

ESTIMATIVAS DO DESLOCAMENTO DO PLANO-ZERO, PARÂMETRO DE RUGOSIDADE E RESISTÊNCIA AERODINÂMICA À DIFUSÃO DE VAPOR D'ÁGUA SOBRE CULTIVO DE MILHO EM CONDIÇÃO DE ESTABILIDADE PRÓXIMA À NEUTRALIDADE¹

CLOVIS ALBERTO VOLPE² e ORIVALDO BRUNINI³

RESUMO - Através de perfis de velocidade do vento acima de uma cultura de milho (*Zea mays* L.), no estágio de pendramento e com altura média das plantas de 2,80 m, determinou-se o deslocamento do plano-zero, o parâmetro de rugosidade e a resistência aerodinâmica à difusão de vapor d'água, em condição de estabilidade atmosférica próxima à neutralidade. Observou-se o decréscimo do parâmetro de rugosidade e o acréscimo do deslocamento do plano-zero com o aumento da velocidade do vento no intervalo de 0,2 a 3,5 m s⁻¹. Nessas mesmas condições o valor médio estimado da resistência aerodinâmica à difusão de vapor d'água foi de 0,19 s cm³, sendo, portanto, muito pequeno em relação aos valores das outras resistências à transferência da água no sistema solo-planta-atmosfera.

Termos para indexação: velocidade do vento, *Zea mays*, transferência de água, sistema solo-planta-atmosfera.

ESTIMATION OF THE ZERO-PLANE DISPLACEMENT, ROUGHNESS LENGTH AND AERODYNAMIC RESISTANCE TO WATER VAPOUR EXCHANGE FOR A CORN CANOPY FOR CONDITIONS OF NEAR NEUTRAL STABILITY

ABSTRACT - Zero-plane displacement, roughness length and aerodynamic resistance to water vapour exchange for conditions of near neutral stability were determined, using different profiles of wind speed above a corn canopy with a mean height of 2.80 m, during the tasselling period. The results showed a decrease for the roughness length and a increase in the zero-plane displacement with an increase of the wind speed between the intervals of 0.2 and 3.5 m s⁻¹. In this condition the mean estimated value for the aerodynamic resistance to water vapour exchange was 0.19 s cm³, very low if compared to the others.

Index terms: *Zea mays*, wind speed, water transfer, soil-plant-atmosphere system.

INTRODUÇÃO

As estimativas dos parâmetros aerodinâmicos de superfícies de diferentes cultivos são essenciais quando se procura estudar os fluxos de momentum,

de calor, de vapor d'água e de dióxido de carbono (Tanner 1963, Villa Nova 1973, Ide 1978, André 1981, Bailey & Davies 1981, Moore et al. 1983).

Em particular, muita atenção tem sido dada às estimativas do parâmetro de rugosidade (z_0) e do deslocamento do plano-zero (d), os quais caracterizam as propriedades aerodinâmicas da superfície na equação do perfil da velocidade do vento para as condições próximas à neutralidade (Monteith 1975).

A avaliação desses parâmetros é trabalhosa, pois além dos dados do perfil da velocidade do vento acima da cultura são necessários os dados do perfil

¹ Aceito para publicação em 26 de abril de 1989. Convênio FINEP: 54.84.0158.00.

² Eng.-Agr., Dr., Prof. de Agrometeorol. Fac. de Ciências Agrárias e Vet. - UNESP. CEP 14870 Jaboticabal, SP.

³ Eng.-Agr., Ph.D., Seção de Climatol. Agríc. do Institut. Agron. CEP 13100 Campinas, SP. Bolsista do CNPq.

de temperatura do ar para que se possam caracterizar as condições de estabilidade da atmosfera. A estabilidade atmosférica pode ser caracterizada pelo número de Richardson (Webb 1965). O número de Richardson (Ri) é um parâmetro adimensional, e, assumindo que sejam iguais os coeficientes de difusividade turbulenta de calor e de momentum, ele representa a taxa de produção de energia térmica turbulenta em relação à taxa de produção de energia turbulenta através do cisalhamento do vento, ou seja, expressa a razão entre os regimes de turbulência livre e forçada, ou o quociente entre forças convectivas e forças mecânicas (Rosenberg 1974, André 1981). O Ri é positivo sob condições de inversão (estabilidade) quando a turbulência tende a desaparecer, é negativo em condições instáveis quando a turbulência tende a aumentar, e é igual a zero em condição de estabilidade neutra.

Em condição de estabilidade neutra, a velocidade do vento acima da cultura aumenta de maneira exponencial com o aumento da altura (z). Projetando-se a curva do perfil da velocidade do vento para um ponto onde a velocidade é igual a zero, resulta, na interceptação, o valor $d + z_0$. O deslocamento do plano-zero, mais o parâmetro de rugosidade (espessura), representam um dado nível sobre a superfície do solo, acima do qual os fluxos turbulentos começam a ocorrer. Abaixo desse nível a difusão turbulenta não existe e os transportes ocorrem pela difusão molecular (Rosenberg 1974).

Na mesma condição de estabilidade neutra, a velocidade do vento a uma altura z , acima de uma superfície rugosa, é função direta da raiz quadrada da razão entre o fluxo de momentum (τ) e a densidade do ar (ρ), e também do logaritmo da razão entre $z - d$ e z_0 , e função inversa da constante de von Karman (k). A raiz quadrada da razão entre o fluxo de momentum e a densidade do ar é conhecida como velocidade de fricção (u^*), e ela caracteriza um regime particular de turbulência (Tanner 1963, Thom 1975).

O parâmetro de rugosidade (z_0) varia com o tipo e a altura do obstáculo rugoso, conforme se pode observar nos dados obtidos por diversos autores para diferentes superfícies, e que foram relatados por Brutsaert (1982). Muitos estudos têm sido conduzidos a fim de relacionar z_0 a características mensuráveis da superfície, como por exemplo a altura média das plantas. Segundo Brutsaert (1982), provavelmente, foi Paeschke em 1937, o primeiro pesquisador

a relacionar z_0 com a altura média da cultura (h). Seus resultados mostram que, para várias superfícies gramadas e para o trigo e beterraba, a razão z_0/h igual a 0,14 tem um bom ajuste com os dados do perfil de vento. Entretanto, Monteith (1975) relata que, para a maioria das culturas, a razão z_0/h varia de 0,13 a 0,32, enquanto Maki (1969) encontrou para a cultura de milho variação na razão z_0/h de 0,03 a 0,10.

Comparada com z_0/h , a razão d/h parece ser menos sensível à natureza da superfície ou a outros fatores (Munro & Oke 1973). Considerando os dados de diferentes culturas com altura média de 66 cm, o valor da razão d/h é de cerca de 0,64 (Stanhill 1969). Segundo Monteith (1975), o valor de d está situado, geralmente, entre 0,6 e 0,8 da altura h do elemento rugoso, enquanto Kondo (1971) apresenta dado médio de 0,68, com extremos de 0,53 e 0,83, para a razão d/h .

Muitas análises detalhadas têm mostrado que z_0/h e d/h são funções complexas de outras características da superfície (Seginer 1974). Um efeito que tem sido considerado nas formulações de d e z_0 é o do vento, o qual pode ser expressivo no caso de vegetações flexíveis (Monteith 1963, Munro & Oke 1973, Moore et al. 1983).

Há poucas observações detalhadas sobre o milho. Em sorgo ocorreu decréscimo da razão d/h com o aumento da velocidade do vento (Szeicz et al. 1973). De acordo com esses autores, isto ocorreu porque, em ventos leves, o momentum do ar fluindo sobre a cultura é absorvido na sua maior parte pelo topo da cultura, mas quando a velocidade do vento aumenta, a maior absorção ocorre no interior da cultura. No mesmo trabalho observou-se acréscimo de z_0 com o aumento da velocidade do vento. Segundo Monteith (1963) e Maki (1969), as culturas de sorgo e de milho, em ventos fracos ou moderados, permanecem relativamente sem rugosidade (z_0 é pequeno), mas quando a velocidade do vento aumenta, ocorre, provavelmente, pequena mudança no lugar do escoamento do ar, as folhas se agitam e a superfície torna-se rugosa.

De acordo com Monteith (1975), pode ocorrer, em um determinado intervalo de velocidade do vento, decréscimo de z_0 , em conseqüência do movimento das folhas, resultando uma forma mais aerodinâmica; ou, ainda, devido ao decréscimo do coeficiente de arrasto, quando a força que o ar exerce

tangencialmente sobre as folhas – consequência direta da transferência de momentum através da camada limite – torna-se insignificante diante da força do ar fluindo sobre a folha, resultante da desaceleração do ar em movimento.

Além de d e z_0 , outro parâmetro aerodinâmico importante é a resistência da camada limite da superfície à difusão de vapor d'água. Essa resistência é chamada de resistência aerodinâmica à difusão de vapor d'água e encontra-se em série com a resistência estomática das folhas.

A resistência aerodinâmica à difusão do vapor d'água (r_a) depende das dimensões das folhas (geometria da superfície) e da velocidade do vento (Monteith 1965), e é governada pela turbulência da atmosfera (Berkowicz & Prahm 1982). Ela pode ser determinada através da resistência aerodinâmica ao transporte de momentum (r_{am}), obtida através de perfis de velocidade do vento (Thom 1972). Para isso, acrescenta-se à r_{am} uma resistência adicional, calculada a partir da velocidade de fricção (u^*), conforme procedimento adotado por Szeicz et al. (1973) e Bailey & Davies (1981). De acordo com esses autores, essa resistência adicional que se acrescenta a r_{am} para o cálculo de r_a é devida ao fato de que o fluxo de momentum na superfície pode tanto ser absorvido pelas forças inerciais (pressão exercida sobre as folhas) como também pelas forças superficiais, e isto nem sempre é acompanhado de transferência de vapor d'água. Dessa forma, a resistência à transferência de momentum entre a vegetação e a atmosfera é sempre menor que as correspondentes resistências à transferência de calor e de vapor d'água.

Conforme observa Monteith (1965), existe variabilidade da r_a para diferentes tipos de cobertura vegetal: coberturas de porte baixo (gramas) apresentam maior r_a , comparativamente às coberturas de porte elevado (Pinus), isto porque, aerodinamicamente, a cobertura de porte elevado possui um parâmetro de rugosidade maior, o que lhe confere maior superfície de contato, facilitando a difusão turbulenta.

Em condição de estabilidade neutra, Wang'ati (1972) encontrou para o milho, na fase do pendoamento, variação da r_a durante o dia, em função da velocidade do vento, alcançando valor máximo entre 0,12 e 0,15 $s\ cm^{-1}$, durante a manhã, decrescendo para 0,03 $s\ cm^{-1}$ à tarde.

Pelo relatado, nota-se que sobre a cultura do milho, especialmente na fase do pendoamento, não estão bem definidas as variações de d/h e z_0/h em fun-

ção da velocidade do vento. Realizou-se, então, o presente trabalho com os objetivos de determinar, em condição de estabilidade próxima à neutralidade, o deslocamento do plano-zero, a espessura de rugosidade e a resistência aerodinâmica à difusão de vapor d'água, em uma cultura de milho na fase do pendoamento, e relacioná-los com a velocidade do vento.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em solo plano, pertencente ao Centro Experimental de Campinas (CEC), do Instituto Agrônomo, e cujas coordenadas geográficas são: 22°54' S, 47°04' W à altitude de 706 m.

O deslocamento do plano-zero, o parâmetro de rugosidade e a resistência aerodinâmica à difusão de vapor d'água foram determinados sobre a variedade de milho (*Zea mays* L.) IAC-Maya. O mastro com os sensores de velocidade do vento e o mastro com termopares foram colocados no centro de uma área de aproximadamente um hectare, coberta com milho. As velocidades do vento acima da cultura foram determinadas com anemômetros, marca Fuess, montados a 3,00; 3,70; 4,10; 5,30 e 6,60 m acima do nível do solo. Foram obtidos valores médios da velocidade horizontal do vento a cada altura, resultantes das medidas feitas durante vinte minutos. As temperaturas do ar foram determinadas através de termopares de cobre-constantan nº 24 AWG, instalados nas mesmas alturas dos anemômetros. Obtiveram-se valores médios da temperatura do ar resultantes das medidas feitas em intervalos de vinte minutos. Um microvôltemetro, modelo Keithley-148, foi usado para a medida da microvoltagem gerada pelos termopares. Em seguida, através da relação 40 μV igual a 1°C, obtida através da curva de calibração entre temperatura e força eletro-motriz, fez-se a conversão dos dados de μV para °C. As medidas foram efetuadas nos dias 9 e 11 de fevereiro de 1982, quando a altura média da cultura (ha) era de 2,80 m, e as plantas já haviam emitido a inflorescência terminal.

Para a caracterização da estabilidade atmosférica visando a seleção de perfis próximos à neutralidade, usou-se o número de Richardson (Ri) (Webb 1965):

$$Ri = \frac{g \frac{d\theta}{dz}}{T \left(\frac{du}{dz} \right)^2} \quad (1)$$

onde g é a aceleração da gravidade (980 cm^{-1}); $\frac{d\theta}{dz}$ é o gradiente de temperatura potencial ($^{\circ}\text{C cm}^{-1}$); $\frac{du}{dz}$ é o gradiente da velocidade do vento (s^{-1}), e T é a temperatura absoluta do ar para o nível z_a , sendo que z_a é determinado por:

$$z_a = \sqrt{z_1 \cdot z_2} \quad (2)$$

sendo que os valores de z_1 e z_2 são, respectivamente, 3,00 e 4,10 m. Para a aplicação próxima à superfície do solo, o Ri pode ser calculado com $\frac{dT}{dz}$ em vez de $\frac{d\theta}{dz}$, onde $\frac{dT}{dz}$ é o gradiente de temperatura do ar (Rosenberg 1974). Os perfis selecionados foram os que apresentaram $-0,04 \leq Ri \leq 0,01$ (Webb 1970, Pruitt et al. 1973).

O deslocamento do plano-zero (d) e o parâmetro de rugosidade (z_0) foram estimados através da aplicação da relação do perfil logarítmico, dada por (Deacon 1949):

$$\bar{u}(z) = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right), \text{ para } z > h \quad (3)$$

onde $\bar{u}(z)$ é a média temporal da velocidade do vento na altura z ; u^* é uma velocidade constante com a altura e definida como velocidade de fricção; k é a constante de von Karman, considerada igual a 0,41 (Högström 1985); e h é a altura do obstáculo rugoso.

O deslocamento do plano-zero foi calculado conforme a metodologia descrita por Monteith (1975), através de três velocidades do vento u_1 , u_2 e u_3 , medidas nas alturas z_1 , z_2 e z_3 . Através da equação (3) tem-se que:

$$\bar{u}_1(z_1) = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z_1-d}{z_0}\right) \quad (4)$$

$$\bar{u}_2(z_2) = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z_2-d}{z_0}\right) \quad (5)$$

$$\bar{u}_3(z_3) = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z_3-d}{z_0}\right) \quad (6)$$

O d foi estimado através da relação entre as equações (4), (5) e (6) ou seja:

$$\frac{\bar{u}_1 - \bar{u}_2}{\bar{u}_1 - \bar{u}_3} = \frac{\ln\left(\frac{z_1-d}{z_2-d}\right)}{\ln\left(\frac{z_1-d}{z_3-d}\right)} \quad (7)$$

onde os subscritos se referem aos níveis de medida que no caso foram 3,00; 4,10 e 6,60 m. A equação (7) foi resolvida usando-se um procedimento iterativo facilmente programado em computador. Plotando-se $\ln(z-d)$ contra a velocidade do vento $u(z)$, o valor correspondente a z_0 pôde ser encontrado através do intercepto.

A resistência aerodinâmica à difusão de vapor d'água (r_a) foi determinada através da resistência aerodinâmica ao transporte de momentum (r_{am}). Sabendo-se que o fluxo de momentum (τ) pode ser expresso tanto em função de $u(z)$ como em função de u^* (Thom 1975), tem-se que:

$$\tau = \rho \frac{1}{r_{am}} u(z) \quad (8)$$

$$\tau = \rho u^{*2} \quad (9)$$

Conclui-se que:

$$r_{am} = \frac{u(z)}{u^{*2}} \quad (10)$$

A velocidade de fricção (u^*) foi determinada através da equação (3), onde tem-se que:

$$u^* = \frac{k u(z)}{\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)} \quad (11)$$

sendo z igual a 4,10 m.

Para o cálculo de r_a , usou-se a expressão (Thom 1972):

$$r_a = r_{am} + 1,35 u^{*2/3} \quad (12)$$

sendo u^* em cm s^{-1} e r_{am} em s cm^{-1} .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os perfis de velocidade do vento e temperatura do ar obtidos durante os dias 9 e 11.02.1982 foram numerados de 1 a 24. Dos 24 perfis medidos utilizaram-se dez para a estimativa de d , z_0 e r_a , pois foram os que apresentaram $-0,04 \leq Ri \leq 0,01$ (estabilidade próxima à neutralidade).

Na época das determinações a altura média da cultura (h) era de 2,80 m, e já havia ocorrido a emissão da inflorescência terminal.

Na Tabela 1 encontram-se os valores de d e z_0 , assim como as razões d/h e z_0/h , obtidos com os dez perfis de velocidade do vento selecionados. Observa-se, através desses dados, que d variou de 1,74 a 2,26 m e a relação d/h de 0,62 a 0,81. A variação de z_0 foi de 0,37 a 0,90 m e a de z_0/h de 0,13 a 0,32.

TABELA 1. Valores de z_0 , d/h e z_0/h para vários perfis de velocidade do vento em condição de estabilidade próxima à neutralidade. Cultura de milho. Campinas, 09 e 11.02.82. ($h = 2,80$ m).

Perfil (nº)	Hora local	d (m)	z_0 (m)	$\frac{d}{h}$	$\frac{z_0}{h}$
01	8:00	2,23	0,49	0,80	0,18
08	13:55	1,74	0,78	0,62	0,28
09	14:15	1,85	0,66	0,66	0,24
15	16:45	1,78	0,90	0,64	0,32
16	10:40	2,14	0,45	0,76	0,16
17	11:00	2,20	0,40	0,79	0,14
18	11:20	2,14	0,54	0,76	0,19
19	11:40	2,14	0,50	0,76	0,18
20	12:00	2,20	0,41	0,79	0,15
21	12:20	2,26	0,37	0,81	0,13
Médias		2,07	0,55	0,74	0,20

A variação de d/h observada (0,62 a 0,81) está bem próxima da variação encontrada para a maioria das espécies, que é de 0,60 a 0,80 (Monteith 1975), e da variação encontrada especificamente para o milho, que é de 0,61 a 0,83 (Maki 1969). Porém, a va-

riação de z_0/h determinada (0,13 a 0,32) difere bastante de 0,03 a 0,10 encontrada em milho (Maki 1969). O valor médio de d/h (0,74) está próximo de 0,63, que é o valor da maioria das espécies (Stanhill 1969), enquanto que o de z_0/h (0,20) difere de 0,13, relatado por Tanner & Pelton (1960) e citados por Monteith (1975).

A maior variabilidade do valor de z_0/h em relação ao valor de d/h pode ser atribuída ao fato de a determinação de z_0 ser mais crítica do que a determinação de d , levando a uma maior dispersão dos dados (Szeicz et al. 1973, Munro & Oke 1973, Brutsaert 1982).

Através da análise de regressão linear, determinou-se a dependência de d/h e z_0/h (para $h = 2,80$ m) com as velocidades do vento nos níveis de 3,00 m (0,20 m acima da cultura), 4,10 m (1,30 m acima da cultura) e 6,60 m (3,80 m acima da cultura). Nota-se, através das Fig. 1, 2 e 3, que a melhor correlação, tanto para d/h ($r = +0,70^*$) como para z_0/h ($r = -0,75^*$), foi encontrada quando se utilizou a velocidade do vento a 1,30 m acima da cultura (4,10 m acima da superfície do solo). Observa-se, ainda, através dessas figuras, a tendência estatisticamente significativa, de d/h aumentar e de z_0/h diminuir com o aumento da velocidade do vento, em um intervalo de 0,2 a 3,50 m s⁻¹. Esses resultados discordam dos obtidos em milho por Munro & Oke (1973), que não encontraram tendências estatisticamente significativas de z_0 e d para decrescerem com o aumento da velocidade do vento no intervalo de 2,5 a 6,0 m s⁻¹. Discordam também de Szeicz et al. (1973), que encontraram, em sorgo, acréscimo de z_0 e decréscimo de d com o aumento da velocidade do vento.

O acréscimo de d com o aumento da velocidade do vento, no intervalo de 0,2 a 3,5 m s⁻¹, conforme obtido neste trabalho, sugere que quanto maior a velocidade do vento dentro do intervalo citado, mais próximo ao topo da cultura ocorre a absorção do fluxo de momentum. O decréscimo de z_0 sugere que em ventos relativamente fortes as folhas e as inflorescências terminais se alinham e a superfície da cultura torna-se aerodinamicamente lisa. Entretanto, para Monteith (1963) e Szeicz et al. (1973), no sorgo, e provavelmente no milho, em ventos fracos ou moderados, a superfície da cultura permanece relativamente lisa (z_0 é pequeno), mas quando a velocidade do vento aumenta não ocorre alinhamento das folhas, estas se ajustam, tornando a superfície rugosa. De acordo com Monteith (1975), são mesmo confli-

tantes os resultados dos diversos trabalhos que procuram determinar a variação de z_0 e d com a velocidade do vento, quando esses parâmetros são determinados através de perfis de velocidade do vento e medidos sobre uma cultura de altura uniforme. Sobre algumas superfícies, z_0 decresce com o aumento da velocidade do vento, e d é aproximadamente constante, porém, sobre outras superfícies, z_0 aumenta com a velocidade do vento e d decresce.

Os valores da velocidade do vento (u_z) para z igual a 4,10 m, da velocidade de fricção (u^*) e da resistência aerodinâmica ao fluxo de momentum (r_{aM}) utilizados para a determinação da resistência aerodinâmica à difusão do vapor d'água (r_a) encontram-se na Tabela 2.

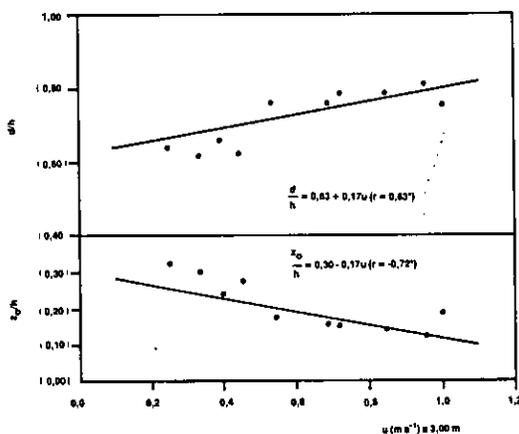


FIG. 1. Relação entre as razões d/h e z_0/h e a velocidade do vento (u) medida a 3,00 m da superfície do solo.

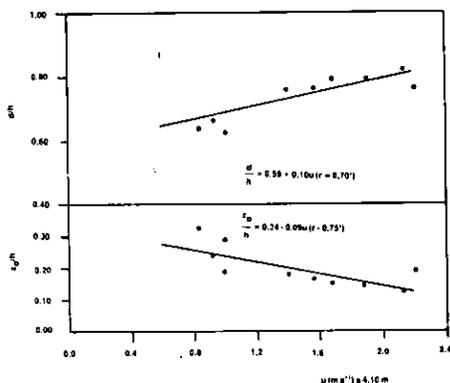


FIG. 2. Relação entre as razões d/h e z_0/h e a velocidade do vento (u) medida a 4,10 m da superfície do solo.

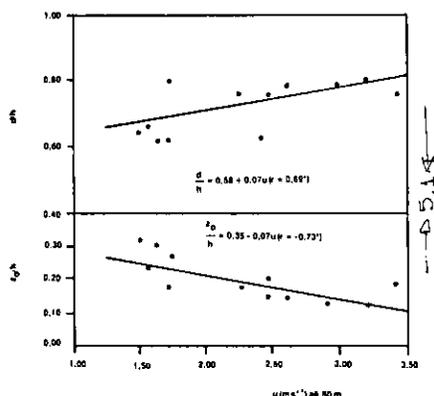


FIG. 3. Relação entre as razões d/h e z_0/h e a velocidade do vento (u) medida a 6,60 m da superfície do solo.

A resistência aerodinâmica à difusão do vapor d'água (r_a) variou de 0,15 a 0,24 $s\ cm^{-1}$, com um valor médio de 0,19 $s\ cm^{-1}$.

Os valores encontrados estão próximos do limite inferior do intervalo 0,2 a 0,5 $s\ cm^{-1}$, relatado por Monteith (1965) como sendo a r_a da maioria das culturas, e também próximos do valor 0,15 $s\ cm^{-1}$ en-

TABELA 2. Valores da velocidade de fricção (u^*), resistência aerodinâmica ao fluxo de momentum (r_{aM}), resistência aerodinâmica ao fluxo de vapor d'água (r_a) e velocidade do vento a 4,10 m ($u(z)$). Cultura de milho. Campinas, 09 e 11.12.82.

Perfil (n°)	Hora local	u^* ($cm\ s^{-1}$)	r_{aM} ($s\ cm^{-1}$)	r_a ($s\ cm^{-1}$)	$u(z)$ ($cm\ s^{-1}$)
01	8:00	31,5	0,10	0,24	103,0
08	13:55	38,1	0,07	0,19	103,0
09	14:15	31,1	0,10	0,24	93,0
15	16:45	35,9	0,06	0,18	83,0
16	10:40	61,3	0,06	0,15	220,0
17	11:00	49,5	0,08	0,18	188,0
18	11:20	44,5	0,07	0,18	140,0
19	11:40	47,1	0,07	0,17	157,0
20	12:00	44,9	0,08	0,19	168,0
21	12:20	54,2	0,07	0,16	212,0
Médias		43,8	0,08	0,19	146,7

contrado por Wang'ati (1972), para o milho, na fase de pendoamento e em condição de estabilidade próxima à neutralidade.

A variabilidade do valor da resistência aerodinâmica à difusão do vapor d'água se prende ao fato de que ela é bastante dependente de z_0 (Szeicz et al. 1973, Bailey & Davies 1981), sendo, dessa maneira, uma quantidade conservativa com as mudanças na velocidade do vento, ajudando a manter um equilíbrio dinâmico de transferência de vapor d'água sobre a superfície. Quando o parâmetro de rugosidade (z_0) da superfície é constante, a resistência aerodinâmica à difusão do vapor d'água é inversamente proporcional à velocidade do vento, como pode ser verificado nas Tabelas 1 e 2. Isso já foi observado por Monteith (1965) e se deve ao fato de que a velocidade do vento reduz bastante a resistência do ar ao fluxo de vapor d'água e aumenta a força de arrasto responsável pela transferência de massa e de energia da folha para o ar (Rosenberg 1974).

Comparando-se os dados de r_a e r_{am} (Tabela 2), nota-se que a r_a , no máximo, foi três vezes maior que a r_{am} (perfil 15), e nunca a r_a foi menor que o dobro da r_{am} . Isso mostra que os efeitos da força de arrasto não podem ser ignorados na determinação de r_a , procedimento este que tem sido adotado por vários autores (Davies 1972, Berkowics & Prahm 1982). Por outro lado, apesar de pequeno o valor da resistência aerodinâmica à difusão de vapor d'água, em relação aos valores das outras resistências ao fluxo da água no sistema solo-planta-atmosfera (Gardner & Ehlig 1962, Reicosky & Ritchie 1976, Aston & Lawlor 1979, Brunini & Thurtell 1981, Volpe 1986), e mesmo sendo trabalhosa a sua determinação, ela não pode ser desprezada nos modelos que utilizam resistências para a estimativa da evapotranspiração da cultura do milho, uma vez que as taxas de evaporação aumentam drasticamente com pequenas variações na resistência aerodinâmica, especialmente em baixos valores de r_a (Stewart & Thom 1973).

É evidente que a estimativa da resistência aerodinâmica, através do perfil logarítmico do vento, é válida estritamente para condições de estabilidade próxima à neutralidade. Em condição de instabilidade, o perfil logarítmico do vento exagera o aumento da velocidade do vento com a altura e, portanto, a r_a é superestimada, enquanto que em condição de estabilidade a r_a é subestimada. Nesses casos, as resistências podem ser corrigidas através dos gradientes de vento e de temperatura do ar, ou através dos fluxos de calor sensível ou de momentum (Monteith 1965).

CONCLUSÕES

1. Para a cultura do milho com altura média de 2,80 m e no estágio de pendoamento, e em condições de estabilidade próxima à neutralidade, ocorrem decréscimo do parâmetro de rugosidade e acréscimo do deslocamento do plano-zero, com aumento da velocidade do vento, no intervalo de 0,2 a 3,50 m s⁻¹. Isso indica que em ventos fracos ou moderados a absorção do fluxo de momentum ocorre mais próxima do topo da cultura, e que as folhas e as inflorescências terminais se alinham, tornando a superfície da cultura aerodinamicamente lisa.

2. Nessas mesmas condições, é muito pequeno o valor da resistência aerodinâmica à difusão do vapor d'água, em comparação com outras resistências à transferência da água no sistema solo-planta-atmosfera. Apesar de ser muito trabalhosa a sua determinação, ela não pode ser desprezada nos modelos que utilizam resistências para a estimativa da evapotranspiração do milho.

REFERÊNCIAS

- ANDRÉ, R.G.B. **Um estudo dos transportes verticais de momentum, calor sensível e vapor d'água sobre superfície vegetada nos trópicos.** São José dos Campos, INPE, 1981. 112p.
- ASTON, M.J. & LAWLOR, D.W. The relationship between transpiration, root water uptake, and leaf water potential. *J. Exp. Bot.*, **30**:169-81, 1979.
- BAILEY, W.G. & DAVIES, J.A. The effect of uncertainty in aerodynamic resistance on evaporation estimates from the combination model. *Boundary-Layer Meteorol.*, **20**:187-99, 1981.
- BERKOWICS, R. & PRAHM, L.P. Sensible heat flux estimated from routine meteorological data by the resistance method. *J. Appl. Meteorol.*, **21**:1845-64, 1982.
- BRUNINI, O. & THURTELL, G.W. Medidas simultâneas do potencial da água no solo e em folhas e raízes de plantas de milho (*Zea mays* L.). *Turrialba*, **31**:299-304, 1981.
- BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere.** Holanda, D. Reidel Publishing Co., 1982. 299p.

- DAVIES, J.A. Actual, potential and equilibrium evaporation for a beanfield in southern Ontário. *Agric. Meteorol.*, 10:331-48, 1972.
- DEACON, E.L. Vertical diffusion in the lowest layers of the atmosphere. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 75:89-92, 1949.
- GARDNER, W.R. & EHLIG, C.F. Impedance to water movement in soil and plant. *Science*, 138:522-3, 1962.
- HÖGSTRÖM, U. Von Karman's constant in atmospheric Boundary-Layer Flow: Reevaluated. *J. Atmos. Sci.*, 42:263-70, 1985.
- IDE, B.Y. **Comportamento dos fluxos de momentum, calor sensível e vapor d'água em uma cultura de milho (*Zea mays* L.) variedade "Piranão"**. Piracicaba, ESALQ/USP, 1978. 125p. Tese Mestrado.
- KONDO, J. Relationship between the roughness coefficient and other aerodynamic parameters. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 49:121-124, 1971.
- MAKI, T. On zero-plane displacement and roughness length in the wind velocity profile equation over a corn canopy. *J. Agric. Meteorol.*, 25:13-8, 1969.
- MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. In: FOGG, G.T. **The state and movement of water in living organisms**. New York, Academic Press, 1965. p.205-34.
- MONTEITH, J.L. Gas exchange in plant communities. In: EVANS, L.T. **Environmental control of plant growth**. New York, Academic Press, 1963. p.95-112.
- MONTEITH, J.L. **Principles of Environmental Physics**. Londres, Edward Arnold Ltd., 1975. 241p.
- MOORE, C.J.; BRUIN, H.A.R.; MOLION, L.C.B. **On estimation of zero-plane displacement for tall vegetation**. s.l., INPE, 1983. 26p. (INPE Publicação, 2946. PRE/430).
- MUNRO, D.S. & OKE, T.R. Estimating wind profiles parameters of tall dense crops. *Agric. Meteorol.*, 11:223-8, 1973.
- PRUITT, W.O.; MORGAN, D.L.; LOURENCE, F.J. Momentum and mass transfers in the surface boundary-layer. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 99:370-86, 1973.
- REICOSKY, D.C. & RITCHIE, J.T. Relative importance of soil resistance and plant resistance in water absorption. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40:297-7, 1976.
- ROSENBERG, N.J. **Microclimate: the biological environment**. New York, John Wiley Sons., 1974. 315p.
- SEGINER, I. Aerodynamic roughness of vegetated surfaces. *Boundary-Layer Meteorol.*, 5:383-93, 1974.
- STANHILL, G. A simple instrument for the field measurement of turbulent diffusion flux. *J. Appl. Meteorol.*, 8:509-13, 1969.
- STEWART, J.B. & THOM, A.S. Energy budgets in pine forest. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 99:154-70, 1973.
- SZEICZ, G.; VAN BAVEL, C.H.M.; TAKAMI, S. Stomatal factor in the water use and dry matter production by sorghum. *Agric. Meteorol.*, 12:361-89, 1973.
- TANNER, C.B. Energy relations in plant communities. In: EVANS, L.T. **Environmental control of plant growth**. New York, Academic Press, 1963. p.141-8.
- THOM, A.S. Momentum, mass and heat exchange of plant communities. In: MONTEITH, J.L. **Vegetation and the atmosphere**. Londres, Academic Press, 1975. p.57-109.
- THOM, A.S. Momentum, mass and heat exchange of vegetation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 98:124-34, 1972.
- VILLA NOVA, N.A. **Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz**. Piracicaba, ESALQ/USP, 1973. 89p. Tese Livre-Docência.
- VOLPE, C.A. **Eficiência no uso da água, resistência estomática e parâmetros aerodinâmicos da cultura de milho (*Zea mays* L.)**. Piracicaba, ESALQ/USP, 1986. 204p. Tese Doutorado.
- WANG'ATI, F.J. Lysimeter study of water use of maize and beans in East Africa. *East Afr.*

- Agric. For J.**, 38:141-5, 1972.
- WEBB, E.K. Aerial microclimate. **Meteorol. Monogr.**, 6:27-58, 1965.
- WEBB, E.K. Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, 96:67-70, 1970.