

Distribuição horizontal e vertical da fertilidade do solo e das raízes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cultivar Catuaí

Antonio Carlos Vargas Motta^{1*}, Josef Andreas Nick², Glaucia Tiemi Yorinori² e Beatriz Monte Serrat¹

¹Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Rua dos Funcionários, 1540, 80035-050, Juvevê, Curitiba, Parana, Brasil. ²Universidade Federal do Paraná (UFPR). *Autor para correspondência. e-mail: mottaacv@ufpr.br

RESUMO. Avaliou-se a distribuição horizontal e vertical das raízes e da fertilidade do solo, em lavoura de café (*Coffea arabica* L. cv Catuaí Amarelo), com 11 anos de idade, em Tomazina, PR. Amostras de material de solo e de raiz foram coletadas nas camadas de 0-0,05; 0,05-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m de profundidade, em cada perfil (dossel - DO, faixa de adubação - FA e Centro da Entrelinha - CE). Intensa acidificação foi observada na FA, na profundidade de 0-0,4 m. Maior teor de K foi observado nos perfis de FA e CE. Maiores valores de matéria orgânica, CTC e P foram observados no CE, devido à prática da arruação. A participação das raízes finas (<1mm), raízes médias (1-3mm) e raízes grossas (>3mm) no comprimento total de raízes foi de 97,8; 1,9 e 0,3%, respectivamente. Aproximadamente 68,4; 15,3 e 16,3% do total do comprimento radicular localizou-se, respectivamente, no DO, FA e CE, enquanto que 22,9; 40,2, 23,6 e 13,3% localizou-se na primeira, segunda, terceira e quarta camadas. A relação entre a química do solo e a morfologia radicular também foi apresentada.

Palavras chaves: *Coffea arabica* L., sistema radicular, adubação, acidificação do solo, lixiviação de nutrientes.

ABSTRACT. Horizontal and vertical distribution in soil fertility and roots in a coffee (*Coffea arabica* L.) Catuai cultivar. An experiment was carried out to compare horizontal and vertical distribution of roots and soil fertility in a 11-year-old coffee plantation (*Coffea arabica* L. cv Catuai amarelo) in the municipality of Tomazina, State of Paraná, southern Brazil. Soil and root samples were collected at depths of 0-0.05, 0.05-0.2, 0.2-0.4, and 0.4-0.6 m under each horizontal zone (CA-canopy, FS-Fertilization and MR-middle of rows). Intense soil acidification was observed in the FS area for 0-0.4 m depth. Higher K content was observed in the FS and MR, compared to CA zone. Higher values for soil organic matter, CEC, and P were observed in the MR, due to management practices. The contribution of fine roots (<1 mm), median roots (1-3 mm), and coarse roots (>3 mm in diameter) to total root length was 97.8, 1.9, and 0.3%, respectively. Approximately 68.4, 15.3 and 16.3% of total root length were located in the respective CA, FS, and MR zones, while 22.9, 40.2, 23.6 and 13.3% of total root length were within the first, second, third and fourth depth increments, respectively. Root distribution and morphology in relation to soil chemical properties were also evaluated.

Key words: *Coffea arabica* L., root system, fertilization, soil acidification, nutrient leaching.

Introdução

Os insucessos na avaliação da fertilidade do solo em cafezais, estabelecidos por vários anos, são frequentes e os resultados analíticos sugerem condições de fertilidade e de nutrição que muito diferem daquelas demonstradas pela cultura. As causas estão estreitamente relacionadas à distribuição variada do sistema radicular, da fertilidade do solo e aos locais em relação à planta de onde são coletadas as amostras de solo (Novotny *et al.*, 1994).

Em cafezais de vários anos de cultivo, definem-se faixas de solo de condições de fertilidade distintas, a distâncias e as profundidades variadas em relação à linha de plantio e manejo, fato evidenciado nos trabalhos de Miguel *et al.* (1994), Novotny *et al.* (1994) e Rajj *et al.* (1995). Na faixa do solo adubada, de onde é normalmente coletada a amostra de solo (Malavolta, 1986; Rajj *et al.*, 1996), são marcantes a acidificação, o aumento da concentração de Al^{3+} e a lixiviação de bases, em relação aos locais adjacentes não adubados (Novotny *et al.*, 1994), o que conduz a questionamentos sobre o comportamento qualitativo e quantitativo do sistema radicular e a representatividade do sistema de amostragem de solo para fins de diagnose e recomendação de adubação e de calagem para os cafezais.

Por sua vez, a distribuição do sistema radicular na lavoura de café, diante da referida variação espacial de parâmetros químicos do solo, é pouco conhecida. Em ambientes ácidos, as raízes absorventes estão em menor presença (Nutman, 1933a) e, em subsolo muito ácido, raízes chegam a confinar-se numa camada superficial (Nutman, 1933a; Rena e Maestri, 1986). Teores altos de Al^{3+} , associados à acidez, promovem raízes laterais menores, de maior diâmetro e em menor número em relação às de cafeeiros normais (Pavan, 1982). Já o conteúdo de matéria orgânica e a aeração relacionam-se diretamente com a máxima concentração de radículas (Guiscafré-Arrillaga e Gómez, 1938; Sylvain, 1959). A textura do solo e a concentração dos principais nutrientes, segundo Guiscafré-Arrillaga e Gómez (1938), não afetam o crescimento radicular. Segundo Sylvain (1959), contudo, ao citar vários autores, o sistema radicular responde diretamente à fertilização mineral e orgânica, especialmente para o nitrogênio. Temperatura do solo, que é afetada diretamente pela cobertura morta e dossel, também tem grande influência no crescimento radicular (Franco, 1958; Sylvain, 1959).

O objetivo deste estudo foi avaliar a distribuição lateral e em profundidade em relação à linha de plantio, de características químicas do solo e do sistema radicular, interpretando os resultados com

base no histórico da lavoura, na justificativa de obterem-se informações básicas para aprimorar as técnicas de diagnose, de recomendação de adubação e de manejo do solo em lavouras de café.

Material e métodos

As coletas de raízes e de material de solo foram realizadas no ano agrícola de 1994, em cafezal no Município de Tomazina, região Norte do Estado do Paraná, situada na latitude 23,6502° S e longitude 50,0105° W. O clima da região é do tipo Cfa, mesotérmico, sem estação seca, com verões quentes e com média do mês mais quente superior a 22°C, altitude 550 m. A lavoura de café (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí Amarelo) tem 11 anos de cultivo, produtividade de 2.160 kg ha⁻¹ de café beneficiado, média de nove safras. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrofico, textura argilo-siltosa (44% argila, 42% silte) e topografia com 5% de declividade. O espaçamento de plantio era de 3,65m x 1,60m, com 2 mudas por cova, com as linhas em nível, mecanizável. A adubação média anual por hectare foi de 330 kg N (95% na forma amídica e 5% na forma nítrica), 237 kg K₂O na forma de KCl e 25 kg P₂O₅ na forma de Superfosfato Simples. Desde a implantação, a área da lavoura não recebeu calcário. Os adubos nitrogenados e potássicos sempre foram distribuídos manualmente numa faixa de aproximadamente 0,35 m de largura ao redor da projeção do dossel das plantas e parceladas em 6 aplicações anuais. O adubo fosfatado era lançado sob o dossel, com implemento tratorizado, numa única aplicação anual após a colheita. Precedendo a colheita, fazia-se a arruação (arrastamento de folhas caídas sob a copa para o centro da entrelinha). No ano agrícola de 1992, no mês de Setembro/92, 1 ano e 5 meses antes da coleta de material para este estudo, foram efetuados podas de rebaixamento do tronco — de 2,5 m para 1,3 m de altura — e poda parcial dos ramos plagiotrópicos, também denominado “*esqueletamento*”. Todo material vegetal podado (troncos, ramos e folhas) foi desintegrado mecanicamente e distribuído nas entrelinhas da lavoura.

Quando da coleta das raízes e de material de solo para análises, a lavoura encontrava-se visualmente homogênea, em pleno estágio vegetativo, com vigorosa ramificação, perfeito enfolhamento, frutos ainda verdes, no início do estágio de granação e com carga pendente de aproximadamente 4.200 kg ha⁻¹ de café beneficiado. Desde o início da primavera, essa lavoura já havia sido adubada com 300 kg ha⁻¹ de N (uréia) e 200 kg ha⁻¹ de K₂O (KCl), parcelados em 3 aplicações. Três semanas antes da coleta de raízes,

capinou-se a entrelinha de forma a provocar a morte das raízes das plantas daninhas. Sob o dossel dos cafeeiros, havia uma camada de 0,05 a 0,15 m de espessura de folhas mortas, acumuladas desde a última colheita que foi efetuada 2 anos antes.

A coleta das amostras constituiu-se da abertura de 7 trincheiras, distribuídas, ao acaso, na área da lavoura e perpendiculares ao sentido das linhas de plantio, desde o tronco até o centro da entrelinha, medindo 2,0 m de comprimento, 0,7 m de largura e 0,7 m de profundidade. Coletaram-se amostras de raízes e de solo, em 3 locais e 4 profundidades, conforme mostra a Figura 1. Os locais de amostragem situaram-se a partir da linha de plantio: (i) **dossel (DO)**, sob a copa das plantas, a aproximadamente 0,5 m do tronco, representando cerca de 60% da área total, coincidindo com o local de distribuição do adubo fosfatado; (ii) **faixa de adubação (FA)**, no perímetro do dossel, com aproximadamente 0,35 m de largura, representando cerca de 20% da área total, que suporta o rodado do trator e recebe os adubos nitrogenados e potássicos, estando exposta ao sol, livre de cobertura vegetal; (iii) **centro da entrelinha (CE)**, representando cerca de 20% da área total, local de depósito em superfície do material orgânico proveniente da arruação, de podas e de plantas daninhas, que se desenvolviam durante pelo menos 6 meses ao ano nesse local. As profundidades de amostragem foram: **0-0,05 m** (primeira camada), **0,05-0,2 m** (segunda camada), **0,2-0,4 m** (terceira camada) e **0,4-0,6 m** (quarta camada).

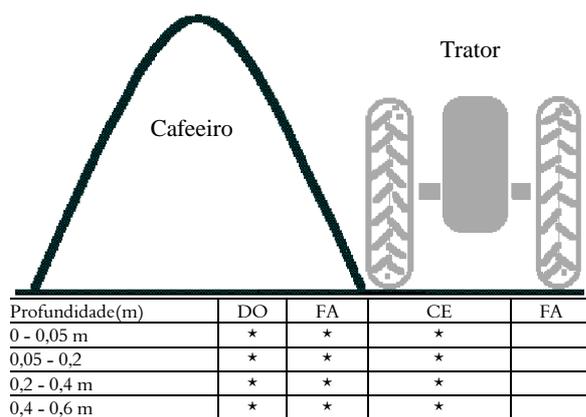


Figura 1. Representação esquemática dos 3 locais e 4 profundidades de coleta de amostras de raiz e de solo em lavoura de *Coffea arabica* L. cv. Catuaí amarelo, de 11 anos de cultivo, em Tomazina, Estado do Paraná. DO = dossel, 60% da área; FA = faixa de adubação, 20% da área; CE = centro da entrelinha, 20% da área. (*) posição relativa dos pontos de amostragem de solo e raízes.

As raízes foram coletadas por meio de um cubo com chapas de aço, sem os lados basal e frontal, obtendo-se monólitos com base de 0,175 m x 0,175 m. Cada monólito foi transferido em saco plástico poroso e mergulhado em água por 2 dias para desagregar o solo. Posteriormente, despejou-se a amostra em peneira de malha de 2 mm e, imerso na água em um tanque e com movimentos verticais suaves, peneirou-se até obter, sem perdas visíveis, as raízes livres de terra. Após serem enxaguadas em água limpa, as raízes foram separadas das impurezas, fixadas em álcool (50%), acondicionadas em sacos de polipropileno e armazenadas sob refrigeração para posterior análise em laboratório.

As raízes foram separadas em 3 classes de diâmetro, definidas por prévia avaliação do aspecto morfológico: **(RF)** raízes finas, menor que 1 mm; **(RM)** raízes médias, de 1 a 3 mm; e **(RG)** raízes grossas, maior que 3 mm. As RF, RM e RG correspondiam, respectivamente, às raízes absorventes, raízes suporte das absorventes e raízes permanentes, descritas por Nutman (1933b). Em cada uma das 3 classes de raízes determinaram-se a densidade de massa da matéria fresca (**DF**, mg dm⁻³ solo), densidade de massa da matéria seca (**DS**, mg dm⁻³ solo) e densidade de comprimento (**DC**, cm dm⁻³ solo). As medidas de massa da matéria seca foram feitas após permanência das raízes, por 48 horas, em estufa de circulação de ar forçada a 65^o C. O comprimento foi determinado pelo método de contagem do número de interseções das raízes com as linhas de um plano reticulado em 1 x 1 cm (Tennant, 1975). Além da classificação das raízes por diâmetro, aspectos qualitativos de tenrura e lenhificação, relacionados ao potencial de absorção radicular, foram definidos pelos valores de: **Comprimento Específico** das raízes (cm g⁻¹), determinado pela razão entre comprimento e a massa seca; e **MS** (%), percentagem de massa seca na massa fresca.

Adjacente a cada monólito, coletou-se uma fatia de solo em cuja fração de terra fina seca ao ar (T.F.S.A.) foram analisados: **pH** (CaCl₂), **Al³⁺**, **Ca²⁺**, **Mg²⁺** (KCl), **H⁺ + Al³⁺** (SMP), **K⁺** (Mehlich-1), **P** (Mehlich-1) e **C** (Walkley-Black), segundo metodologia descrita em Iapar (1991).

Os dados foram submetidos a análises de variância e de regressão, baseando-se no delineamento de 7 blocos ao acaso (trincheiras) com 12 parcelas distribuída sistema fatorial (3 locais x 4 profundidades), adotando-se o teste de Tukey para a comparação das médias, ao nível de

5% de probabilidade.

Resultados e discussão

Avaliação dos parâmetros químicos do solo

Os resultados das análises químicas de material de solo estão apresentados nas Tabelas 1 e 2. Observa-se que houve interação entre os locais e as profundidades de amostragem para todos os parâmetros químicos analisados, exceto para o K^+ trocável.

A lixiviação de bases (Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis) e a acidificação do solo, interpretada por pH, Al^{3+} e V(%), ficou evidenciada na FA nas duas camadas de 0-0,2 m, atribuídas à adição de ânions muito móveis ao solo, tais como o Cl^- , SO_4^{2-} e NO_3^- e ao efeito acidificante dos fertilizantes, fato também relatado por Novotny *et al.* (1994).

Tabela 1. Análise de variância para características químicas do solo coletado em uma lavoura de *coffea arabica* Catuaí Amarelo, de 11 anos de cultivo, em Tomazina, Estado do Paraná.

FV	pH				Al			V (%)		
	GL	QM	F	P(F) %	QM	F	P(F) %	QM	F	P(F) %
Bloco	6	0,40	7,2	0,001	3,43	6,3	0,003	651	6,6	0,002
Local	2	1,59	28,5	0,000	5,76	10,5	0,011	1904	19,3	0,000
Profundidade	3	1,18	21,1	0,000	35,26	64,4	0,000	6498	65,9	0,000
Interação	6	0,38	6,8	0,001	1,96	3,6	0,387	544	5,5	0,011
Resíduo	66	0,06			0,55			99		
CV (%)		5,1			49,3			21,1		
FV	K				Ca			Mg		
	GL	QM	F	P(F) %	QM	F	P(F) %	QM	F	P(F) %
Bloco	6	0,13	1,6	17,583	12,2	8,4	0,000	0,33	1,5	18,771
Local	2	0,76	9,4	0,026	43,1	29,9	0,000	1,83	8,3	0,059
Profundidade	3	3,66	45,1	0,000	130,2	90,4	0,000	8,72	39,6	0,000
Interação	6	0,14	1,8	11,640	7,6	5,3	0,017	0,60	2,7	1,939
Resíduo	66	0,08			1,4			0,22		
CV (%)		37,8			26,9			28,7		
FV	P				C			CTC		
	GL	QM	F	P(F) %	QM	F	P(F) %	QM	F	P(F) %
Bloco	6	776,2	1,3	25,206	0,60	4,8	0,043	2,0	1,9	9,980
Local	2	4216,3	7,3	0,139	6,21	49,4	0,000	13,9	13,1	0,002
Profundidade	3	14177,5	24,5	0,000	27,23	216,6	0,000	121,6	114,9	0,000
Interação	6	1333,2	2,3	4,445	3,00	23,8	0,000	4,2	4,0	0,179
Resíduo	66	579,1			0,13			1,1		
CV (%)		113			18,8			7,4		

Tabela 2. Composição química média de material de solo coletado em 3 locais e em 4 profundidades, em lavoura de *Coffea arabica* cv. Catuaí amarelo, de 11 anos de cultivo, em Tomazina, Estado do Paraná.*

Profundidade m	Local						Local												
	DO		FA		CE		DO		FA		CE								
	pH (CaCl ₂)						Al ³⁺ (mmol _c dm ⁻³)						V (%)						
0-0,05	5,06	a	4,36	b	4,79	a	1,4	a	8,0	a	1,6	a	71,8	a	a	49,8	b	69,9	a
0,05-0,2	5,03	a	4,29	b	5,06	a	1,6	b	15,4	a	1,3	b	63,1	a	a	42,9	b	69,1	a
0,2-0,4	4,39	b	4,36	b	4,79	a	25,7	a	19,9	a	9,7	b	30,4	b	b	39,2	b	52,1	a
0,4-0,6	4,17	a	4,23	a	4,41	a	36,6	a	31,7	a	27,3	a	18,0	b	b	25,7	a	31,9	a
	K ⁺ (mmol _c dm ⁻³)						Ca ²⁺ (mmol _c dm ⁻³)						Mg ²⁺ (mmol _c dm ⁻³)						
0-0,05	13,1	b	14,5	a	11,8	a	77	b	49	c	94	a	27	a	a	17	b	26	a
0,05-0,2	5,9	b	8,7	a	10,1	a	58	a	38	b	72	a	20	ab	ab	16	b	23	a
0,2-0,4	2,1	b	6,1	a	7,1	a	22	b	31	ab	42	a	11	a	a	12	a	15	a
0,4-0,6	1,4	b	4,6	a	5,0	a	12	a	16	a	25	a	8	a	a	9	a	11	a
Média pond.	3,7	B	7,0	A	7,5	A							8	a	a	9	a	11	a
	P (mg dm ⁻³) (Mehlich)						C (g dm ⁻³)						CTC (pH 7) (mmol _c dm ⁻³)						
0-0,05	47,3	b	43,1	b	80,7	a	25	b	28	b	51	a	163	b	b	161	b	188	a
0,05-0,2	5,0	b	11,1	b	55,1	a	18	a	20	a	21	a	133	b	b	147	a	152	a
0,2-0,4	1,7	a	1,6	a	3,6	a	12	a	10	a	13	a	113	b	b	127	a	122	a
0,4-0,6	1,6	a	1,7	a	2,1	a	8	a	9	a	12	a	118	a	a	120	a	121	a

(*) Comparações entre locais, em cada profundidade. (Tukey, P<0,05; n=7); DO=dossel; FA=faixa de adubação; CE=centro da entrelinha. .

Na camada inferior, de 0,2-0,4 m, o DO e a FA passaram a ser, igualmente, ácidos (pH, Al^{3+} e V%), possivelmente como resultado da atividade da maior densidade de raízes do DO (Figura 2) e da acidificação pelos adubos na FA. O mesmo efeito da acidificação, provocada pelo sistema radicular, foi confirmado na camada inferior, de 0,4-0,6 m que apresentou menores valores de V% no DO. Nessa última camada, as diferenças de pH e Al^{3+} entre os locais desapareceram, visto que a acidificação, em geral, é proveniente do processo de nitrificação, sendo as maiores diferenças concentradas nas primeiras camadas, como mostrado por Pavan *et al.* (1995).

Embora a adubação potássica fosse efetuada apenas na FA, os teores de K^+ foram superiores também no CE, além da FA, efeito constatado também por Rajj *et al.* (1995). Os altos teores de K^+ no CE são atribuídos a quatro fatores: (i) menor extração pela baixa densidade de raízes no CE (Figura 2); (ii) ação das plantas daninhas, que absorvem nutrientes da FA e transferem-nos para o CE com a senescência de suas folhas; (iii) baixa capacidade de infiltração da água na FA somada a elevada precipitação interna nesse local (efeito “guarda-chuva”), o que favorece o escoamento superficial que pode carregar parte do K^+ do adubo reagido da FA para o CE, que tem melhor capacidade de infiltração; (iv) carreamento das folhas e demais resíduos com elevado teor de K quando da arruação.

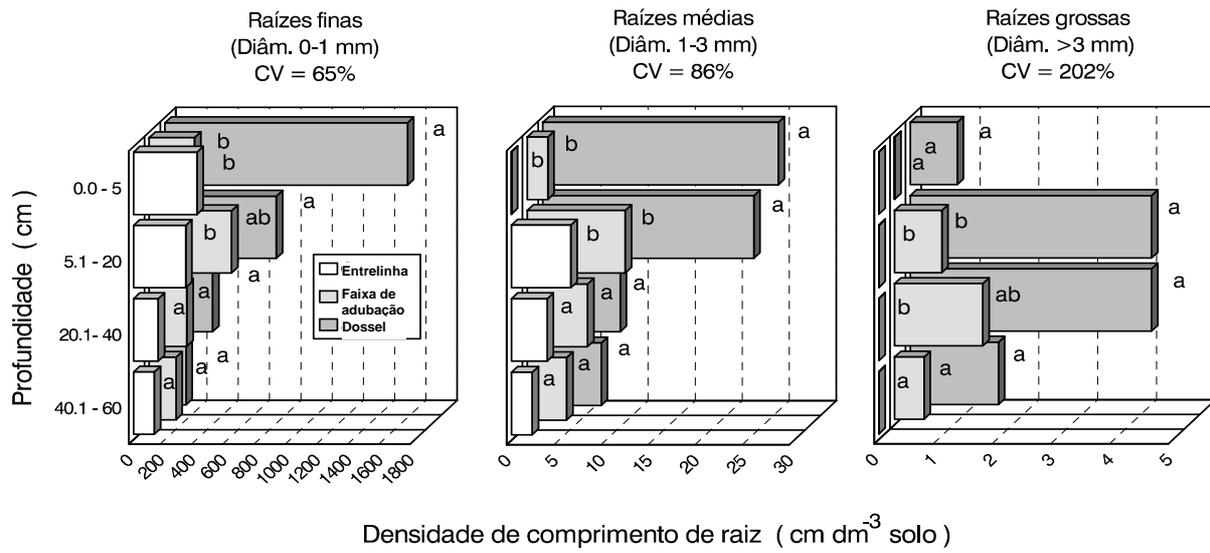


Figura 2. Densidade de comprimento de raízes no perfil do solo, para 3 classes de diâmetro de raiz, em lavoura de *Coffea arabica* L. cv. Catuaí amarelo, de 11 anos de cultivo, em Tomazina, Estado do Paraná. (Comparações de médias entre locais, em cada profundidade; Tukey, $P < 0,05$; $n = 7$).

Observou-se um padrão do gradiente de teores de K^+ no perfil do solo de cada local, observado por meio da relação percentual entre o teor de K^+ da última camada em relação à primeira, que foi igual a 11, 32 e 42%, no DO, FA e CE, respectivamente. No DO, o gradiente foi o mais abrupto. Sem receber adubações potássicas diretas, os altos teores de K^+ de 0-0,05 m no DO foram mantidos provavelmente pela lavagem desse nutriente do dossel da própria planta e da queda das folhas. A queda abrupta dos teores nas camadas seguintes reflete o efeito da elevada densidade radicular (Figura 2) na ciclagem desse nutriente. Nos demais locais, ficou evidenciado o enriquecimento em K^+ até a camada mais profunda (0,4-0,6 m), com teores classificados como muito altos e altos (Raij, 1991), na FA e CE, respectivamente, cujas prováveis causas são a adubação concentrada em faixa estreita de solo, associada à relativa baixa densidade radicular (Figura 2).

O decréscimo nos teores em profundidade foi ainda mais acentuado para o P, que atingiu faixas de teores baixos e muito baixos (Comissão de Fertilidade do Solo - RS/SC, 1994) logo a partir de 0,2-0,4 m, em todos os locais, comparáveis às condições naturais desse solo. Apesar de o adubo fosfatado ter sido lançado no DO, maiores teores de P foram encontrados no CE, nas duas camadas superiores (0-0,05 e 0,05-0,2 m), indicando um possível arrastamento de grânulos de adubo e de solo enriquecido do DO para o CE, pela operação de arruação.

Maiores valores de C ($g\ dm^{-3}$) e de CTC (pH 7,0)-T foram observados também no CE, na profundidade de 0-0,05 m, justificados pela adição de material proveniente das plantas daninhas (Pavan *et al.*, 1995), das podas e da operação de arruação. No DO, apesar da intensa adição natural de folhas senescentes durante o ano todo, os baixos valores de C ($g\ dm^{-3}$) significam baixa mineralização da matéria orgânica, atribuído a vários fatores, tais como: (i) temperatura mais amena sob a sombra do dossel; (ii) provável maior consumo de água pelas raízes em alta densidade (Figura 2); (iii) alta relação C/N do meio em função da concorrência das raízes superficiais pelo N e da não-adubação desse nutriente nesse local; (iv) resíduo de fungicidas cúpricos aplicados às folhas (Pavan *et al.*, 1994).

Avaliação do sistema radicular

A análise das relações de comprimento e massa das raízes (Tabela 3) indica que quase a totalidade do comprimento do sistema radicular (97,8%) tem sua origem nas raízes finas, o que não ocorre com

massa, em que sua participação cai para 45,2%. Ao contrário das raízes finas, as raízes grossas contribuem com 0,26% do comprimento e 35,1% da massa. Tal resultado é dado pelo elevado **Comprimento Específico** das raízes finas em comparação com as raízes grossas (Tabela 4). Dentro de cada classe de diâmetro de raízes, puderam ser quantificadas subvariações do diâmetro mediante dos valores de comprimento específico de raízes e da percentagem de massa da matéria seca na matéria fresca (Tabela 4).

Tabela 3. Contribuição de cada classe de diâmetro de raiz sobre o comprimento e a massa seca total das raízes de *Coffea arabica* cv. Catuaí amarelo, em lavoura de 11 anos de cultivo, em Tomazina, Estado do Paraná. (n=80)

	R. Finas Ø < 1mm	R. Médias Ø 1-3 mm	R. Grossas Ø > 3 mm
Comprimento	97,85 %	1,89 %	0,26 %
Massa Seca	45,17 %	19,74 %	35,09 %

Tabela 4. Médias de comprimento específico ($cm\ g^{-1}$) e relação entre a massa seca e a massa fresca (MS/MF, %) de raízes, em 3 locais e 4 profundidades, para 3 classes de diâmetro de raiz de *Coffea arabica* cv. Catuaí amarelo, em lavoura de 11 anos de cultivo, em Tomazina, Estado do Paraná.*

	Profundidade (m)	Raízes Finas Ø < 1mm			Raízes Médias Ø 1-3 mm			Raízes Grossas Ø > 3 mm		
		DO	FA	CE	DO	FA	CE	DO	FA	CE
Comprimento	0-0,05	2.887	2.619	3.424	188	248	-	28	-	-
Específico	0,05-0,2	2.887	2.392	3.108	107	152	175	10	16	-
	0,2-0,4	2.278	2.435	3.012	91	118	168	9	21	-
	0,4-0,6	2.149	3.191	3.456	159	179	150	15	29	-
MS/MF	0-0,05	28,0	22,3	21,7	36,9	36,3	-	36,9	-	-
	0,05-0,2	31,5	24,5	23,4	39,0	35,3	32,8	40,7	37,1	-
	0,2-0,4	28,6	27,1	26,6	37,8	38,7	37,9	40,2	35,6	-
	0,4-0,6	31,8	25,5	25,5	39,3	34,2	37,5	37,9	37,1	-

* Médias referem-se a um número variado de observações, de 2 até 7. DO=Dossel; FA=Faixa de adubação; CE=Centro de rua.

Na avaliação do sistema radicular, observou-se interação entre local e profundidade de amostragem quanto à densidade de comprimento (DC) das raízes finas (RF), raízes médias (RM) e raízes grossas (RG) (Figura 2).

As maiores densidades de comprimento ($cm\ dm^{-3}$) de raízes finas (RF) e médias (RM) foram encontradas no DO, de 0-0,05 e 0,05-0,2 m (Figura 2). Nos locais seguintes, FA e CE, os valores de densidades de comprimento de RF e RM foram abruptamente menores, com causas distintas: na FA atuaram as adversidades do ambiente edáfico para as raízes, enquanto no CE, a diminuição natural da DC ocorreu em função da distância do tronco.

Na FA, tanto as RF como as RM existentes de 0-0,2 m apresentavam-se achatadas, grossas, escuras, suberificadas, com ramificações curtas e grande incidência de raízes mortas em relação aos demais locais. Essas anomalias podem ter sido causadas por

diversos fatores relacionados ao manejo cultural, dentre eles: (i) a acidificação intensa do solo (Nutman, 1933a; Miguel *et al.*, 1994; Novotny *et al.*, 1994); (ii) efeito salino dos fertilizantes; (iii) toxidez por excesso de amônia da adubação; (iv) efeito tóxico do Al^{3+} (Pavan, 1982); (v) compactação do solo (Nutman, 1933a; Küpper *et al.*, 1977), causada pela pressão do rodado do trator; (vi) altas temperaturas (Franco, 1958, 1974); (vii) rápido ressecamento do solo. O efeito maléfico dos dois últimos fatores foi acentuado pela manutenção da superfície do solo da FA sempre livre de cobertura vegetal.

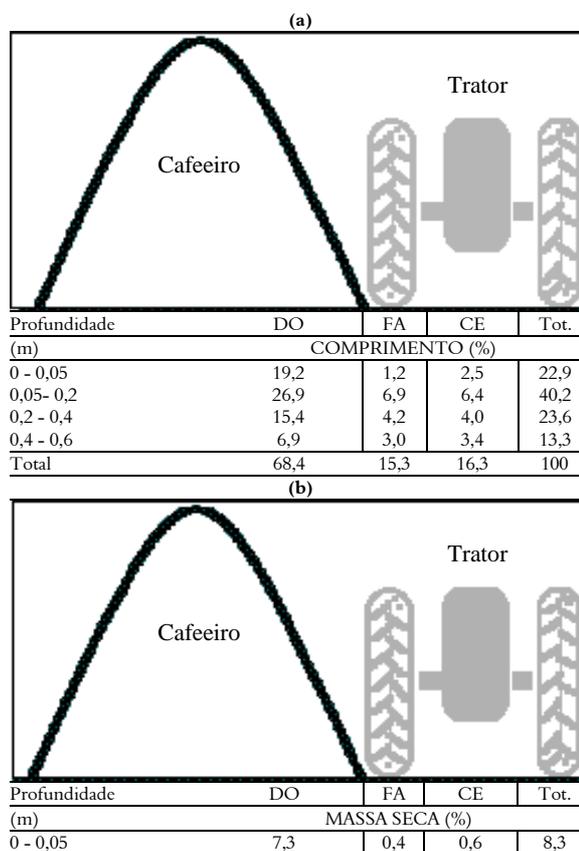
No CE, de 0-0,2 m, embora a densidade de comprimento das RF e RM fosse menor que no DO, as mesmas apresentaram coloração mais clara, consistência mais tenra e aspecto menos suberificado que as da FA e DO, além da tendência de possuírem maiores valores de Comprimento Específico e menores de MS (%) (Tabela 4). Esses indicadores sugerem que as raízes do CE estavam em crescimento mais ativo, portanto, segundo observações de Sylvain (1959), com zonas de absorção de água mais eficientes. Essas raízes devem ser, por isso, mais aptas a aproveitar as adubações do que as raízes da própria FA. No CE, com todos os parâmetros químicos analisados favoráveis ao desenvolvimento de plantas (Tabela 2) e também com aparente aspecto físico, pode-se suspeitar que o principal fator químico limitante para o maior desenvolvimento seja a disponibilidade de nitrogênio, de acordo com observações de Sylvain (1959). Essa hipótese é reforçada pelo histórico da lavoura de não-adubação com N e pela elevada competitividade das plantas daninhas nesse local.

No DO, as raízes das RF revelaram um constante aumento do calibre em profundidade, detectado por meio da tendência de diminuição do Comprimento Específico e aumento da MS (%) (Tabela 4). Observou-se, visualmente também, o crescimento ascendente das RM da segunda para a primeira camada no DO e FA, quantificado pelos acréscimos no Comprimento Específico das raízes na primeira camada. A ausência de RM no CE de 0-0,05 m é explicada pelo corte sofrido com a prática do sulcamento raso, realizado anualmente para facilitar a incorporação do material orgânico da arruação. Verificou-se visualmente a brotação na extremidade das RM cortadas, capacidade do cafeeiro descrita por Nutman (1933a).

As raízes grossas (RG) predominaram no DO e FA de 0,05-0,4 m. A ausência de RG na FA de 0-0,05 m e em todas as profundidades do CE está dentro dos padrões do sistema radicular típico do cafeeiro, descrito por Nutman (1933a, b, 1934).

Nas duas últimas camadas (0,2-0,6 m) ficou evidenciada a tendência de decréscimo natural da densidade de comprimento das três classes de raízes no sentido DO, FA e CE, sugerindo que nessas camadas mais profundas as interferências do manejo cultural realizado na superfície foram minimizadas.

A Figura 3 indica que uma grande parte da fração das raízes da lavoura está no DO, de 0-0,2 m, que representa cerca de 20% do volume total avaliado. Abriga, contudo, 46% do comprimento total das raízes. Já a FA e o CE, contribuindo cada um com aproximadamente 20% do volume total, participaram com frações de raízes menores, semelhantes, porém, entre si. Tal fato parece favorável ao CE, estando, pois, mais distante do tronco, deveria ter menos raízes que a FA. Além disso, as raízes do CE, de 0-0,2 m, tinham um aspecto de capacidade de absorção nitidamente superior a qualquer outro local, caracterizado por RF de coloração mais clara, consistência mais tenra (Tabela 4) e menos suberificadas, em relação ao DO e FA. Isso pode indicar que essas raízes estavam com um crescimento mais ativo e, provavelmente, com zonas de absorção de água mais eficientes, de acordo com Sylvain (1959), levando a crer que essas raízes estariam mais aptas a aproveitar as adubações do que as da própria FA.



0,05- 0,2	33,5	3,6	2,5	39,6
0,2 - 0,4	35,0	3,9	1,7	40,6
0,4 - 0,6	8,4	1,7	1,4	11,5
Total	84,2	9,6	6,2	100

Figura 3. Distribuição percentual estimada do comprimento (a) e da massa seca (b) de raízes do cafeeiro no perfil do solo, até 0,60 m de profundidade, em lavoura de *Coffea arabica* L. cv. Catuaí amarelo, de 11 anos de cultivo, em Tomazina, Estado do Paraná. (n=7).

Obteve-se relação linear entre comprimento das raízes finas (diâmetro 0-1 mm) e massa da sua matéria seca ou fresca. Assim, obtém-se, a partir da massa da matéria seca: [Comprimento raiz fina (cm) = $-9,79 + 2,731 \times$ matéria seca raiz fina (mg), $R^2 = 0,87$]; ou a partir da massa da matéria fresca, [Comprimento raiz fina (cm) = $-19,38 + 0,725 \times$ matéria fresca raiz fina (mg), $R^2 = 0,87$].

Relação entre sistema radicular e os parâmetros químicos

A tentativa de estimar o crescimento radicular (DC de RF) em determinado sítio do solo (local vs profundidade), em função de múltiplos parâmetros químicos, por meio da análise de regressão multivariada, não teve êxito. Tal fato está em concordância com os relatos de Guiscafré-Arrillaga e Gómez (1938) e pode ter duas causas: (i) os parâmetros químicos avaliados representaram apenas uma pequena parcela do conjunto de fatores que interferem sobre o desenvolvimento radicular; (ii) a densidade de raízes medida é apenas um retrato da condição do sistema radicular no exato momento da amostragem, podendo estas estar em crescimento ativo ou paralisado, ou mesmo em morte descendente, sem que a fertilidade do solo seja diretamente responsável por isso. Principalmente as RF variam muito por morte e regeneração, em busca do equilíbrio com a parte aérea (Miguel *et al.*, 1984). Causas comuns para os desequilíbrios, entre a parte aérea e as raízes, são a poda da parte aérea (Miguel *et al.*, 1984), morte descendente de ramos, causada por superprodução (Nutman, 1933a; Rena e Maestri, 1986) e a desfolhas, relacionadas a adversidades climáticas, pragas, doenças e desnutrição.

Como alternativa para relacionar a fertilidade do solo ao desenvolvimento radicular, elaborou-se a Tabela 5, que apresenta coeficientes de correlação entre DC de RF e parâmetros químicos. As DC de RF correlacionaram-se positivamente com valores de pH, Ca^{2+} , K^+ , P, C e T e, negativamente, com os de Al^{3+} e a profundidade de amostragem, com a qual apresentou a melhor correlação. A profundidade de amostragem, portanto, foi o parâmetro individual que mais bem expressou o efeito conjunto de todos

os parâmetros avaliados sobre o desenvolvimento radicular do cafeeiro.

Neste estudo, as informações obtidas das amostras coletadas no DO, FA e CE, nas profundidades de 0-0,2 e 0,2-0,4 m, individualmente, foram indispensáveis. Diante da grande heterogeneidade de distribuição da fertilidade do solo (Tabela 2), dos erros na determinação da dosagem e local de aplicação de corretivos e, possivelmente, de fertilizantes, resultante do uso do sistema tradicional de amostragem na faixa adubada, conclui-se que as coletas de amostras de solo devem ser mais detalhadas, permitindo que se chegue a diagnósticos mais seguros para orientar nas decisões sobre quais fontes e quais dosagens de fertilizantes e corretivos utilizar, onde e como distribuí-los, além de fornecer outras informações básicas para o manejo cultural. Naturalmente, o nível de detalhamento e a frequência de amostragem deverão ser mais bem estudados para as diferentes idades e espaçamentos de plantio e manejo de lavouras de café.

Tabela 5. Coeficientes de correlação (r) entre a densidade de comprimento de raízes finas observada e a estimada (Y) através de parâmetros de solo (X), segundo dois modelos matemáticos, envolvendo um ou mais locais de amostragem, em lavoura de *Coffea arabica* cv. Catuaí amarelo de 11 anos de cultivo, em Tomazina, Estado do Paraná. ($P < 0,05$).

LOCAL	n	pH*	Al^{3+} *	Ca^{2+} **	K^+ **	P**	C**	T*	Prof.*
DO	28	0,63	-0,74	0,80	0,65	0,74	0,85	0,78	-0,92
FA	25	n.s.	-0,43	n.s.	0,44	0,51	0,65	0,49	-0,71
CE	27	n.s.	-0,47	0,52	n.s.	0,48	0,41	0,43	-0,42
DO+FA	53	0,50	-0,64	0,69	0,51	0,62	0,74	0,62	-0,82
DO+FA+C	80	0,32	-0,45	0,44	0,34	0,41	0,45	0,41	-0,65

n.s. = não significativo; DO=dossel; FA=faixa de adubação; CE=centro da entrelinha.
 (*) $Y = EXP.(a+bX)$; (**) $Y = a.X^c$

Conclusão

Os resultados demonstraram haver uma grande variação no sentido horizontal e vertical nas propriedades químicas do solo e na distribuição de raízes, dado ao manejo do solo em áreas com lavoura de café. A faixa de adubação mostrou-se com maior acidez até a 0,4m de profundidade, dado ao efeito da perda de bases.

Os resultados apresentados indicaram o efeito da aruação no deslocamento horizontal dos nutrientes, evidenciando-se bastante no fósforo.

As raízes finas contribuíram com maior proporção no comprimento total de raízes, além de a maioria das raízes se concentrar sob o dossel e até 0,2m de profundidade.

Confirmou-se restrição ao desenvolvimento radicular na faixa de adubação, na camada superior,

sendo a acidificação e efeitos correlatos um dos principais responsáveis.

Ficou evidente uma grande influência do local de adubação nos parâmetros químicos do solo, no crescimento e na distribuição do sistema radicular.

No caso dessa lavoura, o local de adubação deverá ser mudado para “sob o dossel”, onde se concentram as raízes e onde terão de ser feitas amostragens.

Os resultados indicam a necessidade de pesquisas mais aprofundadas para definir com mais racionalidade o local de amostragem de solo e distribuição dos fertilizantes.

Referências

- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. *Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina*. 3. Passo Fundo: SBSC-Núcleo Regional Sul, 1994.
- FRANCO, C.M. Influência da temperatura no crescimento do cafeeiro. *IBEC Research Institute*, São Paulo, v. 16, p. 5-27, 1958.
- FRANCO, C.M. Efeito da temperatura do solo e suas variações no crescimento do cafeeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 2., Poços de Caldas. 1974. *Resumos...* Rio de Janeiro: IBC/GERCA, 1974. p. 296-297.
- GUISCAFRE-ARRILLAGA, J.; GÓMEZ, L.A. Studies of the root-system of *Coffea arabica* L. Part I - Environmental condition affecting the distribution of coffee roots in Coloso Clay. *J. Agric. Univ. Puerto Rico*, San Juan, v. 22, n. 2, p. 227-262, 1938.
- IAPAR-INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ - *Manual de análise química de solo*. Londrina, Instituto Agrônomo do Paraná, 1991. 33p.
- KÜPPER, A. et al. Massa específica aparente do solo como fator limitante do desenvolvimento do sistema radicular do cafeeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 5., Guarapari. 1977. *Resumos...* Rio de Janeiro: IBC/GERCA, 1977. p.144-145.
- MALAVOLTA, E. Nutrição, adubação e calagem para o cafeeiro. In: RENA, A. B. et al. (Ed.). *Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade*. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1986. p. 165-274.
- MIGUEL, A.E. et al. Efeitos dos diferentes tipos de podas na morte de raízes do cafeeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 11., Londrina. 1984. *Resumos...* Rio de Janeiro: IBC/GERCA, 1984. p. 240-241.
- MIGUEL, A.E. et al. Características químicas de um Latossolo Vermelho Escuro, após 16 anos de cultivo com o café plantado no sistema de plantio tradicional e adensado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 20., Guarapari. 1994. *Resumos...* Rio de Janeiro: MAARA/PROCAFÉ, 1994. p. 13-16.
- NOVOTNY, E.H. et al. Levantamento das alterações das propriedades químicas de um solo sob a cultura do cafeeiro em função da adubação e práticas culturais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 20., Guarapari. 1994. *Resumos...* Rio de Janeiro: MAARA/PROCAFÉ, 1994. p. 160-163.
- NUTMAN, F.J. The root system of *C. arabica*. Pt. II. The effect of some soil conditions in modifying the normal root-system. *Emp. J. Exp. Agric.*, Oxford, v. 1, n. 4, p. 285-296, 1933a.
- NUTMAN, F.J. The root system of *C. arabica*. Pt. I. Root-systems in typical soils of British East Africa. *Emp. J. Exp. Agric.*, Oxford, v. 1, n. 3, p. 271-284, 1933b.
- NUTMAN, F.J. The root system of *C. arabica*. Pt. III. The spatial distribution of the absorbing area of the root. *Emp. J. Exp. Agric.*, Oxford, v. 2, n. 8, p. 294-302, 1934.
- PAVAN, M.A. Efeitos tóxicos de alumínio em mudas de cafeeiro em relação a nutrição de cálcio. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Campinas, v. 6, p. 209-213, 1982.
- PAVAN, M.A. et al. Acúmulo de cobre no solo em cafeeiros tratados com fungicidas cúpricos. *Arq. Biol. Tecnol.*, Curitiba, v. 37, n. 2, p. 409-415, 1994.
- PAVAN, M.A. et al. A. Influência do manejo das plantas daninhas em lavoura cafeeira na capacidade de troca de cátions e cátions trocáveis em solo com cargas variáveis. *Arq. Biol. Tecnol.*, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 305-311, 1995.
- RAIJ, B. VAN. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: Editora Agronômica Ceres, Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1991.
- RAIJ, B. VAN. et al. Calagem e adubação nitrogenada e potássica para o cafeeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., Viçosa, 1995. *Anais...* Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1995. p. 1123-1125.
- RAIJ, B. VAN. et al. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo & Fundação IAC, 1996. (Boletim técnico, 100).
- RENA, A.B.; MAESTRI, M. Fisiologia do cafeeiro. In: RENA, A.B. et al. (Ed.). *Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade*. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1986. p. 13-85.
- SYLVAIN, P.G. *El café en relacion al agua*. Turrialba: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 1959.
- TENNANT, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *J. Appl. Ecol.*, Oxford, v. 63, p. 995-1001, 1975.

Received on September 21, 2004.

Accepted on August 18, 2006.

