

RESISTÊNCIA AERODINÂMICA: EFEITO DOS MÉTODOS USADOS PARA ESPECIFICAR OS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE VEGETADA¹

ANTONIO FERNANDO GUERRA² e DONALD CARL SLACK³

RESUMO - Os objetivos deste estudo foram determinar os parâmetros de rugosidade da superfície vegetada para momento (z_{om}) e para calor sensível (z_{oh}) e examinar os efeitos dos critérios utilizados na obtenção desses parâmetros no cálculo das resistências aerodinâmicas para momento e calor sensível. A análise dos dados coletados sobre grama bermuda indicam que o parâmetro z_{om} é virtualmente constante em velocidades do vento superiores a 2 m/s; porém, esse parâmetro cresce rapidamente nas velocidades de vento inferiores. Com velocidades de vento superiores a 2 m/s, foi encontrado um valor médio de z_{om} igual a 0,0006 m e um valor médio de z_{oh} de 0,00015 m, o qual é aproximadamente 1/7,6 de z_{om} . O uso de diferentes critérios para especificar os parâmetros de rugosidade da superfície resultaram em diferenças significativas no cálculo das resistências aerodinâmicas.

Termos para indexação: momento, calor sensível, comprimento de rugosidade, velocidade de fricção, número de Reynolds rugoso.

AERODYNAMIC RESISTANCE: EFFECT OF THE METHODS USED TO SPECIFY THE VEGETATED SURFACE ROUGHNESS PARAMETERS

ABSTRACT - The purposes of this study were to determine the surface roughness parameters for momentum (z_{om}) and heat (z_{oh}) for bermudagrass and to examine the effect of using different criteria for selecting these surface roughness parameters on the calculation of the aerodynamic resistances. Analysis of the data collected over bermudagrass suggests that z_{om} is virtually constant at wind speeds greater than 2 m/s, but increases rapidly as wind speeds decrease below 2 m/s. For wind speeds larger than 2 m/s it resulted in an average z_{om} of 0.0006 m and an average z_{oh} of 0.00015 m, which is about 1/7.6 of z_{om} . The use of the different criteria to specify the surface roughness parameters resulted in considerable differences in the calculation of the aerodynamic resistances.

Index terms: momentum, sensible heat, roughness length, friction velocity, rough Reynolds number.

INTRODUÇÃO

A forma de resistência da equação de balanço de energia tem sido largamente usada como base para o desenvolvimento de modelos de programação de irrigação e para estimar a evapotranspiração de gran-

des áreas vegetadas. No entanto, o sucesso desses modelos depende da acurácia da estimativa das resistências do dossel e da aerodinâmica. Por outro lado, a estimativa da evapotranspiração (E_t) como resíduo da equação do balanço de energia, depende da acurácia na estimativa da densidade de fluxo de calor sensível com base na temperatura radiométrica da superfície, a qual também depende da estimativa da resistência aerodinâmica para transferência de calor sensível.

Nos últimos anos, algumas questões tem sido levantadas quanto à metodologia usada para determinar os parâmetros de rugosidade da superfície requeridos no cálculo da resistência aerodinâmica.

¹ Aceito para publicação em 5 de julho de 1996.

² Eng. Agríc., Ph.D., Embrapa-Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (CPAC), km 18, BR- 020, Caixa Postal 08223, CEP 73301-970 Planaltina, DF.

³ Eng. Civil, Ph.D., Prof. Titular, Dep. de Engenharia Agríc. e Biosistemas, Arizona University, CEP 85721, Tucson, Arizona, USA.

Molion & Moore (1983), De Bruin & Moore (1984), Jacobs & Van Boxel (1988) e Guerra (1990) indicaram que o comprimento de rugosidade para momento (z_{om}) e especialmente o parâmetro de deslocamento da superfície do solo (d_m) são muito sensíveis aos erros experimentais na medição da velocidade do vento quando são estimados pelo método tradicional de soma dos quadrados mínimos dos erros (Robinson, 1962; Kustas et al., 1989; Guerra, 1990). Eles indicam que, em geral, d_m assume valores irreais quando são usados perfis de vento aparentemente semelhantes e nas mesmas condições de estabilidade atmosféricas. Os resultados de Jacobs & Van Boxel (1988) e Guerra (1990) mostram que z_{om} e d_m são parâmetros dependentes e que qualquer aumento em d_m causa um decréscimo em z_{om} .

A dependência dos parâmetros de rugosidade da superfície à velocidade do vento é outro resultado conflitante na literatura. Embora z_{om} e d_m sejam geralmente estimados como uma função única da altura de planta, os resultados de Szeicz et al. (1969), Thom (1971), Molion & Moore (1983), Jacobs & Van Boxel (1988) e Guerra (1990) indicam que estes parâmetros são dependentes da velocidade do vento.

Outra fonte de erro nos modelos de E_p , baseados na equação de balanço de energia, é a suposição de igualdade entre as resistências à transferência de momento e de calor sensível. Os resultados de Thom (1971), Garratt & Francey (1978), Garratt (1978) e Guerra (1990) mostram que o comprimento de rugosidade para calor sensível é menor do que aquele para momento. Isto implica maior resistência à transferência de calor sensível do que para momento. Esta diferença pode ser explicada pelas diferenças dos processos envolvidos na transferência dessas entidades. Nas imediações do dossel, a transferência de momento ocorre por difusão, por meio das forças viscosas, e por atrito, enquanto a transferência de calor sensível ocorre principalmente por difusão. Garratt (1978) recomenda uma razão em torno de sete entre o comprimento de rugosidade para momento e calor sensível, em vegetação menor do que 1 metro. A grande diferença entre os resultados apresentados na literatura indica que mais pesquisa é necessária para

estabelecer critérios para determinar os parâmetros necessários para calcular as resistências aerodinâmicas à transferência de momento e de calor sensível em superfícies com diferentes tipos de vegetação. Assim, os objetivos desse trabalho foram: 1) apresentar valores de z_{om} e z_{oh} medidos sobre um dossel de grama bermuda; 2) comparar os valores medidos de z_{om} e z_{oh} com valores estimados e medidos da literatura; e 3) avaliar o efeito da utilização de diferentes critérios para especificar os parâmetros de rugosidade da superfície no cálculo da resistência aerodinâmica à transferência de momento e de calor sensível.

MATERIAL E MÉTODOS

Base teórica

Equação do balanço de energia

A equação do balanço de energia para uma superfície com vegetação pode ser escrita como segue:

$$R_n - G = H + LE \quad (1)$$

onde R_n é a radiação líquida (W/m^2); G , a densidade de fluxo de calor no solo (W/m^2); H , a densidade de fluxo de calor sensível (W/m^2); e LE , a densidade de fluxo de calor latente (W/m^2). A densidade de fluxo de calor sensível pode ser escrita como:

$$H = \rho C_p \frac{(\theta_s - \theta_a)}{r_{ah}} \quad (2)$$

onde ρ é a densidade do ar (K_g/m^3); C_p , o calor específico do ar ($J/K_g \cdot K$); θ_s , a temperatura potencial da superfície (K), tipicamente medida por termômetro infravermelho; θ_a , a temperatura potencial do ar (K); e r_{ah} , a resistência aerodinâmica à transferência de calor sensível (s/m).

Substituindo a equação 2 na equação 1 e resolvendo para LE , produz-se:

$$LE = R_n - G - \rho C_p \frac{(\theta_s - \theta_a)}{r_{ah}} \quad (3)$$

a qual permite o cálculo da evapotranspiração em grandes áreas, se r_{ah} for quantificada com precisão.

Em vegetação de baixo porte e sob condições atmosféricas próximas de neutra, a resistência aerodinâmica à transferência de calor sensível pode ser escrita como:

$$r_{ah} = \frac{\left[\ln \frac{z}{z_{0m}} \right] \left[\ln \frac{z}{z_{0h}} \right]}{k^2 u} \quad (4)$$

onde z é a altura de medição (m) da velocidade do vento e da temperatura potencial do ar; z_{0m} e z_{0h} são os comprimentos de rugosidade para momento e calor sensível, respectivamente; u , a velocidade média do vento; e k , a constante de von Karman (0,41).

Sob condições atmosféricas estáveis e não-estáveis, a resistência aerodinâmica à transferência de calor sensível corrigida para estabilidade é usualmente expressa com base na teoria de similaridade de Monin-Obukhov, como segue (Brutsaert, 1982):

$$r_{ah} = \frac{\left[\ln \frac{z}{z_{0m}} - \Psi_m \right] \left[\ln \frac{z}{z_{0h}} - \Psi_h \right]}{k^2 u} \quad (5)$$

onde Ψ_m e Ψ_h são fatores de correção de estabilidade para momento e calor sensível, respectivamente, os quais são funções do parâmetro (z/L) de Monin-Obukhov.

Parâmetros de rugosidade aerodinâmica

Momento - Sob condições adiabáticas, a velocidade média do vento (u) é uma função logarítmica da altura (z) da subcamada dinâmica sobre a superfície vegetada. Para vegetação de porte baixo o modelo do perfil logarítmico do vento pode ser escrito como:

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_{0m}} \right) \quad (6)$$

onde u_* é a velocidade de fricção (m/s).

O parâmetro z_{0m} é avaliado extrapolando-se o perfil logarítmico da velocidade do vento para dentro do dossel, onde a velocidade do vento é zero. Isso é feito normalmente pela aplicação de uma técnica interativa para encontrar a soma dos erros dos quadrados mínimos (Robinson, 1962; Kustas et al., 1989; Guerra, 1990).

Calor sensível - Assumindo-se a similaridade dos coeficientes de transferência de "eddy" sob condições neutras, por analogia, com a equação 6, uma expressão para descrever o gradiente de temperatura na camada dinâmica sobre o dossel pode ser escrita como segue (Brutsaert, 1982):

$$(\theta_s - \theta_a) = \frac{H}{\rho C_p k u} \ln \left(\frac{z}{z_{0h}} \right) \quad (7)$$

Similar à absorção de momento, o parâmetro z_{0h} pode ser avaliado extrapolando-se o perfil de temperatura medido dentro da camada dinâmica sobre o dossel até encontrar a temperatura média da superfície (Brutsaert, 1982). Isto também pode ser feito pela aplicação de uma técnica interativa para encontrar a soma dos erros dos quadrados mínimos.

Local, instrumentação e aquisição de dados

Parâmetros ambientais e de planta foram medidos sobre a grama bermuda de baixo porte, no período de 30 de agosto a 20 de outubro de 1989. A área de grama bermuda media aproximadamente 1.600 m de comprimento (na direção norte-nordeste para sul-sudeste) e em torno de 800 m de largura. A área foi irrigada por aspersores do tipo "spray" em sistema de irrigação linear, na fazenda "Western Sod", a qual está localizada a aproximadamente 10 km na direção sul de Casa Grande, Arizona, Estados Unidos. Casa Grande está localizada na longitude de 111° 45' Oeste, latitude de 32° 53' Norte, e a elevação do local é de aproximadamente 500 m. Para permitir maior "fetch" na direção predominante do vento (direção sudoeste), os instrumentos foram instalados a aproximadamente 100 m da borda norte-nordeste e aproximadamente a 200 m da borda norte-noroeste. Portanto, o "fetch" variou de 100 m na direção norte-noroeste para 1.500 m na direção sul-sudeste.

Radiação líquida (W/m^2) e densidade de fluxo de calor no solo (W/m^2) foram medidos por um radiômetro líquido e duas placas de fluxo de calor no solo, respectivamente, em intervalos de 10 segundos, e a média foi calculada a cada 10 minutos por um aparelho de aquisição de dados "Campbell CR 21X."

A velocidade horizontal do vento foi medida por quatro anemômetros de micro-resposta "Qualimetrics", modelo 2032 (limiar de leitura = 0,23 m/s). Os anemômetros foram posicionados em um único mastro, em quatro alturas diferentes, na superfície do solo (0,4, 0,8, 1,2, e 1,6 m). A frequência de medição foi de 10 segundos e a média, a cada 10 minutos, foi calculada pelo aparelho de aquisição de dados 21X. Cada anemômetro teve como suporte um único braço, especialmente construído para permitir movimento em todas as direções e, conseqüentemente, de fácil instalação. Isto foi necessário porque o equipamento teve que ser retirado da área a cada dois dias para se proceder às irrigações.

A direção do vento foi medida com um aparelho de monitoramento de direção de vento "Met One", modelo 024A, posicionado a 1 m sobre a superfície do solo. A frequência de medição foi a mesma usada na velocidade do vento.

A temperatura do ar foi medida por quatro psicrômetros aspirados (termopar de cobre-constantan), posicionados em um único mastro em quatro diferentes alturas (0,4, 0,8, 1,2, e 1,6 m). A frequência de leitura foi também de 10 segundos, e a média foi calculada a cada 10 minutos.

Flutuações da média do componente vertical da velocidade do vento foram medidas sobre o dossel de grama bermuda por um anemômetro sônico "Campbell Scientific Incorporated - CSI", modelo CA27. Flutuações da média da temperatura do ar foram medidas com um par termoeletrico do tipo E, acoplado ao CA27. O aparelho CA27 foi instalado a 1,6 m sobre a superfície do solo e foi orientado para a direção sudoeste, a qual foi considerada a direção predominante do vento. Isso foi feito para minimizar o efeito do mastro e de outros instrumentos no fluxo de ar. As medições foram feitas em intervalos de 0,2 segundo, e a média de calor sensível foi calculada a cada 10 minutos.

A temperatura da superfície da grama bermuda foi medida por um termômetro infravermelho de cabeça fixa, com ângulo de visão de 15°. Utilizou-se uma cobertura de PVC rígido, para evitar qualquer possível efeito da radiação direta nas medições de temperatura. O termômetro infravermelho foi instalado a 1 m de altura e posicionado em ângulo de aproximadamente 45° entre a superfície da grama e a sua direção de visão. A temperatura da superfície foi também medida em intervalos de 10 segundos, com a média calculada a cada 10 minutos.

A altura de planta foi medida a cada dois dias. A medição da altura do dossel foi feita em 30 locais diferentes, escolhidos ao acaso, próximo ao local de instalação dos instrumentos. A altura média de planta resultou em 0,03 m.

Seleção de dados para condições atmosféricas próximas de neutra

Para calcular os parâmetros de rugosidade da superfície para momento e calor sensível, os perfis de velocidade do vento e temperatura foram selecionados, nas condições atmosféricas próximas de neutra, pelos seguintes critérios:

1. $-5 < H < 5 \text{ W/m}^2$ ou $-1 < R_n < 10 \text{ W/m}^2$; semelhante a Hicks et al. (1989), este critério foi usado para selecionar dados de possíveis condições atmosféricas próximas de neutra.

2. Velocidade do vento do anemômetro mais baixo (u_1) maior do que 1 m/s; este critério foi usado para restringir dados possivelmente afetados por erros devido à precisão dos instrumentos (Molion & Moore, 1983; Hicks et al., 1989).

3. Direção do vento entre 70 e 290 graus, medidos em relação à direção norte; este critério foi imposto pelas características da área experimental, para permitir uma bordadura mínima de 200 m.

4. $-0,015 < z/L < 0,015$; o parâmetro de estabilidade de Monin-Obukhov (z/L) foi usado como critério final para inferir se condições atmosféricas próximas de neutra ocorreram ou não, em média, durante os intervalos de 10 minutos.

No parâmetro de estabilidade de Monin-Obukhov (z/L), z é a média geométrica da altura de medição da velocidade do vento (m) e L é o parâmetro de comprimento de Monin-Obukhov (m). L é positivo em condições atmosféricas estáveis, negativo em condições não estáveis, e infinitamente grande em condições de atmosfera neutra. Quando o efeito do vapor d'água sobre a estabilidade da atmosfera é levado em consideração, L pode ser expresso como (Brutsaert, 1982):

$$L = \frac{-u_*^2 p}{\text{kg} \left[\left(\frac{H}{T_a C_p} \right) + 0,61E \right]} \quad (8)$$

onde g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$); T_a , a média da temperatura de referência do ar (K); e E é a densidade de fluxo de massa evaporativa ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$). T_a foi calculada como uma média das temperaturas de bulbo seco, medidas por par termoeletricos nas quatro diferentes alturas, e E foi calculado pela equação 1. O intervalo de $|z/L| \leq 0,015$ foi considerado suficientemente próximo a zero para indicar condições atmosféricas próximas de neutra. O intervalo $\pm 0,015$ é equivalente ao intervalo $\pm 0,015$, para o número de Richardson usado por Kustas et al. (1989).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Valores calculados de u_* , z_{om} , z_{oh} e z/L

Vinte e dois períodos de 10 minutos, com condições atmosféricas próximas de neutra, foram selecionados com o uso dos critérios descritos anteriormente. Os valores calculados de u_* , z_{om} , z_{oh} e z/L , juntamente com a velocidade do vento do anemômetro mais baixo (u_1) para cada período, estão apresentados na Tabela 1. A média geral de z_{om} foi de $0,0028 \pm 0,0028$ m. O valor $0,0028$ é aproximadamente equivalente a $0,093h$, onde h é a média da altura de planta ($0,03$ m). Esta relação é semelhante à relação ($z_{om} = 0,1h$) encontrada por Thom (1971), em experimento com túnel de vento numa cultura artificial.

TABELA 1. Dia do ano (DDA), hora de ocorrência (h), velocidade do vento (u_1), velocidade de fricção (u_*), comprimento de rugosidade para momento (z_{0m}), comprimento de rugosidade para calor sensível (z_{0h}) e parâmetro de Monin-Obukov (z/L) para os 22 casos de condições atmosféricas próximas de neutra.

DDA	h	u_1 (m/s)	u_* (m/s)	z_{0m} (m)	z_{0h} (m)	z/L
255	13:50	4,802216	0,295217	0,000544	7,91E-05	-0,011500
255	14:20	4,961586	0,302626	0,000551	5,44E-10	-0,011297
255	14:30	5,161062	0,315521	0,000556	1,72E-17	-0,009864
255	14:40	5,162117	0,318453	0,000578	7,50E-18	-0,009345
257	7:20	1,571538	0,117598	0,002055	7,76E-16	-0,012580
268	8:40	3,163130	0,177677	0,000312	1,39E-11	-0,014174
276	7:10	1,748851	0,128702	0,002653	0,00E-00	-0,007521
276	7:50	1,198971	0,128532	0,010961	1,39E-12	0,006928
276	9:30	1,283405	0,116804	0,004434	1,09E-12	-0,006122
277	2:00	1,470217	0,121663	0,002798	2,00E-14	0,013839
277	4:30	1,295015	0,138006	0,009308	5,31E-30	0,008282
277	6:10	1,431166	0,093453	0,001024	1,21E-13	0,008121
277	8:00	1,227467	0,113907	0,004442	3,21E-03	-0,008981
277	8:40	1,817454	0,108850	0,000427	9,10E-08	-0,012626
277	8:50	1,571538	0,114438	0,001356	2,78E-16	-0,011015
277	9:00	1,817454	0,137691	0,001745	3,93E-07	-0,004405
281	7:20	1,399503	0,121418	0,003070	2,32E-05	-0,000230
282	7:20	1,576815	0,134046	0,003014	2,21E-11	-0,000189
282	7:30	1,788957	0,135111	0,001688	0,00E-00	-0,014791
283	7:20	1,206359	0,111795	0,005040	1,14E-13	0,003731
286	7:20	1,414279	0,125744	0,003893	2,70E-11	0,014616
292	15:30	3,430154	0,236557	0,001070	6,90E-40	-0,010749

Semelhante aos resultados obtidos por Hicks (1976), a Fig.1 mostra uma grande variação de z_{0m} com a velocidade do vento do anemômetro mais baixo. É importante ressaltar que a maior variação ocorreu nas velocidades de vento entre 1 e 2 m/s. Resultados semelhantes foram encontrados por Molion & Moore (1983). Eles atribuíram a variação de z_{0m} nas velocidades de vento menores que 2 m/s, a erros de precisão dos instrumentos. Entretanto, não existe nenhuma forte evidência de que essa variação é causada pela precisão dos instru-

mentos, uma vez que as velocidades de vento entre 1 e 2 m/s correspondem de quatro a oito vezes a velocidade mínima mensurável pelos instrumentos (0,23 m/s). Outra evidência de que essa variação não é causada pela precisão dos instrumentos é o fato de que foi encontrado uma boa correlação entre os valores medidos de velocidade do vento e aqueles estimados com o uso dos parâmetros de rugosidade da superfície, calculados para todos os 22 casos selecionados. Um exemplo dessa boa correlação é apresentado na Fig. 2.

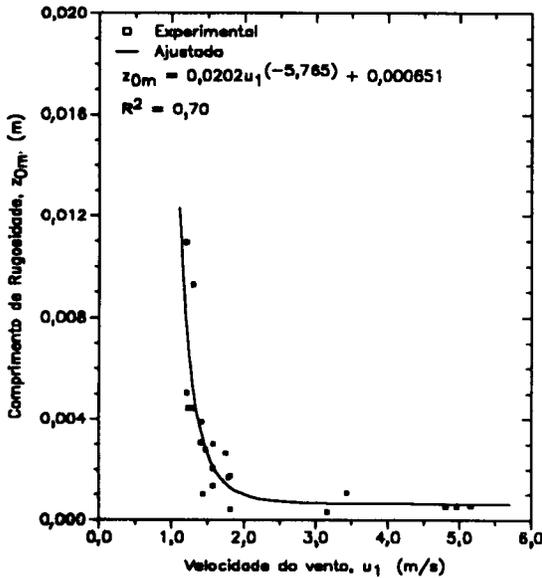


FIG. 1. Variação do comprimento de rugosidade para momento (z_{om}) com a velocidade do vento do anemômetro mais baixo (u_1) para os 22 casos de condições atmosféricas próximas de neutra.

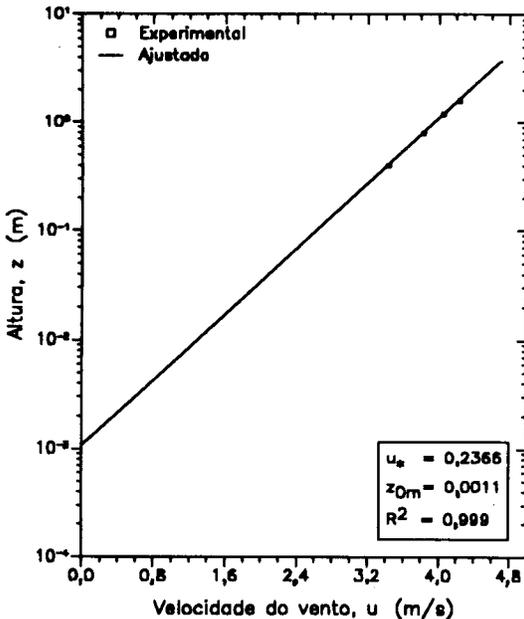


FIG. 2. Curva ajustada do perfil da velocidade de vento estimada com o uso dos valores calculados de comprimento de rugosidade para momento sobre o perfil de velocidade de vento medidos sobre o dossel de grama bermuda.

Uma possível explicação para essa variação de z_{om} , nas velocidades de vento mais baixas, poderia ser a transição do regime de fluxo. Para verificar essa possibilidade, o número de Reynolds rugoso ($R_o^* = u_* z_{om} / \nu$), onde ν é a viscosidade cinemática do ar, foi calculado para todos os 22 casos com condições atmosféricas próximas de neutra. Os valores de R_o^* variaram de aproximadamente 3 a 94. O gráfico de z_{om} versus R_o^* (Fig. 3) mostra que nesta faixa de R_o^* , z_{om} é uma função linear do número de Reynolds rugoso, o que concorda com os resultados de Garratt & Hicks (1973) e indica a presença de um regime de fluxo único.

Segundo Brutsaert (1982), fluxo aerodinamicamente rugoso é conseguido quando R_o^* excede aproximadamente o valor de 2,5. Considerando-se que o menor valor de R_o^* foi em torno de 3, os resultados satisfazem este critério e indicam que todos os 22 casos estão associados com um regime de fluxo turbulento. Conseqüentemente, o aumento na magnitude de z_{om} , nas velocidades de vento mais baixas, não está associado a mudanças no regime de fluxo.

Embora z_{om} tenha sido freqüentemente considerado somente uma função das características do dossel, tais como altura, área frontal e densidade dos elementos, Szeicz et al. (1969), Thom (1971), Hicks (1976), Molion & Moore (1983) e Jacobs & Van Boxel (1988) indicam que z_{om} é também uma função da velocidade do vento. Semelhante aos resultados dessa pesquisa, Szeicz et al. (1969) encontraram que, em floresta de pinheiros e em culturas de batata e de leucena, z_{om} decresceu quando a velocidade do vento aumentou de 0,5 a 2 m/s. Em velocidades acima de 2 m/s, z_{om} manteve-se relativamente constante. Eles sugeriram que o decréscimo de z_{om} , nas velocidades do vento mais altas, foi devido a mudanças nas características do dossel. Eles explicam que, nas velocidades de vento mais altas, os elementos do dossel tendem a se alinhar, devido à força do vento, o que causa um decréscimo na rugosidade efetiva do dossel. Entretanto, no caso da grama bermuda de baixo porte, é muito difícil visualizar esse fenômeno. Uma explicação plausível para esse decréscimo de z_{om} com a velocidade do vento é que, nas velocidades do vento mais baixas, existe uma camada de ar mais espessa presa

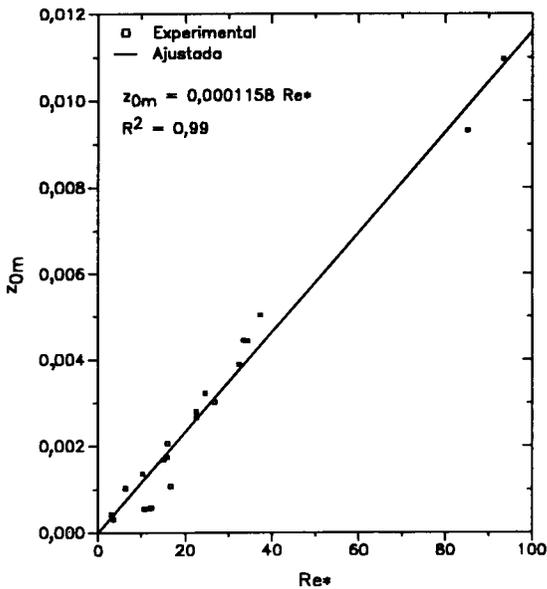


FIG. 3. Curva ajustada do comprimento de rugosidade para momento (z_{0m}) com o número de Reynolds rugoso (Re^*) para os 22 casos com condições atmosféricas próximas de neutra.

entre os elementos do dossel. Quando a velocidade do vento aumenta, o ar da parte superior dessa camada adquire movimento, causando um decréscimo na magnitude de z_{0m} . Entretanto, para aplicações práticas, a relação apresentada na Fig. 1 deve produzir valores de z_{0m} mais razoáveis do que simplesmente considerá-lo constante em todo o intervalo de velocidade do vento.

A média geral de z_{0m} foi de $0,000151 \pm 0,000684$ m, a qual é aproximadamente 19 vezes menor do que a média geral de z_{0m} . A razão $z_{0m}/z_{0h} = 19$, à primeira vista, parece significativamente maior do que os valores normalmente apresentados na literatura. Garratt (1978) encontrou um valor de 12 ± 6 numa vegetação homogênea composta de árvores de 8 m de altura, grama seca de 1 m de altura e solo arenoso. Considerando-se o desvio-padrão associado aos resultados de Garratt (1978) e ao deste estudo, o valor 19 é perfeitamente razoável. Garratt & Hicks (1973), trabalhando com superfícies naturais e artificiais, encontraram um valor para essa razão de 3 a 7, os quais são muito mais baixos do que os valores anteriormente comentados.

Neste estudo, se considerarmos somente os seis casos em que a velocidade do vento foi superior a 2 m/s, as médias seriam $z_{0m} = 0,0006$ m e $z_{0h} = 0,000079$ m, as quais resultam em uma razão de 7,6. O valor de 7,6 é semelhante ao valor de 7,4 encontrado por Garratt & Francey (1978), quando incluíram todos os tipos de superfície, tais como: solo sem vegetação, gramas e culturas, arbustos, e florestas. É importante salientar que o valor de 7,4 corresponde ao valor médio para grama de baixo porte, naquele estudo. Exceto no caso de grama de baixo porte, a comparação entre esses valores não é correta, devido, principalmente, à inclusão do parâmetro de deslocamento da superfície do solo (d_m) no modelo de perfil logarítmico do vento, o qual pode ter introduzido algumas incertezas na estimativa de z_{0m} .

Foi verificada uma grande variação nos valores z_{0h} com a velocidade do vento do anemômetro mais baixo. Essa variação foi certamente uma consequência do pequeno gradiente de temperatura observado nas condições atmosféricas próximas de neutra e da precisão nas medições de temperatura e calor sensível. Os resultados de Garratt & Hicks (1973), Garratt (1978) e Garratt & Francey (1978) mostram que a razão entre z_{0m} e z_{0h} é constante num grande intervalo do número de Reynolds rugoso. Então, com base nestes resultados, é razoável sugerir que a estimativa de z_{0m} seja feita pela equação apresentada na Fig. 1 e a estimativa de z_{0h} , como uma fração constante de z_{0m} (i.e., $z_{0h} = z_{0m}/7,6$).

Valores calculados de resistência aerodinâmica

Vários critérios têm sido utilizados na seleção dos parâmetros de comprimento de rugosidade usados na avaliação da resistência aerodinâmica. Enquanto alguns investigadores preferem tomar uma média de z_{0m} para todas as condições próximas de neutra selecionadas (Hicks, 1976), outros consideram somente a média de z_{0m} , para velocidades do vento mais altas (Molion & Moore, 1983).

Embora Garratt & Hicks (1973), Garratt (1978) e Garratt & Francey (1978) demonstrem que o comprimento de rugosidade para calor sensível é menor do que aquele para momento, muitos investigadores ainda assumem que z_{0h} é igual a z_{0m} , o que

implica igualdade entre as resistências aerodinâmicas à transferência de calor sensível e o momento. Isso pode causar um erro considerável na avaliação da resistência aerodinâmica e, conseqüentemente, pode inviabilizar operacionalmente os modelos baseados na equação do balanço de energia.

Os valores de resistência aerodinâmica, calculados por quatro métodos diferentes para especificar os comprimentos de rugosidade, estão apresentados na Fig. 4. De maneira semelhante à de Molion & Moore (1983), o método 1 considera somente as condições próximas de neutra com velocidade de vento superiores a 2 m/s. Este método produziu resistências aerodinâmicas muito maiores do que o método 2, o qual considera uma média de z_{0m} para todos os casos selecionados (Hicks, 1976). O método 3 considera z_{0m} como uma função da velocidade do vento e usa a função apresentada na Fig. 1 para estimar z_{0m} . Em velocidades de vento maiores do que 2 m/s, este método produz valores de resistência aerodinâmica muito semelhantes aos do método 1. Entretanto, nas velocidades de vento mais baixas, a resistência aerodinâmica aumenta drasticamente. Esse decréscimo nos valores de resistência aerodinâmica não foi um resultado esperado. Intuitivamente, parece lógico que qualquer decréscimo na velocidade de vento causaria um aumento na resistência aerodinâmica para momento. Entretanto, se a magnitude de z_{0m} é dependente da velocidade do vento, como mostra a Fig. 1, a formulação disponível para estimar a resistência aerodinâmica sempre produzirá valores semelhantes aos do método 3. Molion & Moore (1983), trabalhando em uma floresta, encontraram valores de z_{0m} com um padrão semelhante ao deste estudo, os quais produziram valores de resistência aerodinâmica comparáveis àqueles obtidos com o método 3.

Quando z_{0m} é considerado constante, a resistência aerodinâmica aumenta com o decréscimo da velocidade do vento, porque o termo velocidade do vento (u) está no denominador da equação de resistência. Portanto, a curva resultante do método 3 indica que a presença de z_{0m} no modelo de resistência aerodinâmica é muito mais forte do que a presença da velocidade do vento no denominador da equação 4. O método 4 é semelhante ao método 3, exceto que este considera a diferença entre a resistência aerodinâmica para momento e calor sensível

vel. Embora a forma da curva resultante do método 4 seja semelhante àquela do método 3, em geral, este método produz resistências aerodinâmicas maiores do que o método 3. Esta maior resistência à transferência de calor sensível em relação à de momento é explicada pela falha do processo de turbulência em aumentar significativamente a transferência de calor sensível dos elementos do dossel (Garratt, 1978). Portanto, os resultados deste estudo indicam que, no cálculo das resistências aerodinâmicas sobre superfícies vegetadas, z_{0m} deve ser considerado como uma função da velocidade do vento e z_{0h} como uma fração de z_{0m} .

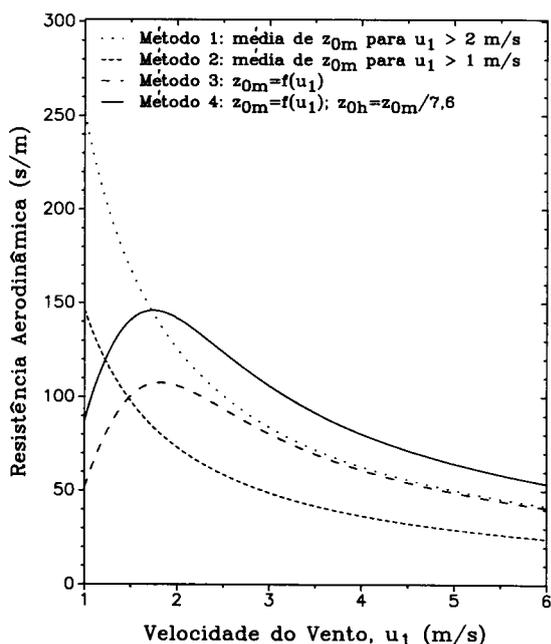


FIG. 4. Variação da resistência aerodinâmica quando calculada com base em quatro métodos para especificar o comprimento de rugosidade para momento nas velocidades de vento de 1 a 6 m/s.

CONCLUSÕES

1. O comprimento de rugosidade para momento (z_{0m}) é virtualmente constante nas velocidades de vento maiores do que 2 m/s e aumenta drasticamente nas velocidades de vento mais baixas.
2. O comprimento de rugosidade para calor sensível (z_{0h}) é menor do que z_{0m} .

3. A superfície vegetada é mais rugosa (maior z_{om}) nas velocidades de vento mais baixas.

4. Usando-se uma média geral de z_{om} em todas as condições próximas de neutra selecionadas, subestima-se a resistência aerodinâmica para momento, nas velocidades de vento mais altas, e superestima-se, nas velocidades de vento mais baixas.

5. Usando-se uma média de z_{om} somente nas velocidades de vento mais altas, a resistência aerodinâmica para transferência de momento é estimada com acurácia nas velocidades de vento mais altas, mas é superestimada nas velocidades de vento mais baixas.

6. Considerando-se z_{om} como função da velocidade de vento, a resistência aerodinâmica decresce drasticamente nas velocidades de vento mais baixas.

7. A inclusão de z_{oh} no modelo de resistência aerodinâmica faz com que a resistência aerodinâmica para transferência de calor sensível seja maior do que aquela para transferência de momento.

REFERÊNCIAS

- BRUTSAERT, W.H. **Evaporation into the atmosphere: theory, history and application.** Boston: D. Reidel Publishing, 1982. 299p.
- DE BRUIN, H.A.R.; MOORE, C.J. Zero-plane displacement and roughness length for tall vegetation, derived from a simple mass conservation hypothesis. **Boundary-Layer Meteorology**, v.31, p.39-49, 1984.
- GARRATT, J.R. Transfer characteristics for a heterogeneous surface of large aerodynamic roughness. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.104, p.491-502, 1978.
- GARRATT, J.R.; FRANCEY, R.J. In the unstable, baroclinic atmospheric boundary layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v.15, p.399-421, 1978.
- GARRATT, J.R.; HICKS, B.B. Momentum, heat and water vapor transfer to and from natural and artificial surfaces. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.99, p.680-687, 1973.
- GUERRA, A.F. **Analysis of parameters for evaluation of canopy and aerodynamic resistances over turfgrass.** Arizona: University of Arizona, 1990. 233p. Tese de Doutorado.
- HICKS, B.B. Wind profile relationships from the "Wangara" experiment. **Quarterly Journal Royal of Meteorological Society**, v.102, p.535-551, 1976.
- HICKS, B.B.; MATT, D.R.; MCMILLEN, R.T. **A micrometeorological investigation of surface exchange of trace gases: a case study.** Silver Spring: Air Resources Laboratory, 1989. 71p. (NOAA Technical Memorandum ERL ARL-172).
- JACOBS, A.F.G.; VAN BOXEL, J.H. Changes of the displacement height and roughness length of maize during a growing season. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.42, p.53-62, 1988.
- KUSTAS, W.P.; CHOUDHURY, B.J.; KUNKEL, K.E.; GAY, L.W. Estimate of the aerodynamic roughness parameters over an incomplete cover of cotton. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.46, p.91-105, 1989.
- MOLION, L.C.B.; MOORE, C.J. Estimating the zero-plane displacement for tall vegetation using a mass conservation method. **Boundary-Layer Meteorology**, v.26, p.115-125, 1983.
- ROBINSON, S.M. Computing wind profile parameters. **Journal of Atmospheric Science**, v.19, p.189-190, 1962.
- SZEICZ, G.; ENDRODI, G.; TAJCHMAN, S. Aerodynamic and surface factors in evaporation. **Water Resources Research**, v.5, p.380-394, 1969.
- THOM, A.S. Momentum absorption by vegetation. **Quarterly Journal of Royal the Meteorological Society**, v.97, p.414-428, 1971.