelementos en el sistema (del orden de 29 kg ha⁻¹ año⁻¹ de C, 6.3 de N, 5.5 de Ca y poco más de 1 kg ha⁻¹ año⁻¹ para S, K y Na). Por el contrario, se observan leves pérdidas de micronutrientes. La pérdida de Mg (cerca de 1 kg ha⁻¹ año⁻¹) puede estar causada por su fuerte absorbancia por el árbol dada la acidez del suelo (pH próximos a 5.0, que ocasiona un desequilibrio nutricional del par Ca/Mg; MARTIN *et al.* 1995) y posterior liberación de la hojarasca.

Es interesante referir esas cantidades ganadas anualmente por el ecosistema en relación a las entradas anuales de nutrientes a éste (en %); el orden resultante sería el siguiente:



Si se desea hacer el balances de cationes y aniones para ver si finalmente se acidifica o no el medio, hay que expresar los resultados en equivalentes (BELILLAS & RODA 1991). Los resultados para NF indican que hay un enriquecimiento anual de bases, del orden de 0.24 keq ha⁻¹ año⁻¹ (cifras aún mayores se obtienen en ecosistemas más secos;

MORENO *et al.* 1996b). Esta entrada de bases es importante para la fertilidad de NF, dada la acidez edáfica (pH 5.1) y la baja relación molar Ca/Al existente (0.95; MENÉNDEZ *et al.* 1995) en las aguas de drenaje (con posible fitotoxicidad del Al, según ABRAHAMSEN 1983).

El desecamiento estival edáfico coadyuva también a que el balance sea positivo, a pesar del fuerte drenaje invernal (MORENO *et al.* 1996b), causante de la pérdida neta de Mg.

El enriquecimiento de N del ecosistema es importante cara a la fertilidad del sistema. También se constata que el P sufre la adsorción típica de suelos ácidos (TURRION *et al.* 1997).

Consideraciones finales

A lo largo de la exposición se ha podido constatar los cambios importantes sufridos por la composición de las aguas en el ecosistema estudiado pormenorizadamente y que se resumen en la figura 5 para el C-DOC, N y P disueltos. No se han tenido en cuenta en esta ocasión (por no considerarse objetivo del presente trabajo) todos los cambios de composición que sufre el agua intersticial del suelo, según el tamaño de poro que ocupe (o su potencial matricial; MENÉNDEZ 1995), ni las variaciones que pueda sufrir el agua que se libera como agua superficial (arroyos).

Obviamente, se necesitan estudios más intensos para conocer todas las transferencias hídricas y procesos químicos que se dan en ecosistemas con estación seca, en general, y mediterráneos en particular, teniendo en cuenta las variaciones temporales existentes.

AGRADECIMIENTOS

Los resultados de este trabajo pertenecen a los proyectos STEP, CAST/ENVIRONMENT, MED-COP/AIR y PROTOS/TERI de la Unión Europea, muchos de ellos publicados precedentemente. La parcela forestal fue cedida por la Junta de Castilla y León, habiéndose recibido también aportaciones económicas de la D.G.C.yT./MEC y C.I.C.yT./INIA.

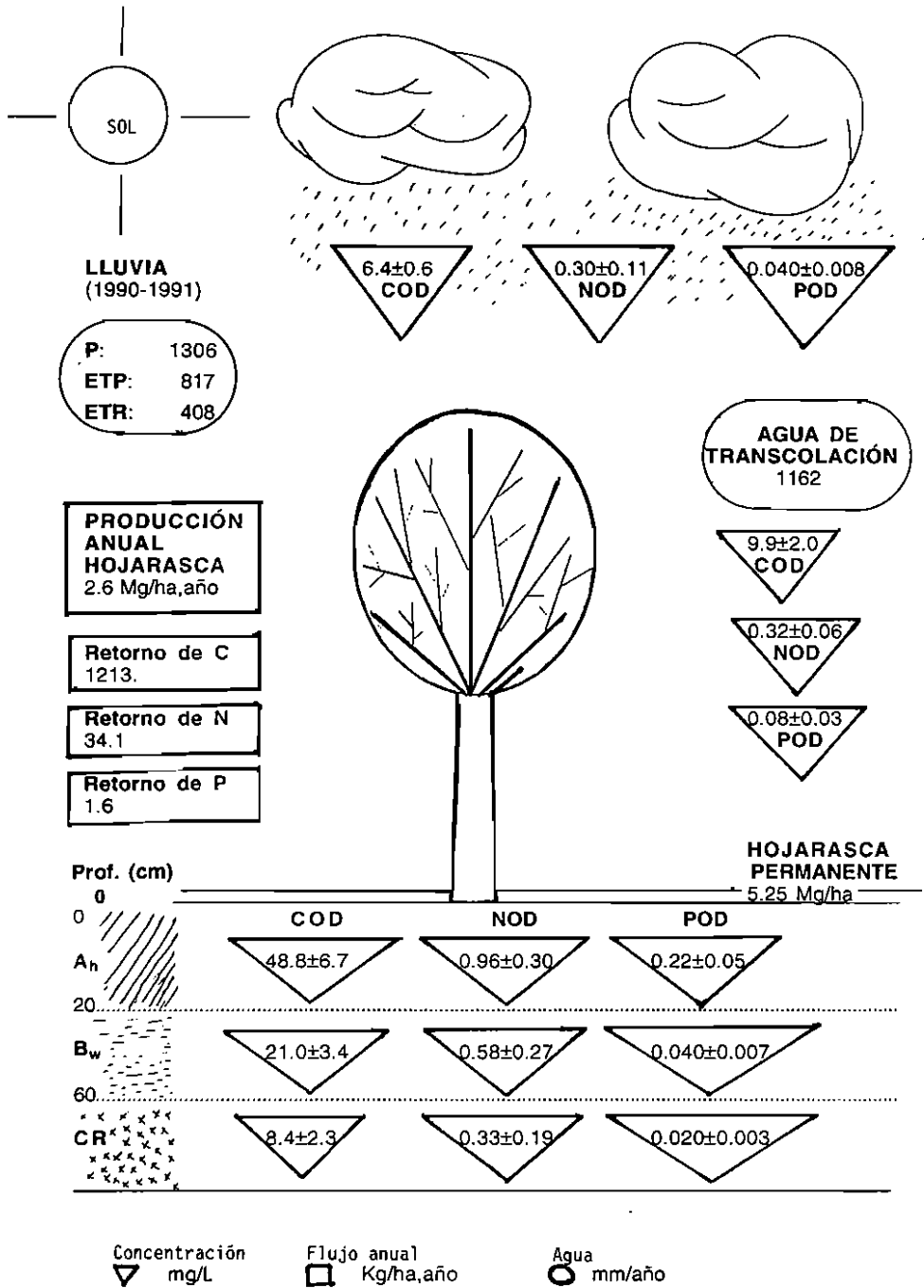


Fig. 5. Cambios de la composición de C, N y P disueltos en aguas de diferentes compartimentos en el ecosistema forestal de Navasfrías (COD, NOD y POD, respectivamente). [Changes of the composition of dissolved organic C, N, and P of the waters at different levels of the forest ecosystem at the Navasfrías site (COD, NOD and POD, respectively).]

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHAMSEN G. 1983. Sulphur pollution: Ca, Mg, and Al in soil and soil water and possible effects on forest trees. En: B. Ulrich & J. Pankrath (eds). Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems. D. Reidel, Dordrecht. 207-218.
- AUSSENAC G. 1980. Le cycle hydrologique en forêt. En: P. Pesson (eds). Actualités d'écologie forestière: Sol, flore, faune. Gauthier-Villars, Paris. 283-307.
- BELLILLAS M.C. & F. RODA 1991. Nutrient budgets in a dry heatland watershed in Northeastern Spain. Biogeochemistry, 13: 137-157.
- BELLOT J. 1989. Análisis de los flujos de deposición global, trascolación, escorrentía cortical y deposición seca en el encinar mediterráneo de L'Avic Sierra de Prades, Tarragona. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias, Alicante.
- CAPE J. N., A. H. F. BROWN, S. M. C. ROBERTSON, G. HOWNSON & I. S. PATERSON 1991. Inter-species comparisons of throughfall and stemflow at three sites in Northern Britain. For. Ecol. Manage., 46: 165-197.
- CAPE J. N., D. FOWLER, J. W. KINNAIRD, I. A. NICHOLSON 1987. Modification of rainfall chemistry by a forest canopy. En: P. Coughtrey, M. Martin & M. Unsworth (eds). Pollutant transport and fate in ecosystems. Blackwell, Oxford. 155-169.
- DUVIGNEAUD P. 1974. La synthèse écologique. Doin, Paris.
- F.A.O. 1989. The Legend. Soil Map of the World. F.A.O., Roma.
- FRANCIS D. & J. B. THORNES 1990. Matorral erosion and reclamation. En: J. Albadalejo, M.A. Stoccking & E. Díez (eds). Degradación y regeneración del suelo en condiciones ambientales mediterráneas. C.S.I.C., Madrid. 36-45.
- GALLARDO J. F., S. CUADRADO & J. A. EGIDO 1980a. Suelos forestales del El Rebollar Salamanca. II: Propiedades y conclusiones. Anu. Cent. Edaf. Biol. Apli., 6: 214-228.
- GALLARDO J. F., J. A. EGIDO & L. PRAT 1980b. Suelos forestales de El Rebollar Salamanca. I: Consideraciones generales. Anu. Cent. Edaf. Biol. Apli., 6: 193-213.
- GALLEGO H. A., M. RICO, G. MORENO & I. SANTA REGINA 1994. Leaf water potentials and stomatal conductances in *Quercus pyrenaica* forest: vertical gradients and response to environmental factors. Tree Physiol., 14: 1039-1047.
- GODT J., M. SCHMIDT & R. MAYER 1986. Processes in the canopy of trees: internal and external turnover of elements. En: H.W. Gerogii (eds). Atmospheric pollutants in forest areas. D. Reidel, Dordrecht. 263-274.
- JOFFRE R. & S. RAMBAL 1993. How tree cover influences the water balance of mediterranean rangelands?. Ecology, 74: 570-582.
- LIKENS, G. E., F. H. BORMANN & N. M. JOHNSON 1981. Interactions between major biogeochemical cycles in terrestrial ecosystems. En: G.E. Likens (eds). Some perspectives of the major biogeochemical cycles. J. Wiley, New York. 93-112.
- LIKENS, G. E., F. H. BORMANN, R. S. PIERCE, J. S. EATON & N. M. JOHNSON 1977. Biogeochemistry of a forested ecosystem. Springer-Verlag, New York.

- MARTIN A., J. F. GALLARDO & I. SANTA REGINA 1997. Long-term decomposition process of leaf litter from *Quercus pyrenaica* forests across a rainfall gradient Spanish Central system. *Ann. Sci. For.*, 54: 191-202.
- MILLER H. G. & J. D. MILLER 1980. Collection and retention of atmospheric pollutants by vegetation. En: S. Drabløs and A. Tollan (eds) *Ecological impact of acid precipitation*. Proc. Conf. Ecol. Impact Acid Precip., Norway. S.N.S.F. Project. 33-40.
- MORENO G. 1994. Balances de agua y nutrientes en rebollares de la vertiente salmantina de la Sierra de Gata. Tesis doctoral, Facultad de Biología, Salamanca.
- MORENO G., J. F. GALLARDO & S. CUADRADO 1994. Deposition atmosférica de bioelementos y su modificación por la cubierta vegetal de bosques de la Sierra de Gata. En: J.F. Gallardo (eds). *Biogeoquímica de Ecosistemas*. Consejería de Medio Ambiente, Valladolid. 201-216.
- MORENO G., J. F. GALLARDO & F. INGELMO 1993. Effects on rainfall gradient on tree water consumption and soil fertility on *Quercus pyrenaica* forests in the Sierra de Gata, Spain. *Acta Geol. Hisp.*, 28: 119-129.
- MORENO G., J. F. GALLARDO, F. INGELMO, S. CUADRADO & J. HERNÁNDEZ 1996a. Soil water budget in four *Quercus pyrenaica* forest across a rainfall gradient. *Arid Soil Res. and Rehabil.*, 10: 65-84.
- MORENO G., J. F. GALLARDO, K. SCHNEIDER & F. INGELMO 1996b. Water and bioelement fluxes in four *Quercus pyrenaica* forests along a pluviometric gradient. *Ann. Sci. For.*, 53: 625-639.
- MENÉNDEZ I. 1995. Aproximación geoquímica al conocimiento de la solución edáfica y aspectos físicos de suelos forestales de la Sierra de Gata. Facultad de Ciencias, Salamanca.
- MENÉNDEZ I., G. MORENO, J. F. GALLARDO & J. SAAVEDRA 1994. Modificación edáfica del agua de lluvia en bosques caducifolios en la Sierra de Gata. En: J.F. Gallardo (eds). *Biogeoquímica de Ecosistemas*. Consejería de Medio Ambiente, Valladolid. 179-190.
- MENÉNDEZ I., G. MORENO J. F. GALLARDO & J. SAAVEDRA 1995. Soil solution composition in forest soils of Sierra de Gata mountains: Relationship with soil water content. *Arid Soil Res. & Rehabil.*, 9: 495-502.
- PARKER G. G. 1983. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycling. *Adv. Ecol. Res.*, 13: 58-121.
- POTTER C. S., H. L. RAGSDAE & W. T. SWANK 1991. Atmospheric deposition and foliar leaching in a regenerating Southern Appalachian forest canopy. *J. Ecol.*, 79:97-115.
- RAMBAL S. 1984. Water balance and pattern of root water uptake by a *Quercus coccifera* L. evergreen shrub. *Oecologia*, 62:18-25.
- RICO M., SANTA REGINA, H. A. GALLEGO & M. RAPP 1994. Contenido en nutrientes en *Quercus pyrenaica*: Variabilidad estacional. En: F. Páscoa, L. Pinheiro, A. Isidoro (eds). *Os recursos florestais no desenvolvimento rural*. Soc. Port. Ciências Florestais, Lisboa. 154-162.
- SALA M. 1988. Lavado superficial de las vertientes. En: M. Sala & F. Gallart (eds) *Métodos y técnicas para la medición en el campo de procesos geomorfológicos*. Monografía 1., Soc. Española Geomorfol., Barcelona. 25-30.
- SOLER M. & M. SALA 1992. Effects of fire of clearing in a Mediterranean *Quercus ilex* woodland: An experimental approach. *Catena*, 19:321-332.

- STEVENS P. A., M. HORNING & S. HUGHES 1989. Solute concentration fluxes and major nutrient cycles in a mature Sitka-spruce plantation in Bedgelert forest. *Forest Ecol. Management*, 27:1-20.
- TURRION B., J. F. GALLARDO & M. I. GONZÁLEZ 1996. Nutrient availability in forest soils as measured with anion-exchange membranes. *Geomicrobiol. J.* 14:51-64 .
- ULRICH B. 1983. Interactions of forest canopies with atmospheric constituents: SO₂, alkali and earth-alkali cations, and chloride. En: B. Ulrich & J. Pankrath (eds). *Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems*. D. Reidel, Dordrecht. 33-45.
- VACHAUD G., J. M. ROYER & J. D. COOPER 1977. Comparison of methods of calibration of a neutro probe by gravimetric or neutron capture model. *J. Hydrol.*, 34:343-355.
- VAN BREEMEN N., W. F. J. VISSER & T. H. PAPE 1989. Biogeochemistry of an oak woodland ecosystem in the Netherlands affected by acid atmospheric deposition. *Agric. Res. Repport PUDOC*, Wageningen.