

# Diversidade funcional em sistemas de montado: fluxo de nutrientes em *Quercus rotundifolia* Lam.

## Functional diversity in “montado” systems: nutrients fluxes in *Quercus rotundifolia* Lam.

J. D. Nunes<sup>1</sup>, L. Gazarini<sup>1,2</sup> & M. Madeira<sup>3</sup>

### RESUMO

Os componentes dos ciclos de nutrientes em montados de *Quercus rotundifolia* Lam., relacionados com a precipitação foram estudados na região de Évora, de Novembro de 1996 a Dezembro de 2000. A precipitação bruta, o gotejo a diferentes distâncias do tronco e o escoamento ao longo do tronco das árvores foram quantificados de modo contínuo, sendo colhidas amostras semanalmente para se proceder à respectiva caracterização química. A quantidade de nutrientes transferidos para o solo através das diferentes soluções foi também determinada. Verificou-se um acréscimo da concentração das espécies iónicas no gotejo em relação à precipitação bruta, o qual foi ainda mais manifesto no escoamento ao longo do tronco.

Estudaram-se, igualmente, as características físico-químicas do solo sob e fora da influência da copa destas árvores, num montado relativamente esparso. Além disso, também se avaliou a quantidade das camadas orgânicas e a quantidade de nutrientes aí retidos. As características físicas e químicas do solo apresentaram, de

um modo geral, uma diferenciação positiva em resultado da presença das árvores.

Avaliou-se a taxa de mineralização de N nas áreas sob e fora da acção do coberto das árvores, tendo-se observado uma mais elevada disponibilidade deste nutriente nas áreas do sob coberto.

### ABSTRACT

Nutrient cycling in *Quercus rotundifolia* Lam. systems, regarding precipitation was studied at Évora (Southern Portugal), since November of 1996 until December of 2000. The amounts of gross rainfall, throughfall (at different distances from the tree trunk) and stemflow were measured continuously and samples for chemical analysis were collected weekly. The concentration of nutrients was higher in the throughfall than in the gross rainfall, especially in the areas closer to the tree trunk. Nutrients transferred to soil, through bulk rainfall, throughfall and stemflow were quantified. The highest concentration of nutrients was observed in the stemflow water.

Soil physical and chemical characteris-

---

<sup>1</sup> Dep. Biologia, Universidade de Évora, 7002-554 Évora; e-mail: [jdnunes@uevora.pt](mailto:jdnunes@uevora.pt); <sup>2</sup> Instituto de Ciências Agrárias Mediterrâneas (ICAM), Universidade de Évora; <sup>3</sup> Departamento de Ciências do Ambiente, Instituto Superior de Agronomia

tics, underneath and outside *Quercus rotundifolia* crowns, were studied in areas where trees commonly are wide spaced. The amounts of the forest floor litter layer were also evaluated. Soil physical and chemical characteristics showed in general a positive effect with tree presence.

Nitrogen transformation was examined under and outside the influence of the tree canopies. Nitrogen availability was higher in the soil of under crowns areas.

## INTRODUÇÃO

As árvores de *Quercus rotundifolia* Lam. enquanto constituintes do sistema “montado” em que, de modo análogo às formações de tipo savana, as árvores apresentam grande espaçamento entre si, interagindo localizadamente com o solo e a vegetação sobcoberto, diferenciando assim as características do solo da área sob a ação da sua copa das daquela em que essa ação não se verifica. Tal diferenciação dever-se-á à acumulação de folhada no solo do sob coberto e ao retorno de nutrientes, quer devido à decomposição da folhada acumulada e das raízes senescentes da árvore, quer ainda, devido à precipitação que atravessa a copa e que escorre pelo tronco das árvores.

Estudos realizados em sistemas semelhantes (com a mesma e outras espécies) indicam que as árvores muito espaçadas podem funcionar como “armadilhas” da precipitação e dos nutrientes por ela veiculados, na dependência da ação do vento, melhorando, assim, tanto o regime hídrico (Dancette & Poulain, 1969; Joffre & Rambal, 1988) como a disponibilidade de nutrientes do solo (Attwill & Leeper, 1987; Gauquelin *et al.*, 1992). Com efeito, Gersper & Holowaychuk (1970) encontraram uma estreita correlação entre as características do solo sob árvores e as do res-

pectivo gotejo, enquanto Ryan & Mcgarity (1983) verificaram uma acentuada variação das características físicas e químicas do solo com a distância ao tronco de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden.

A mineralização do C orgânico e do N do solo são processos fundamentais na sustentabilidade dos ecossistemas, quer naturais quer intervencionados pelo homem (Giardina *et al.*, 2001), sendo a disponibilidade em N considerada, para a grande maioria das comunidades de plantas, como a mais limitante relativamente à dos restantes nutrientes (Vitousek *et al.*, 1982; Vitousek & Howart, 1991; Paul *et al.*, 2002; Vestgarden *et al.*, 2003). Considerando que o N é preferencialmente absorvido pelas plantas por intermédio das suas formas minerais (N  $[\text{NH}_4^+]$  e N  $[\text{NO}_3^-]$ ) (Brady & Weil, 1999), o mecanismo e a taxa da mineralização do mesmo assume particular importância na disponibilidade em amónio ( $\text{NH}_4^+$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) nos ecossistemas (Vestgarden *et al.*, 2003). A diferenciação do microclima do solo e das suas características físicas e químicas, entre áreas sob e fora da ação da copa de *Q. rotundifolia*, poderão originar distintas disponibilidades de N e conseqüentemente diferentes taxas de absorção/lixiviação deste nutriente.

Tais aspectos sugerem que as árvores de *Q. suber* e de *Q. rotundifolia* num montado terão um papel fundamental no regime hídrico e nas características do solo sob a respectiva copa, o que poderá assumir enorme relevância para a sobrevivência deste ecossistema, sobretudo para suportar condições de eventos extremos.

Com efeito, estudos realizados em algumas das nossas áreas de montado têm demonstrado que os solos sob a copa de *Q. rotundifolia* podem apresentar maior disponibilidade de nutrientes em relação às áreas limítrofes (Baltasar *et al.*, 1983). Embora estes dados obtidos em Portugal corroborem

os da literatura estrangeira, eles são escassos e pontuais, sendo necessário mais informação para melhor conhecer o funcionamento do sistema solo-árvore isolada, nas nossas condições ambientais.

Neste contexto, desenvolveram-se estudos com vista à caracterização e modelação de fluxos de nutrientes em montados de *Q. rotundifolia*, destacadamente no tocante ao efeito das árvores na redistribuição da precipitação e nutrientes, na variação espacial de características físicas e químicas do solo e na disponibilidade e mineralização de N. No presente trabalho apresentam-se resultados, obtidos durante um período de quatro anos, referentes aos fluxos de nutrientes associados à precipitação bruta e à precipitação sob-coberto, às camadas orgânicas e minerais do solo e ao N orgânico do solo.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área experimental

O estudo decorreu no Centro de Estudos e Experimentação da Mitra (C. E. E. M.), da Universidade de Évora, conhecido vulgarmente por Herdade da Mitra. O Centro dista cerca de 12 km da cidade de Évora e está enquadrado pelos paralelos de 38° 31' e de 38° 32' de latitude norte e pelos meridianos de 8° 00' e de 8° 01' de longitude oeste de Greenwich.

A área de estudo caracteriza-se por uma temperatura média anual do ar de 15,6 °C e uma precipitação média anual de 655,6 mm (Reis & Gonçalves, 1985). Corresponde-lhe um clima sub-húmido chuvoso, mesotérmico, com grande deficiência de água no Verão e pequena concentração estival da eficiência térmica (C2 B2 s2 a'), segundo a classificação climática de Thornthwaite, e um clima mesotérmico

húmido com o Verão seco e muito quente (Csa), segundo a de Köppen (Reis & Gonçalves, 1985).

A área de estudo apresenta um relevo ondulado com declives entre 5% e 16%. A litologia corresponde a rochas gnaissóides. Na área experimental são predominantes os Solos Litólicos Não Húmicos Pouco Saturados Normais de Gnaisses (Aguiar & Grilo, 1975).

A vegetação consiste num montado aberto de *Q. suber* L. e *Q. rotundifolia* Lam., com um estrato arbustivo dominado pela *Cistus salvifolius* L., acompanhada principalmente por *Cistus ladanifer* L., *Cistus crispus* L., *Quercus coccifera* L., *Myrtus communis* L. e *Arbutus unedo* L..

### Amostragens

A precipitação bruta foi colhida por intermédio de udómetros colocados numa torre de 12 m de altura, acima da copa das árvores. Para a colheita da precipitação correspondente ao gotejo instalaram-se numa árvore, nas direcções dos pontos cardeais principais, udómetros ao nível da superfície do solo a 1,5, 5,2 e 6,9 m (limite da projecção da copa) de distância ao tronco; foram ainda instalados udómetros, para cada uma das direcções, fora do limite da projecção da copa, a 2 e a 7 m. O escoamento pelo tronco foi colhido por uma caleira helicoidal colocada à volta do tronco de uma árvore. A precipitação bruta, o gotejo e o escoamento ao longo do tronco foram objecto de quantificação contínua, colhendo-se semanalmente amostras para análise.

As camadas orgânicas, quase exclusivamente restringidas à camada L, foram amostradas no período do Outono-Inverno, com recurso a uma quadrícula metálica (0,25 x 0,25 m) a distâncias do tronco correspondentes a 33, 66, 100, 133 e 200% do raio da copa, de cinco árvores da área

vedada ao pastoreio e de cinco árvores da área não vedada.

Amostras não perturbadas, para determinação da massa volúmica aparente, foram colhidas a 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade, segundo a direcção dos quatro pontos cardeais, nos locais em que se amostraram as camadas orgânicas. As amostras de solo, para caracterização química, foram colhidas por sondagem a 0-5 cm de profundidade, segundo a direcção dos quatro pontos cardeais, às mesmas distâncias utilizadas para a recolha das camadas orgânicas.

A mineralização de N foi avaliada nas áreas sob e fora da acção da copa de *Q. rotundifolia*, por intermédio da metodologia da mineralização sequencial *in situ* descrita por Raison, *et al.* (1987), à profundidade de 0-10 e 10-20 cm.

### Métodos analíticos

As soluções foram filtradas (sob vácuo) através de uma membrana de nitrato de celulose com uma porosidade de 0,45  $\mu\text{m}$  de diâmetro. As amostras foram congeladas ou colocadas no frigorífico, consoante o tempo de espera para o processamento analítico.

A massa das camadas orgânicas, foi quantificada a partir da determinação do teor de humidade de sub-amostras, em relação ao peso seco a 80 °C. Os materiais orgânicos foram moídos num moinho centrífugo, utilizando um crivo de malha de 0,5 mm.

A massa volúmica aparente foi determinada após secagem das respectivas amostras a 105 °C.

Os materiais terrosos para caracterização química do solo, depois de secos ao ar, foram crivados através de um crivo de 2 mm.

As sub-amostras de terra resultantes da metodologia da mineralização sequencial do N *in situ* foram submetidas a uma extracção

com KCl 2M (4g de terra com 20 mL de KCl 2M), agitando-as durante uma hora. Finda esta agitação, procedeu-se à centrifugação dos extractos a 3.500 rpm durante sete minutos, seguindo-se a respectiva filtração. Os extractos foram imediatamente congelados para posterior processamento analítico.

O N (Kjeldahl) dos materiais orgânicos foi determinado por intermédio de um sistema de destilação Kjeltex Auto 1030 Analyzer. A solubilização dos elementos minerais (K, Mg, Ca e P) foi efectuada num digestor CEM Microave Digestion System Model MDS-2000. Para o efeito colocou-se 0,5 g de material em tubos LDV (Line Digestion Venel), em contacto com 10 ml de HNO<sub>3</sub> concentrado a 65%. A solução resultante foi evaporada em copos de "Fourmeau", solubilizando-se o resíduo pela adição de 10 ml de HCl 3 M.

O pH dos materiais terrosos foi determinado numa suspensão de solo em água e KCl 1 M (suspensão 1:2,5) por intermédio do método electrométrico. O C orgânico foi determinado por via seca. O N dos materiais terrosos foi determinado pelo método utilizado para os materiais orgânicos. As bases de troca (Ca, Mg, K, Na) foram extraídas por uma solução de acetato de amónio ajustada a pH 7. O P e o K extractáveis foram obtidos pelo método de Egnér- Riehm.

A concentração de Ca, Mg, K e Na nos extractos de materiais terrosos e orgânicos, bem como nas soluções, foi determinada por espectrofotometria de absorção atómica; a de P foi determinada colorimetricamente (Murphy & Riley, 1962). O N (sob a forma de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) foi determinado através do método do fenol-nitroprussiato (Dorich & Nelson, 1983). Os elementos Cl, N (sob a forma de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e S (sob a forma de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) foram determinados por cromatografia iónica.

Os teores em N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> das extracções foram determinados por métodos

de espectrofotometria de absorção molecular em analisador automático de fluxo segmentado (Houba *et al.*, 1994). A determinação do teor em N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> foi baseado na reação de *Berthelot* e o teor em N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> foi determinado pelo reagente de *Griess-Ilosvay* após redução numa coluna de cádmio.

### Cálculos e métodos estatísticos

A verificação da natureza das diferenças entre os valores médios das quantidades das camadas orgânicas, e das quantidades de nutrientes do solo a diferentes distâncias do tronco, efectuou-se por intermédio de testes não paramétricos *H* de Kruskal-Wallis (Sokal & Rohlf, 1995), dado não ter sido possível normalizar e homogeneizar as variâncias das amostras, seguidos de comparações múltiplas específicas, segundo a metodologia descrita por Sprent (1993). As diferenças foram consideradas significativas para  $p \leq 0.05$  (Sokal & Rohlf, 1995).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

No local de estudo, os nutrientes com maiores fluxos anuais (Quadro 1) foram o Cl e o Na, seguidos do K, S [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] e Ca, com valores muito próximos (3,49 a 3,98 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>). O P foi aquele que apresentou o menor fluxo (0,77 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>). Os fluxos de N sob a forma de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, ou sob a forma de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> foram bastante próximos e em média inferiores a 3 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

A tendência para os fluxos de nutrientes através da precipitação bruta (PB) serem dominados pelo par Cl-Na, tal como o observado por Cortez (1996) e Bispo (2002) em estudos na região de Pegões, reflecte a importância que as emissões marinhas ainda assumem no local do presente estudo, apesar da maior distância da

linha de costa. O facto de nas condições locais o K ser o terceiro nutriente mais importante, interpondo-se entre o par Cl-Na e o par S-Ca observados nos estudos mencionados, poderá indicar uma mais forte influência das poeiras do solo na devolução de nutrientes ao mesmo pela PB. Não obstante, a importância do Cl<sup>-</sup> relativamente aos dois outros aniões, sugere, ainda, a influência da acção marinha na composição aniónica da PB, apesar da maior distância percorrida pelas suas emissões, pois a composição química da precipitação, em geral, pode ser influenciada pelo aerossol marinho até a uma distância de 100 km (Parker, 1983).

As reduzidas quantidades dos restantes nutrientes, principalmente de P, introduzidas no sistema através desta solução, estão em linha com o observado por Cortez (1996) e Bispo (2002), e reflectem o baixo impacto de fontes antropogénicas de nutrientes para o local de estudo, pois em áreas em que estas fontes apresentam um forte impacto, os fluxos da PB apresentam um domínio do N (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e do S, conforme tem sido observado por vários autores (Feger *et al.*, 1990; Takahashi *et al.*, 2001).

No GO da azinheira (Quadro1), os nutrientes com maiores fluxos anuais foram o Cl e o K, seguidos do Na e do Ca, com valores muito próximos (22,35 e 21,05 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>). Os fluxos de S e Mg aproximaram-se (7,05 e 6,54 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), passando este último a ter um peso superior aos fluxos de N, relativamente ao que ocorria na PB. Estes, quer sob a forma de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, ou sob a forma de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> foram, respectivamente, de 4,2 e 5,37 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, bastante próximos e inferiores a 5,5 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. O menor fluxo foi novamente o do P (1,35 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>).

No presente estudo verificou-se que no gotejo da azinheira, comparativamente à PB, o K passou a ser o nutriente com o segundo maior fluxo, ocupando a posição

**QUADRO 1 - Valores correspondentes aos fluxos anuais médios para, a precipitação bruta (PB), o gotejo (GO), o escoamento ao longo do tronco (ET); fluxos líquidos do gotejo (GL) e valores das correspondentes precipitações (PR), durante o período de 1997 a 2000**

	(mm)	Ca	Mg	Na	K	N [NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ]	N [NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	P	Cl	S [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]
		..... kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> .....								
PB	654	3,49	1,84	8,66	3,98	2,82	2,07	0,77	17,94	3,88
GO	517	21,05	6,54	22,35	38,42	4,20	5,37	1,35	54,18	7,05
ET	3	0,86	0,13	0,16	0,63	0,01	0,01	< 0,01	0,35	0,06

Os valores para o ET foram calculados considerando como área de influência a da respectiva copa

do Na e o Ca trocou de posição com o S, que passou a ocupar a quinta posição. Este acréscimo de importância do fluxo do K no GO relativamente à PB, para além de se verificar para a grande parte das espécies arbóreas (Velthorst & Van Breemen, 1989; Feger *et al.*, 1990; Veneklaas, 1990; Gauquelin *et al.*, 1992; Muoghalu & Oakhumen, 2000; Moreno *et al.*, 2001), assumirá uma maior relevância na *Q. rotundifolia*, como é evidenciado pelo facto de ser o fluxo de K o mais importante no GO de *Q. ilex* (Bellet *et al.*, 1999), espécie esta considerada muito próxima da espécie estudada (Gonzalez, 1995).

As quantidades de nutrientes transportados pelo escoamento ao longo do tronco (Quadro 1) foram muito baixas em comparação com as transportadas pela precipitação bruta, apresentando, na maioria dos casos, valores inferiores a 1 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. No entanto, ao considerar-se que esta solução apenas terá influência sobre uma coroa circular à volta do tronco, com um reduzido raio, em vez de toda a área correspondente à área de projecção da copa da árvore (Voight, 1960), verificamos que a quantidade de nutrientes envolvidos ao solo pelo ET assume grande importância por unidade de área (Quadro 2). Este facto terá relevância na diferenciação da disponibilidade de nutrientes, principalmente nas áreas próximas do tronco, como está expresso pelas elevadas quantidades de Ca e K.

A massa das camadas orgânicas decres-

ceu significativamente da proximidade do tronco (305,56 g m<sup>-2</sup>), para o limite da projecção vertical da copa das árvores (131,15 g m<sup>-2</sup>) na área vedada ao pastoreio. Na área não vedada ao pastoreio, o decréscimo foi igualmente significativo, embora com os valores a situarem-se entre 205,56 e 94,74 g m<sup>-2</sup> (Figura 1).

Os valores obtidos sob as árvores da área vedada ao pastoreio, constituindo estas um povoamento com baixa densidade (35-45 árvores ha<sup>-1</sup>), não se afastam muito dos obtidos para o horizonte L, por Serrasolses & Vallejo (1999) em povoamentos com uma densidade muito mais elevada (> 1000 árvores ha<sup>-1</sup>).

As camadas orgânicas do solo apresentaram junto ao tronco das árvores o dobro da massa verificada para as áreas localizadas no limite da projecção vertical da copa, devendo esta diferença resultar das variações observadas no padrão da queda da folhada com a distância ao tronco das árvores (Nunes *et al.*, 1999, 2001). A redução da massa das camadas orgânicas junto ao tronco das árvores das áreas não vedadas, em relação aos das árvores das áreas vedadas, poderá dever-se à destruição parcial dessas camadas por acção do pisoteio.

As concentrações em N, P, K, Ca, Mg e Mn nas camadas orgânicas não apresentaram variação com a distância ao tronco, apenas se tendo observado, principalmente nas áreas não vedadas, uma concentração

**QUADRO 2 - Fluxos anuais médios de precipitação (PR) e de nutrientes através do escorrimento ao longo do tronco; considerando como sua área de influência, a área da copa (AC), ou uma coroa circular com raio de 1 m, 0,5 m e 0,2 m de distância ao tronco, durante o período de 1997 a 2000**

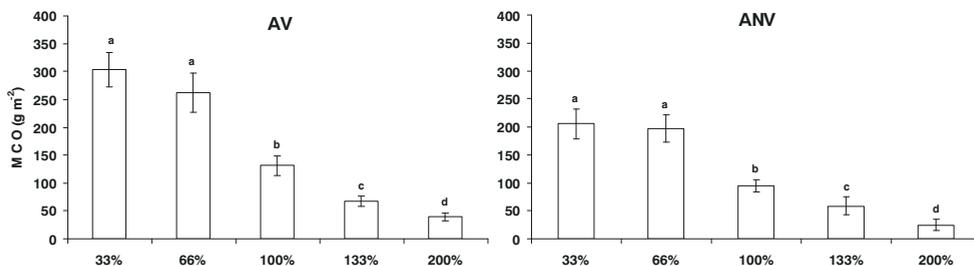
	(mm)	Ca	Mg	Na	K	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	P	Cl	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
		kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>								
AC	3	0,86	0,13	0,16	0,63	0,01	0,01	< 0,01	0,35	0,06
1 m	44,8	13,32	1,96	2,41	9,71	0,22	0,23	0,02	5,42	1,00
0,5 m	132,3	39,45	5,81	7,15	28,75	0,66	0,68	0,06	16,03	2,96
0,2 m	464,0	138,52	20,39	25,11	100,96	2,33	2,39	0,20	56,30	10,38

mais elevada de alguns nutrientes, nas camadas colhidas fora do limite (200%) da projecção vertical da copa comparativamente às camadas colhidas dentro desses limite. Estas diferenças poderão resultar de uma decomposição mais acelerada nas áreas do sob coberto, produto de uma actividade microbiana mais intensa, em consequência de diferenças que ocorrerão na composição e na quantidade da população microbiana, e de condições microclimáticas diferenciadas entre o sob coberto e as áreas fora da acção deste. Nas áreas não vedadas ao pastoreio, adicionalmente, ter-se-á verificado a conjugação do efeito do pisoteio com os factores mencionados.

Nas áreas vedadas, a quantidade de N acumulada nas camadas orgânicas variou, de 4698,91 g m<sup>-2</sup>, junto ao tronco, a 2084,97 g m<sup>-2</sup>, no limite da projecção da

copa. Nas áreas fora da projecção vertical da copa e na distância correspondente ao dobro do raio desta, essa quantidade foi de 564,82 mg m<sup>-2</sup> (Figura 2). Nas áreas não vedadas, essas quantidades foram, respectivamente, 2336,33, 1353,11 e 345,52 g m<sup>-2</sup>. Padrão semelhante foi observado para os restantes nutrientes considerados, à excepção do K nas áreas não vedadas ao pastoreio. Sublinha-se, ainda, a elevada quantidade de Ca acumulada nas camadas orgânicas do sob coberto, respectivamente, 4950,6 e 3074,2 g m<sup>-2</sup> em média, nas áreas vedadas e não vedadas ao pastoreio, o que se justifica pelo facto de ser o elemento que é devolvido ao solo em maior quantidade, por intermédio da folhada (Nunes *et al.*, 2001).

As diferenças observadas para a massa das camadas orgânicas com a distância ao



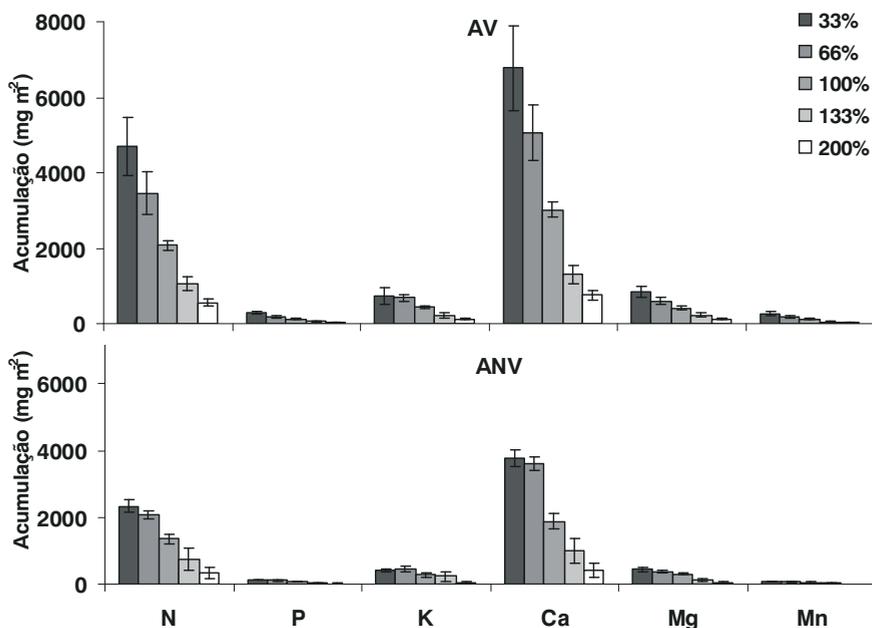
**Figura 1** – Valor médio da massa da camada orgânica (MCO) e colhida a 33%, 66%, 100%, 133% e 200% do raio da copa, em áreas vedadas (AV) e não vedadas (ANV) ao pastoreio, de cinco árvores isoladas. Letras diferentes na mesma área correspondem a diferenças significativas (p<0,05) pelo teste H de Kruskal-Wallis

tronco, determinaram que a quantidade de nutrientes acumulados se correlacionasse inversamente com essa distância, ou seja, as quantidades foram mais elevadas quanto menor a distância ao tronco. As quantidades observadas à distância mais próxima do tronco, correspondente a 33% do raio da copa, comparativamente às observadas na distância correspondente a 200% desse raio, foram, consoante o nutriente, 6 a 10 vezes superiores. Nas áreas vedadas ao pastoreio a menor razão observou-se no K e a maior no Mn enquanto nas áreas não vedadas, estas foram respectivamente no P e no Ca.

Nas áreas pastoreadas, a quantidade de N acumulado nas camadas orgânicas foi cerca de metade da determinada por Serrasolles & Vallejo (1999) em povoamentos de *Q. rotundifolia* muito densos (> 1000 árvo-

res ha<sup>-1</sup>) na região da Catalunha, Noroeste de Espanha. Esta desproporção poderá reflectir as diferenças existentes entre o tipo de povoamentos em estudo, bem como o facto de haver pastoreio no presente caso.

A massa volúmica aparente das camadas 0-5 e 5-10 cm de profundidade diminuiu com a proximidade do tronco, em resultado certamente, da acção da camada orgânica existente devido à presença da árvore; do teor em C total mais elevado nessas camadas minerais do solo, com consequências na melhoria da estrutura do solo; e provavelmente ainda de uma densidade radical mais elevada. Esta acção esbate-se com o aumento da profundidade, pois não se encontraram variações significativas da massa volúmica aparente com a distância ao tronco para a camada 10-20 cm.



**Figura 2** - Valores médios (e □ respectivo erro padrão; n=4) das quantidades de N, P, K, Ca, Mg e Mn, retidas na camada orgânica do solo, recolhida a 33%, 66%, 100%, 133% e 200% do raio da copa, em áreas vedadas (AV) e não vedadas (ANV) ao pastoreio

Observou-se igualmente uma forte tendência para as características químicas da camada superficial do solo (0-5 cm) se diferenciarem significativamente em função da distância ao tronco da árvore (Quadro 3), bem como com a presença ou ausência da respectiva copa.

As quantidades de C e de N totais, bem como de C humificado e não humificado, foram mais elevadas nas áreas sob a copa das árvores do que nas áreas exteriores a ela. Além disso, essas quantidades decresceram de áreas mais internas da copa (33%) para aquelas correspondentes ao limite da projecção vertical da copa das árvores (100%).

As quantidades de Ca e de K de troca decresceram das áreas mais próximas do tronco (33%) para aquelas correspondentes ao limite da projecção vertical da copa (100%), não tendo, porém, as quantidades correspondentes a duas distâncias consecutivas sido significativamente diferentes. As quantidades destas bases de troca foram significativamente menores nas áreas fora da influência da copa do que naquelas sob a sua projecção vertical. Padrão semelhante foi verificado para a quantidade de K extraível, cuja diferenciação foi ainda mais acentuada, dado a quantidade determinada para as áreas correspondentes ao limite da projecção das copas (100%) ter sido menor do que a determinada naquelas mais próximas do tronco (33%), nas áreas sujeitas ao pastoreio.

A quantidade de P extraível, tal como o verificado para o Ca e o K de troca, atingiu o valor mais elevado à distância correspondente a 33% do raio da copa, o qual decresceu para o limite da projecção vertical da copa (100%), e deste para as áreas fora da influência directa desta. Porém, os valores encontrados embora fossem significativamente diferentes, não expressaram, de forma inequívoca, um padrão de varia-

ção definido com a distância ao tronco da árvore, mas apenas uma diferenciação entre áreas sob e fora da acção da copa da árvore.

As quantidades de Mg de troca não apresentaram diferenças significativas em qualquer uma das áreas estudadas, embora nas áreas não vedadas ao pastoreio, as quantidades foram mais elevadas nas áreas mais próximas do tronco (33 e 66%) do que naquelas correspondentes ao limite da projecção vertical da copa (100%), e do que nas áreas fora da influência directa desta. As quantidades de Na apresentaram pequena variação com a distância ao tronco das árvores.

A disponibilidade em nutrientes da camada superficial do solo das áreas fora do limite da projecção da copa das árvores, foi em geral inferior à verificada sob a copa das árvores. Para os diferentes nutrientes avaliados, essa diferença variou quase sempre entre 1,5 vezes no limite da projecção vertical da copa (100%) a 2 vezes na proximidade do tronco (33%).

À profundidade de 5-10 cm e de 10-20 cm, a variação da quantidade de nutrientes com o aumento da distância ao solo, apresenta um padrão mais atenuado, com as diferenças significativas a restringirem-se aos nutrientes K, N e C, ou seja aos nutrientes cujo ciclo é fortemente condicionado pela presença da árvore (Dahlgren *et al.*, 1997, 2003).

A diferenciação constatada nas características da camada superficial do solo (0-5 cm) tem sido igualmente verificada por diferentes autores (Zinke, 1962; Escudero *et al.*, 1985; Wolfe *et al.*, 1987; Kretinin, 1993; Seiler & Matzner, 1995; Dahlgren *et al.*, 1997, 2003), em estudos semelhantes com a mesma e outras espécies.

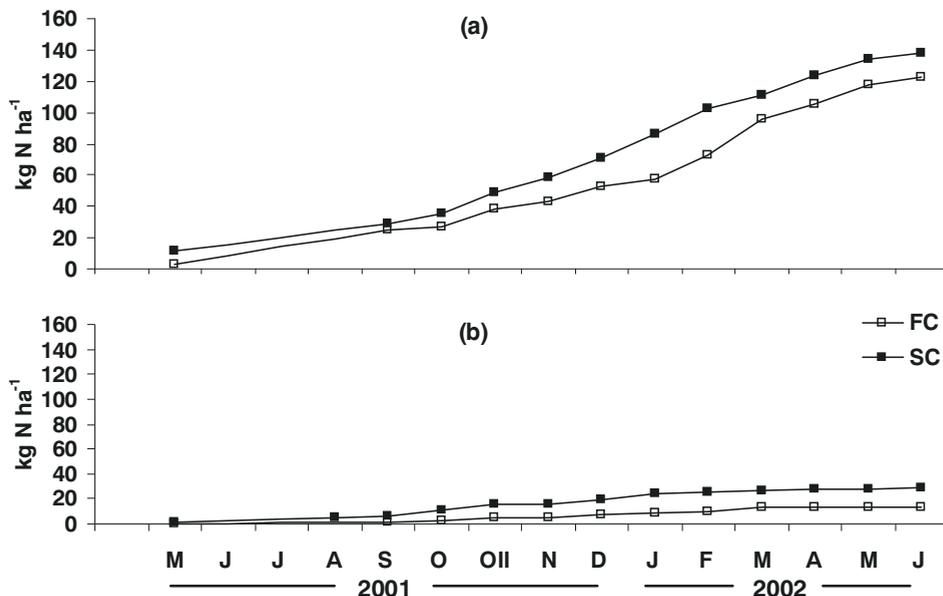
Um dos factores de maior relevância na diferenciação das características do solo consiste na interacção entre o ciclo de

QUADRO 3 – Quantidades médias ( $\text{g m}^{-2}$ ), das bases de troca, de K e P extraíveis, de N orgânico total, e de C orgânico total (T), humificado (H) e não humificado (NH) determinadas a partir de amostras ( $n=4$ ) colhidas à profundidade de 0-5 cm do solo, a 33%, 66%, 100% (limite da projeção copa), 133% e 200% do rai da copa, em áreas vedadas e não vedadas ao pastoreio. Letras diferentes na mesma coluna correspondem a diferenças significativas ( $p<0,05$ ) pelo teste *H* de Kruskal-Wallis

Dist.	Bases de Troca				Extraíveis				Carbono			
	Ca	Mg	Na	K	P	K	N	T	NH	H		
	..... $\text{g m}^{-2}$ .....											
	AV											
<b>33 %</b>	32,01 ±9,95	4,96 ±1,25	1,80 ±0,34	3,84 ±0,97	0,45a ±0,13	3,94 ±1,12	65,68 ±12,44	958,02a ±186,05	584,24a ±184,31	373,77 ±56,48		
<b>66 %</b>	28,29 ±9,66	3,83 ±0,94	1,82 ±0,73	4,05 ±0,41	0,41a ±0,08	4,45 ±0,37	63,81 ±9,87	873,14a ±79,37	434,93ab ±92,82	438,21 ±51,35		
<b>100 %</b>	28,39 ±2,73	4,77 ±0,60	1,86 ±0,20	3,86 ±0,32	0,39a ±0,06	4,26 ±0,42	57,22 ±7,10	791,29ab ±72,32	353,43b ±46,82	437,86 ±30,64		
<b>133 %</b>	25,39 ±3,15	4,01 ±0,24	2,00 ±0,38	3,35 ±0,36	0,26b ±0,06	3,63 ±0,29	50,84 ±2,77	690,26bc ±60,04	254,58c ±29,91	435,68 ±63,72		
<b>200 %</b>	22,93 ±3,54	3,93 ±0,78	1,87 ±0,36	3,29 ±0,65	0,28b ±0,09	3,53 ±0,73	44,50 ±8,45	595,08c ±73,44	226,92c ±46,96	368,17 ±60,14		
	ANV											
<b>33 %</b>	40,73a ±5,07	6,23 ±0,48	2,16a ±0,27	6,11a ±0,91	0,63a ±0,04	6,19a ±1,19	83,45a ±7,94	1181,79a ±151,12	627,32a ±120,10	554,47 ±110,03		
<b>66 %</b>	34,93ab ±4,45	8,43 ±4,32	2,37ab ±0,04	6,22a ±1,11	0,61a ±0,06	5,91a ±0,88	72,65ab ±7,17	929,76b ±85,70	424,73b ±79,89	505,02 ±71,73		
<b>33 %</b>	29,86b ±1,73	4,48 ±1,99	2,24ab ±0,20	5,15a ±0,65	0,42b ±0,08	4,82ab ±0,65	64,24b ±4,45	827,07bc ±118,74	333,73b ±68,40	493,34 ±154,08		
<b>66 %</b>	26,25c ±2,16	4,87 ±0,80	2,47bc ±0,31	3,62b ±0,52	0,44b ±0,05	3,52b ±0,39	54,79c ±6,50	698,71cd ±114,95	222,39c ±42,86	476,32 ±77,70		
<b>100 %</b>	24,42c ±2,69	4,98 ±1,31	2,69c ±0,16	3,51b ±0,84	0,36b ±0,05	3,41b ±1,20	55,67c ±3,78	666,72d ±56,52	209,97c ±18,34	456,76 ±45,74		

nutrientes e essas características, na área da projecção vertical das copas das árvores, consubstanciada, em grande parte, pelos “inputs” de matéria orgânica devido à queda de folhada e pelo retorno de nutrientes ao solo devido à decomposição daquela. O retorno de nutrientes referido para a componente folhas deverá ser ainda mais elevado se considerarmos as outras componentes da folhada (frutos e ramos). A quantidade devolvida pelos ramos será reduzida, dado que estes, para além de representarem uma baixa fracção do total da folhada, apresentam geralmente uma concentração de nutrientes consideravelmente inferior à das folhas (Cortez, 1996). Pelo contrário, a quantidade respeitante aos frutos, devido à concentração de nutrientes nestes órgãos (Escudero *et al.*, 1985), poderá atingir valores bastante elevados.

A quantidade de nutrientes carreados pelas soluções resultantes da precipitação influenciará também, embora com um carácter complementar à da acção da folhada, a variabilidade da disponibilidade em nutrientes dos solos sob e fora da acção do copado das árvores de *Q. rotundifolia*, conforme foi constatado por outros autores em estudos análogos a este com a mesma e outras espécies (Rodá *et al.*, 1990; Wolfe *et al.*, 1987; Kretinin, 1993; Seiler & Matzner, 1995). Ainda no que se refere à redistribuição de nutrientes, devemos salientar a circunstância de ao escorrimento ao longo do tronco, não obstante corresponder uma devolução muito inferior àquela devida à precipitação bruta, quando expressa em relação à totalidade da área de coberto, corresponder uma devolução muito elevada quando expressa pela área



**Figura 3** – Mineralização acumulada de N (N [NH<sub>4</sub><sup>+</sup>] + N [NO<sub>3</sub><sup>-</sup>]) *in situ* (kg ha<sup>-1</sup>) no solo, à profundidade de (a) 0-10 cm e (b) 10-20 cm, das áreas sob (SC) e fora (FC) da acção da copa de *Q. rotundifolia*, de Maio de 2001 a Junho de 2002. Os valores correspondem à média (n=5)

efectivamente por ele influenciada (Voight, 1960). Este facto poderá assumir relevância na diferenciação de disponibilidade de nutrientes, principalmente nas áreas próximas do tronco, como está expresso pela elevada quantidade de potássio.

A variabilidade apresentada pelas características do solo com a distância ao tronco da árvore sugere a influência da distribuição de nutrientes pelas soluções da precipitação, bem como do padrão de distribuição espacial da folhada, tal como é referido por Zinke (1962). Além disso, ter-se-á que considerar o efeito exercido pela vegetação herbácea e arbustiva fora e sob a projecção da copa das árvores na expressão das características físico-químicas do solo (Escudero *et al.*, 1985), bem como o devido ao sistema radical dessa vegetação e das próprias árvores (Dahlgren *et al.*, 1997, 2003).

A mineralização acumulada de N foi de 128,62 kg ha<sup>-1</sup> no solo das áreas fora da copa e de 166,69 kg ha<sup>-1</sup> nas áreas do sob coberto, dos quais, e respectivamente, apenas 6,23 e 29,11 kg ha<sup>-1</sup> correspondem à mineralização acumulada entre 10 e 20 cm de profundidade (Figura 3). Embora a mineralização acumulada de N tenha sido ligeiramente superior nas áreas do sob coberto, no final de Março, cerca de 83% do N acumulado tinha sido mineralizado nas duas áreas.

O facto das maiores taxas de mineralização de N terem sido verificadas na profundidade de 0-10 cm está de acordo com o observado em outros estudos de mineralização de N (Patra *et al.*, 1999); todavia Rovira & Vallejo (1997) sugerem que em condições mediterrânicas as elevadas taxas observadas se devem principalmente à grande quantidade e qualidade de matéria orgânica do solo à profundidade de 0-10 cm, que compensarão os constrangimentos pedoclimáticos, que serão menos

importantes ou mesmo inexistentes à profundidade de 10-20cm.

## CONCLUSÕES

Os resultados do presente estudo confirmam que as árvores de *Quercus rotundifolia*, enquanto constituintes de formações de tipo montado, interagem com as áreas do sob coberto de forma semelhante à referida para as formações de tipo savana, localizadas em regiões com características climáticas próximas das verificadas no Sul de Portugal. Nestes sistemas agroflorestais, as azinheiras, mais ou menos isoladas, funcionam como captadores de precipitação e de partículas, redistribuindo-as no sob coberto através do gotejo e do escorrimento ao longo do tronco. Concomitantemente, alteram as condições do microclima, as características físicas e químicas do solo e as taxas dos processos biogeoquímicos nas áreas sob a acção da copa da árvore.

As quantidades de elementos incorporados no sistema através da precipitação bruta foram, de um modo geral, pouco significativas. A quantidade de nutrientes devolvida ao solo através do gotejo teve alguma relevância, nomeadamente para o Ca e K. Já a devolvida pelo escorrimento ao longo do tronco, embora pouco significativa em relação à área da copa, assumiu outra importância, ao considerarem-se diferentes áreas de influência deste fluxo. A diferenciação das características do solo sob coberto relativamente às zonas fora da área de influência da copa deverá estar em correspondência com o padrão de variação espacial da restituição de nutrientes ao solo pelo gotejo e escorrimento ao longo do tronco.

Os indivíduos de *Q. rotundifolia* criam portanto ilhas de acentuada qualidade e

fertilidade do solo, comprovadas por um teor em nutrientes no sob coberto em geral 1,5 a 2 vezes superior ao observado nas áreas adjacentes. Por outro lado, a devolução ao solo de grandes quantidades de matéria orgânica nas áreas do sob coberto, originou uma melhoria considerável na estrutura do solo, com implicações evidentes na permeabilidade e na capacidade de retenção de água do solo.

A circunstância de no sob coberto se verificarem teores em N e C totais do solo mais elevados, características físicas do solo mais favoráveis e características pedoclimáticas diferenciadas, originou que o padrão de variação do teor de N no solo, embora sem diferir de forma apreciável entre o sob coberto e as áreas fora da acção deste, apresentasse teores mais elevados no primeiro do que no segundo. Uma qualidade do substrato mais favorável nas áreas do sob-coberto contribuiu grandemente para a existência de taxas de mineralização mais elevadas.

Os solos do sob coberto funcionam como reservatório de N orgânico que vai sendo lentamente mineralizado, reabsorvido pelas raízes e novamente devolvido ao solo pela folhada. A remoção das azinheiras poderia dar origem a uma ruptura no ciclo do N levando a perdas por lixiviação ou desnitrificação (Jackson *et al.*, 1990).

### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por:

- Programa PRAXIS XXI/ BD/ 18451/ 98
- Projecto INIA/PAMAF-4005-95 - “Ecologia dos montados de *Quercus suber* e *Quercus rotundifolia*: intercepção, transpiração, ciclo de nutrientes e vegetação espontânea”.

- Projecto PRAXIS XXI-3/3.2/Agr/2187/95 - “Processos hídricos, pedológicos e biológicos em montados de *Quercus suber* e *Quercus rotundifolia*”.

- Projecto INIA/PAMAF-8004-97 - “Efeito de acções antrópicas na dinâmica de comunidades em áreas de montado - Relações Solo-Flora-Fauna”.

Agradece-se igualmente a todos aqueles; docentes, investigadores e funcionários, do ISA e da UE, que contribuíram para tornar possível a realização do presente estudo

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, F.B. & Grilo, J.T. 1975. *Carta de Solos da Herdade da Mitra*. Universidade de Évora, Évora (n/publicado).
- Attiwill, P.M. & Leeper, G.W. 1987. *Forest Soils and Nutrient Cycles*. Melbourne University Press, Victoria.
- Baltasar, J.L.; Rego, F.C. & Coutinho, J.M. 1983. *Efeitos do coberto de azinheira (Quercus rotundifolia) na ecologia de pastagens à base de trevo subtterrâneo*. Instituto Universitário de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.
- Bellot, J., Ávila, A. & Rodrigo, A. 1999. Throughfall and stemflow. In F. Rodà, J. Retana, C.A. Gracia & J. Bellot (eds) *Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests*. Ecological Studies 137, pp. 209-222. Springer-Verlag, Berlin.
- Bispo, R.M.B. 2002. *Meteorologia da camada limite e deposição atmosférica numa superfície vegetal (Eucalyptus globulus)*. Dissertação de Doutoramento. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

- Brady, N.C. & Weil, R.R. 1999. *The Nature and Properties of Soils*. 12<sup>th</sup> ed. Prentice-Hall Inc., New Jersey.
- Cortez, N.R.S. 1996. *Compartimentos e ciclos de nutrientes em plantações de Eucalyptus globulus Labill. ssp. globulus e Pinus pinaster Aiton*. Dissertação de Doutoramento. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Dahlgren, R.A., Singer, M.J. & Huang, X. 1997. Oak tree and grazing impacts on soil properties and nutrients in a California oak woodland. *Biogeochemistry*, **39**: 45-64.
- Dahlgren, R.A., Horwath, W.R., Tate, K.T. & Camping, T.J. 2003. Blue oak enhance soil quality in California oak woodlands. *California Agriculture*, **57(2)**: 42-47.
- Dancette, C. & Poulain, J. F. 1969. Influence of *Acacia albida* on pedoclimatic factors and crop yields. *African Soils*, **14**: 143-184.
- Dorich, R.A. & Nelson, D.W. 1983. Direct colorimetric measurement of ammonium in potassium chloride extracts of soils. *Soil Science Society of America Journal*, **47**: 833-836.
- Escudero, A.; Garcia, B., Gomez, J.M. & Luis, E. 1985. The nutrient cycling in *Quercus rotundifolia* and *Quercus pyrenaica* ecosystems («dehesas») of Spain. *Acta Oecologica/Oecologia Plantarum*, **6(20)**: 73-86.
- Feger, K.H., Brahmmer, G. & Zöttl, H.W. 1990. Elements budgets of two contrasting catchments in the Black Forest (Federal Republic of Germany). *Journal of Hydrology*, **116**: 85-99.
- Gauquelin, T., Fromard, F., Badri, W. & Dagnac, J. 1992. Apports d'éléments minéraux au sol par l'intermédiaire de la litière, des pluies et des pluviollessivats dans un peuplement à genévrier thurifère (*Juniperus thurifera* L.) du Haut Atlas occidental (Maroc). *Annales des Sciences Forestières*, **49**: 599-614.
- Gersper, P.L. & Holowaychuk, N. 1970. Effects of stemflow water on a Miami soil under a beech tree: II. Chemical properties. *Soil Science Society of America Proceedings*, **34**: 786-794.
- Giardina, C.P., Ryan, M.G., Hubbard, R.M. & Binkley, D. 2001. Tree species and soil textural controls on carbon and nitrogen mineralization rates. *Soil Science Society of America Journal*, **65**: 1272-1279.
- Gonzalez, G. L. 1995. *La Guía de Incafo de los Árboles y Arbustos de la Península Ibérica*. Las guías verdes de incafo nº 4, 6<sup>ta</sup> ed. Incafo, Madrid.
- Houba, V.J.G., Novozamsky, I. & Tenminghoff, E. 1994. *Soil Analysis Procedures*. Departement of Soil Science And Plant Nutrition, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
- Jackson, L.E., Strauss, R.B., Firestone, M.K. & Bartolome, J.W. 1990. Influence of tree canopies on grassland productivity and nitrogen dynamics in deciduous oak savanna. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **32**: 89-105.
- Joffre, R. & Rambal, S. 1988. Soil water improvement by trees in rangelands of southern Spain. *Acta Oecologica*, **9(4)**: 405-422.
- Kretinin, V.M. 1993. Change in soil properties in the tree trunk zone of forest windbreak belts. *Eurasian Soil Science*, **25**: 88-96.
- Moreno, G., Gallardo, J.F. & Bussotti, F. 2001. Canopy modification of atmospheric deposition in oligotrophic *Quercus pyrenaica* forests of an unpolluted region (central-western Spain). *Forest Ecology and Management*, **149**: 47-60.

- Murphy, J. & Riley, J.P. 1962. A modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, **27**: 31-36.
- Muoghalu, J.I. & Oakhumen, A. 2000. Nutrient content of incident rainfall, throughfall and stemflow in a Nigerian secondary lowland rain forest. *Applied Vegetation Science*, **3**: 181-188.
- Nunes, J.D., Sá, C., Soares-David, T., Madeira, M. & Gazarini, L. 1999. Interação entre o ciclo de nutrientes em montados de *Quercus rotundifolia* Lam. e as características do solo. *Revista de Biologia*, **17**:311-325.
- Nunes, J. D., Sá, C., Soares-David, T., Madeira, M. & Gazarini, L. 2001. Influência de árvores isoladas de *Quercus rotundifolia* Lam. nas características do solo. *Revista de Ciências Agrárias*, **24**:211-226.
- Parker, G.G. 1983. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle. *Advances in Ecological Research*, **13**: 57-133.
- Patra, A.K., Jarvis, S.C. & Hatch, D.J. 1999. Nitrogen mineralization in soil layers, soil particles and macro-organic matter under grassland. *Biology and Fertility of Soils*, **29**: 38-45.
- Paul, K.I., Polglase, P.J., O'Connell, A.M., Carlyle, C.J., Smethurst, P.J. & Khanna, P.K. 2002. Soil nitrogen availability predictor (SNAP): a simple model for predicting mineralization of nitrogen in forest soils. *Australian Journal of Soil Research*, **40**: 1011-1026.
- Raison, R.J., Connell, M.J. & Khanna, P.K. 1987. Methodology for studying fluxes of soil mineral-N *in situ*. *Soil Biology and Biochemistry*, **19**: 521-530.
- Reis, R.M.M. & Gonçalves, M.Z. 1985. Caracterização climática da região agrícola do Alentejo. *O Clima de Portugal*, Fascículo XXXIV, I.N.M.G., Lisboa.
- Rodà, F., Àvila, A. & Bonilla, D. 1990. Precipitation, throughfall, soil solution and stream-water chemistry in a holm-oak (*Quercus ilex*) forest. *Journal of Hydrology*, **116**: 167-183.
- Rovira, P. & Vallejo, V.R. 1997. Organic carbon and nitrogen mineralization under Mediterranean climatic conditions: the effects of incubation depth. *Soil Biology and Biochemistry*, **29**: 1509-1520.
- Ryan, P.J. & McGarity, J.W. 1983. The nature and spatial variability of soil properties adjacent to large forest eucalypts. *Soil Science Society of America Journal*, **47**:286-293.
- Seiler, J. & Matzner, E. 1995. Spatial variability of throughfall chemistry and selected soil properties as influenced by stem distance in a mature Norway spruce (*Picea abies*, Karst.). *Plant and Soil*, **176**: 139-147.
- Serrasolses, I. & Vallejo, V.R. 1999. Soil fertility after fire and clear-cutting. In F. Rodà, J. Retana, C.A. Gracia & J. Bellot (eds) *Ecology of Mediterranean Evergreen Oak Forests*. Ecological Studies 137, pp. 315-328. Springer-Verlag, Berlin.
- Sokal, R.R. & Rolf, F.J. 1995. *Biometry*. 3<sup>rd</sup> ed. W. H. Freeman and Company, New York.
- Sprent, P. 1993. *Applied nonparametric statistical methods*. 2<sup>nd</sup> ed. Chapman & Hall, London.
- Takahashi, A., Sato, K., Wakamatsu, T. & Fujita, S. 2001. Atmospheric deposition of acidifying components to a Japanese cedar forest. *Water, Air and Soil Pollution*, **130**: 559-564.
- Velthorst, E.J. & Van Breemen, N. 1989. Changes in the composition of rain-water upon passage through the cano-

- pies of trees and of ground vegetation in a Dutch oak-birch forest. *Plant and Soil*, **119**: 81-85.
- Veneklaas, E.J. 1990. Nutrient fluxes in bulk precipitation and throughfall in two montane tropical rain forests, Colombia. *Journal of Ecology*, **78**: 974-992.
- Vestgarden, L.S., Selle, L.T. & Stuanes, A.O. 2003. *In situ* soil nitrogen mineralisation in a Scots pine (*Pinus sylvestris*) stand: effects of increased nitrogen input. *Forest Ecology and Management*, **176**: 205-216.
- Vitousek, P.M., Goz, J.R., Grier, C.C., Melillo, J.M. & Reiners, W.A. 1982. A comparative analysis of potential nitrification and nitrate mobility in forest ecosystems. *Ecological Monographs*, **52**: 155-177.
- Vitousek, P.M. & Howarth, R.W. 1991. Nitrogen limitation on land and in the sea-how can it occur?. *Biogeochemistry*, **13**: 87-115.
- Voigt, G.K. 1960. Distribution of rainfall under forest stands. *Forest Science*, **6**: 2-10.
- Wolfe, M.H., Kelly, J.M. & Wolt, J.D. 1987. Soil pH and extractable sulfate-sulfur distribution as influenced by tree species and distance from the stem. *Soil Science Society of America Journal*, **51**: 1042-1046.
- Zinke, P.J. 1962. The pattern of influence of individual forest trees on soil properties. *Ecology*, **43** (1): 130-133.