

DETERMINAÇÃO DO DESLOCAMENTO DO PLANO ZERO E DO COMPRIMENTO DE RUGOSIDADE DE UM CAFEZAL ADENSADO EM CRESCIMENTO

E. Z. RIGHI¹, L. R. ANGELOCCI², F. R. MARIN³

¹ Eng. Agr. Dr., PUCPR – Toledo, PR: Av. da União, 500 – Jd Coopagro, CEP 85902 – 532; fone: 0xx45 3277 8600

² Eng. Agr. Dr., ESALQ/USP, Piracicaba, SP.

³ Eng. Agr. Dr., EMBRAPA – CNPTIA, Campinas, SP.

Apresentado no XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 02 a 05 de julho de 2007 – Aracaju – SE

RESUMO: Foram determinados os valores do deslocamento do plano zero d e do comprimento de rugosidade z_0 de um cafezal adensado em crescimento, de outubro de 2002 a setembro de 2003. A altura média dos cafeeiros variou entre 0,43 e 0,74 m. As medidas de velocidade do vento foram feitas em mastro de 5 m de altura. A distância da borda do cafezal até o mastro era de 170 m na direção predominante do vento e 60 m na direção Leste, segunda maior frequência de ventos observada durante o experimento. Foi observada uma significativa subestimativa de d quando seus valores foram determinados utilizando-se o nível inferior de medida da velocidade do vento, por estar na subcamada de rugosidade da atmosfera. A relação entre d e a altura dos cafeeiros d/h variou entre 0,69 e 0,72 em 2002 e em fevereiro-março de 2003, respectivamente. Em maio-julho e agosto-setembro, essa relação apresentou tendência em diminuir (0,59 e 0,51, respectivamente), provavelmente pelo acúmulo de biomassa na parte inferior das copas, mantendo estável a altura média de absorção de momento. Os valores de z_0/h foram consistentes com aqueles observados na bibliografia para situações semelhantes até julho de 2003. Em agosto-setembro de 2003 houve uma significativa redução de z_0/h , possivelmente pela ausência da cobertura da entre-linha.

PALAVRAS-CHAVE: parâmetros aerodinâmicos, subcamada de rugosidade, cultivo de café

ABSTRACT: The values of zero plane displacement d and roughness height z_0 were determined over a coffee crop cultivated in hedgerows from October 2002 to September 2003. The mean height of coffee plants range was 0.43 m to 0.74 m. The wind speed measurements were made in a mast of 5 m height. The fetch was 170 m in the predominant wind direction and 60 m in the East direction, which was the second major frequency of wind direction along the experiment. There was an underestimation of d values when estimated with the lower level of wind measurement, because it was in the atmospheric roughness sub layer. The ratio between d and coffee height d/h range was 0.69 to 0.72 in 2002 and February-March 2003 periods, respectively. In May-July and August-September periods the ratio d/h trended to down (0.59 and 0.51, respectively), probably by the biomass increasing in the lower part of coffee crown. The z_0/h values were consistent with those noticed on the literature to heterogeneous covers until July 2003. During August-September 2003 there was a significant reduction on z_0/h , possibly because the inter rows uncovered in this period.

KEY-WORDS: aerodynamics parameters, roughness sublayer, coffee crop

INTRODUÇÃO: Na determinação do balanço de energia em cultivos, alguns parâmetros aerodinâmicos devem ser conhecidos, especialmente o deslocamento do plano zero d (THOM, 1971) e o comprimento de rugosidade da superfície z_0 . Em cultivos caracterizados por cobertura completa, como a maioria das culturas anuais, esses valores são bem estudados

e relações com parâmetros da cultura são bem conhecidos, embora ainda sejam bem aproximativas (FINNIGAN, 2000). Porém, sobre coberturas incompletas e muito rugosas e heterogêneas, como em pomares e cafezais, essas variáveis demandam por estudos para a melhor compreensão de sua relação com a configuração de plantio, estrutura dos principais elementos de rugosidade e de sua dependência das variáveis ambientais.

O estudo dessas variáveis sobre coberturas incompletas é difícil a nível de campo. Para simplificação das teorias e redução dos equipamentos necessários, muitas vezes complexos e caros, o micrometeorologista obriga-se a trabalhar em estreitas camadas de ar próximas à superfície, de forma a ter garantia de que os fluxos medidos são referentes à área de interesse e não às adjacentes. Nesses casos, corre-se o risco das medidas serem tomadas na subcamada de rugosidade da atmosfera, onde a maioria das relações conhecidas e coerentes para correção das condições de estabilidade atmosférica não são válidas, pois foram determinadas na subcamada inercial (GARRATT, 1980; CELLIER & BRUNET; 1992). Portanto, o objetivo desse trabalho foi estudar a variação dos valores de d e z_0 de um cafezal adensado em crescimento, verificando-se possíveis distorções dos valores de d em função dos níveis de coleta da velocidade do vento.

MATERIAL E MÉTODOS: O experimento foi realizado na área experimental do Dpto. de Ciências Exatas e de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP (22°42'30"S; 47°30'00"W; 546 m) cultivado com plantas de café (cultivar Obatã IAC 1669-20), com 12 a 24 meses após o transplante, em renques espaçados 3,5 m e 0,9 m entre plantas, entre outubro de 2002 e setembro de 2003. A altura média das plantas de cada período variou entre 0,43 m e 0,74 m (Tabela 2).

A escolha do local de instalação dos equipamentos para realização das medidas micrometeorológicas foi feita respeitando-se os requerimentos mínimos e possíveis de “bordadura”. Os ventos predominantes no local são de direção sudeste (PEREIRA et al., 2002). Por isso, o local dos equipamentos foi deslocado um pouco a noroeste em relação ao centro geométrico da área, aproximadamente a 170 m do extremo sul, cerca de 60 m da borda Leste e cerca de 40 m da borda Oeste, ficando a cerca de 120 m da borda Norte. Na posição adotada, tinha-se uma “bordadura” de aproximadamente 170 m na direção predominante dos ventos. Durante o experimento, fora da direção sul a sudeste, os eventos de vento mais frequentes foram de Leste.

As medidas de temperatura e de vento foram realizadas em um mastro de 5 m de altura localizado entre o centro de uma entrelinha e um renque, sendo instalados seis anemômetros de canecas (cinco MET ONE 014A e um MET ONE 034B-L Wind Set, Met One Instruments, Grants Pass, EUA). Até o dia 08/07/2003, o anemômetro 034B-L estava instalado no nível 2 ($z_{u,2}$), quando foi passado para o nível 1 ($z_{u,1}$). Os gradientes de temperatura e pressão de vapor foram determinados com psicrômetros construídos no próprio Departamento. Na Tabela 1 são apresentadas as alturas dos instrumentos acima do solo durante os períodos experimentais (RIGHI, 2004). Em função do crescimento das plantas e de algumas trocas ou inversões de equipamentos, feitas para verificar se existiam erros sistemáticos por deficiência de operação, os níveis de medida foram mudados ao longo do experimento.

Ao longo do experimento foram determinadas 4 medidas fenométricas, sendo que os valores em períodos sem medidas a campo foram conseguidos por meio de curvas de regressão estatística entre a variável de interesse e o número de dias decorridos a partir do início do experimento. As variáveis fenométricas foram: altura das plantas h , diâmetro da copa D_c , área foliar AF e número de folhas NF . Essas determinações foram feitas em pelo menos 50 plantas. Em 2002, a altura da cobertura da entre-linha h_{e-l} variou entre 0,2 m e 0,7 m, com uma roçada em 27/10. Em fevereiro-março de 2003 h_{e-l} máximo ficou em torno de 0,7 m, com roçadas em

05/02 e 16/03; em maio-julho, foi realizada uma roçada na entre-linha somente no início do período, sendo h_{e-l} máximo em torno de 0,5 m. No período de agosto – setembro de 2003 h_{e-l} variou em torno de 0,2 m, com baixo crescimento devido às condições de baixa umidade no solo. Neste período, até o dia 02/09/03, essa cobertura refere-se à somente 50% da área do experimento, sendo que o restante estava com solo nu, com posterior uniformização com toda área com solo nu. A porcentagem de cobertura da entrelinha variou entre 80 e 100%, da qual menos de 20% era seca, em outubro – dezembro de 2002 e fevereiro – março de 2003, sendo que na primeira semana após cada roçada, cerca de 40% do material de cobertura era seca. Em maio – julho de 2003, a cobertura total ficou entre 70 e 100%, sendo 55 a 70% seca.

Tabela 1. Nível dos psicrômetros e anemômetros (m) durante as campanhas de coleta de dados (separadas por tonalidades de cinza). Os símbolos (T_i) se referem aos psicrômetros e (u_i) se referem aos anemômetros, sendo o índice i o nível de instalação (1 a 6).

Período	u_1	T_1	u_2	T_2	u_3	T_3	u_4	T_4	u_5	T_5	u_6	T_6
04/10 – 17/12/02	0,55	0,24	1,27	1,04	2,31	1,96	3,23	2,88	4,15	3,80	5,07	4,72
31/01 – 13/03/03	0,55	0,24	1,27	1,04	2,31	1,96	3,23	2,88	4,15	3,80	5,07	4,72
13/03 – 23/03/03	0,98	0,68	1,49	1,28	2,29	1,99	3,21	2,91	4,13	3,83	5,05	4,75
27/05 – 02/07/03	0,97	0,68	1,52	1,27	2,32	1,98	3,24	2,93	4,17	3,87	5,11	4,80
02/05 – 08/07/03	0,93	0,71	1,44	1,29	2,23	2,00	3,17	2,93	4,11	3,85	5,05	4,78
08/07 – 22/07/03	0,86	0,71	1,53	1,29	2,25	2,00	3,19	2,93	4,13	3,85	5,07	4,78
20/08 – 18/09/03	0,85	0,72	1,52	1,29	2,25	2,01	3,20	2,95	4,12	3,86	5,02	4,78

Os valores de d e z_0 foram determinados através de um método iterativo, buscando-se o valor de d que resultasse no mínimo erro no ajuste entre u_z e $\ln(z - d)$. Foram considerados apenas os perfis de vento em condições muito próximas da neutralidade, determinada pelo número de Richardson Ri ($|Ri| \leq 0,06$), com coeficiente de determinação superior a 0,99 para a relação entre u_z e $\ln(z)$ e com $u_2 \geq 1,5 \text{ m.s}^{-1}$, para evitar-se efeitos de distorção dos perfis de vento em função de diferenças entre os anemômetros.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: GARRATT (1980) verificou que a altura da transição (z^*) entre as subcamadas rugosa e inercial (quantificada a partir de d) sobre uma floresta de savana heterogênea foi equivalente a $3,0 \cdot \varphi$ em dois locais de heterogeneidade diferentes (sendo φ um parâmetro de heterogeneidade da floresta, considerado igual à raiz quadrada da área superficial disponível para cada planta). CELLIER & BRUNET (1992) encontraram uma relação semelhante sobre milharal ($z^* \approx 4,2 \cdot \varphi$), considerando φ igual ao espaçamento entre linhas, devido à configuração de plantio.

Utilizando-se a concentração de rugosidade λ como parâmetro de comparação, definido como a área frontal do elemento de rugosidade (aqui considerada proporcional à metade da área de um disco de diâmetro igual a D_c) por unidade de área horizontal ocupada por planta, obteve-se $0,04 \leq \lambda \leq 0,11$, que se aproximou mais da condição de Garratt (1980), $\lambda = 0,03$ e $\lambda = 0,20$, enquanto que Cellier & Brunet (1992) obtiveram $\lambda = 1,70$. Sendo assim, adotando-se $z^*/\varphi = 3,0$ (Garrat, 1980) e $\varphi = (0,9 \cdot 3,5)^{0,5} = 1,78 \text{ m}$, tem-se para o cafezal em questão $z^* \approx 5,0 \text{ m}$.

Em análise realizada a partir de correções para os coeficientes de transporte turbulento para calor e vapor (simbolizados apenas como $K_{h,w}$ ao longo do texto) na subcamada rugosa propostas por CELLIER & BRUNET (1992) ($\gamma_{h,w} = K_{h,w}^*/K_{h,w} = z^*/(z - d)$; para $z - d < z^*$), verificou-se que $\gamma_{h,w}$ teria um valor de aproximadamente 20 em $z - d = 0,5 \cdot h$ considerando-se $z^* = 5,0 \text{ m}$. Este valor é demasiadamente elevado (CELLIER & BRUNET, 1992; MÖLDER et al., 1999). Desta maneira, tomando-se $\gamma_{h,w} = 2,5$ determinado sobre savana com $\lambda = 0,03$ e $\lambda = 0,20$, conforme revisado por CELLIER & BRUNET (1992), é provável que $z^* + d$ tenha variado entre aproximadamente 0,8 m em 2002 e 1,3 m em agosto – setembro de 2003,

valores dentro do intervalo equivalente a $2.h$ e $3.h$ citado por WIERINGA (1993) e FINNIGAN (2000). Isso significa que especialmente as medidas em u_1 podem ter sido influenciadas pela otimização da turbulência nas proximidades da superfície, devido $z_{u,1} < z_* + d$ e $z_{u,2}$ estar próximo de $z_* + d$ (Tabela 1).

A verificação do efeito do nível de medida do vento sobre os valores de d foi feita comparando-se os valores determinados entre os níveis 1 – 4 e 1 – 5 com aqueles entre 2 – 5, sendo que $z_{u,2}$ ficou sempre próximo do nível $z_* + d$. Quando considerados os níveis 1 – 4 e 1 – 5, os valores médios de d foram, respectivamente, iguais a 0,29 m e 0,27 m para o período de maio – julho de 2003, enquanto que com os níveis 2 – 5, o valor médio obtido foi de 0,39 m. Fazendo-se a mesma análise com os dados de fevereiro – março do mesmo ano e em 2002, houve uma subestimativa de aproximadamente 0,15 m nos valores determinados nos níveis 1 – 4 e 1 – 5 em comparação com aquele determinado em 2 – 5.

Conseqüentemente, considerando-se que $z_{u,2}$ foi maior ou pelo menos mais próximo de $z_* + d$, as demais análises foram feitas com os dados dos níveis 2 – 5. O nível 5, embora completamente fora da camada atmosférica ajustada com a superfície, mas ainda dentro da camada limite interna (RIGHI, 2004), foi levado em consideração para adicionar-se um quarto ponto nas análises, a fim de se ter maior confiança nos cálculos dos mínimos erros na determinação de d e z_0 . Numa comparação não apresentada aqui, os valores de d determinados entre 2 – 5 e entre 2 – 4 tenderam a diferir em apenas 0,01 m.

Na Tabela 2 são apresentadas as relações de d/h e z_0/h , juntamente com h , a altura média das plantas em cada período. Verifica-se que os valores de d/h ficaram dentro do intervalo entre 0,5 e 0,9 comumente encontrado na bibliografia até o período de maio – julho de 2003 (THOM et al., 1975; MONTEITH & UNSWORTH, 1990; entre outros), sendo que nos períodos úmidos (04/10 – 17/12/02 e 31/01 – 23/03/03) se aproximaram do valor de $d/h = 0,76$ encontrado por THOM (1971). No entanto, nos períodos seguintes, essas relações tenderam a diminuir pelo aumento de h e pela estabilização de d entre 0,38 m e 0,39 m (RIGHI, 2004).

Provavelmente, a queda dos valores de d/h a partir de fevereiro – março de 2003 está relacionada com a estrutura dos cafeeiros. Em setembro de 2002, a altura média das copas era equivalente a $0,44.h$, enquanto que um ano depois essa relação era de $0,76.h$. Portanto, numa cobertura em que o espaçamento entre os renques variou aproximadamente entre $8.h$ e $4.h$, o aporte de momento deve ocorrer em níveis inferiores das copas das plantas. Em cafeeiros novos, a maior concentração de material – folhas e ramos – tende a níveis inferiores da copa, cuja relação da altura da sua base com h diminuiu de 0,60 para 0,24 durante o experimento, o que explicaria a redução de d/h (SHAW & PEREIRA, 1982). O aumento da relação d/h de outubro – dezembro de 2002 a fevereiro – março de 2003 deve ter ocorrido pelo aumento de D_c e o respectivo preenchimento dos espaços vazios no renque de 50% para 70%, diminuindo significativamente a sua porosidade e elevando o nível médio de dreno de momento.

Conclusões a respeito dos valores de z_0 são mais difíceis de serem obtidas. Na Tabela 2 percebe-se uma grande variação de z_0/h nos períodos estudados, devido sua maior sensibilidade às condições de cobertura da entrelinha além do efeito da direção e velocidade do vento (RIGHI, 2004). A explicação para isso pode ser a maior agitação dessas plantas causada pelo vento, pois são mais flexíveis do que o cafeeiro. Esses valores ficaram bem próximos daqueles obtidos com a relação de LETTAU (1969), $z_0/h = 0,5.\lambda$, que, segundo WIERINGA (1993), é válida para baixos λ .

A cobertura da entre-linha não teve efeito claro sobre os valores de d , enquanto que z_0 tendeu a valores mais elevados quando a cobertura da entre-linha foi maior (RIGHI, 2004). A direção do vento transversal aos renques resultou em valores de d maiores em $\approx 0,06$ m, enquanto que próximo ao paralelismo, foram $\approx 0,06$ m menores, comparativamente aos valores médios (RIGHI, 2004). Os valores de z_0 foram menores quando o vento fluiu diagonalmente aos

renques, possivelmente por uma canalização do vento rente aos renques, onde praticamente não havia vegetação, visto ter-se mantido uma faixa de 0,9 a 1,5 m de largura próximo ao renque sem invasoras.

Tabela 2. Relação do deslocamento do plano zero (d) e da altura da rugosidade (z_0) com a altura média dos cafeeiros (h), em m, nos períodos experimentais considerados

Período	d/h	z_0/h	h (m)
04/10 – 17/12/02	0,69	0,021	0,42
31/01 – 23/03/03	0,72	0,038	0,53
27/05 – 21/07/03	0,59	0,045	0,66
20/08 – 18/09/03	0,51	0,020	0,74

CONCLUSÕES: Os valores de d apresentaram um aumento de 0,29 para cerca de 0,38 no início do desenvolvimento dos cafeeiros, estabilizando-se nesse nível nos meses seguintes, apesar do crescimento dos cafeeiros. Os valores de z_0 aumentaram de 0,009 m em 2002 para 0,03 m em maio-julho de 2003, caindo no último período para valores em torno de 0,015 m em agosto-setembro de 2003, visto a menor cobertura da entre-linha nesse período. Quando utilizadas as medidas feitas no nível de medida mais baixo, foi observado efeito da distorção do perfil do vento sobre os valores de d em função dele estar na subcamada de rugosidade atmosférica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- CELLIER, P.; BRUNET, Y. Flux-gradient relationships above tall plant canopies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.38, p.93-117, 1992.
- FINNIGAN, J. Turbulence in plant canopies. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v.32, p.519-571, 2000.
- GARRATT, J.R. Surface influence upon vertical profiles in the atmospheric near-surface layer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.106, p.803-819, 1980.
- LETTAU, H. Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element description. **Journal of Applied Meteorology**, v.8, p.828-832, 1969.
- MÖLDER, M.; GRELE, A.; LINDROTH, A.; HALLDIN, S. Flux-profile relationships over a boreal forest – roughness sublayer corrections. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.98-99, p.645-658, 1999.
- MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. **Principles of environmental physics**. 2.ed. London: Edward Arnold, 1990. 291p.
- PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações**. Guaíba: Editora Agropecuária, 2002. 478p.
- RIGHI, E.Z. Balanço e energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada. Piracicaba, 2004, 151p., Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- SHAW, R.H.; PEREIRA, A.R. Aerodynamic roughness of a plant canopy: a numerical experiment. **Agricultural Meteorology**, v.26, p.51-65, 1982.
- THOM, A.S. Momentum absorption by vegetation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.97, p.414-428, 1971.
- THOM, A.S.; STEWART, J.B.; OLIVER, H.R.; GASH, J.H.C. Comparison of aerodynamic and energy budget estimates of fluxes over a pine forest. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.101, p.93-105, 1975.
- WIERINGA, J. Representative roughness parameters for homogeneous terrain. **Boundary-Layer Meteorology**, v.63, p.323-363, 1993.