

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE RUGOSIDADE E RELAÇÕES ENTRE FLUXOS E GRADIENTES SOBRE FLORESTA

Ari de Oliveira Marques Filho¹

Maria de Nazaré Góes Ribeiro¹

RESUMO

Valores dos parâmetros que caracterizam a rugosidade de floresta para o fluxo horizontal de ar, são determinados a partir de perfis de velocidade do vento, observados acima da vegetação sob condições de neutralidade atmosférica, $\partial\Theta/\partial z=0$, e ajustados a perfis logarítmicos por um procedimento numérico de otimização. Uma análise sobre as conexões entre fluxos e gradientes de velocidade do vento para diferentes condições de estabilidade atmosférica é aqui também apresentada. Todas as informações utilizadas neste trabalho foram obtidas através de um experimento micrometeorológico, que vem sendo desenvolvido desde setembro de 1983 na Reserva Ducke, Manaus-AM.

INTRODUÇÃO

Em experimentos hidrometeorológicos realizam-se medidas intensivas acima e no interior de coberturas vegetais para estabelecer o seu papel na interação com a atmosfera, primariamente refletido na vinculação que existe entre as gradientes dos diferentes componentes ou propriedades da própria atmosfera (temperatura, concentração de vapor d'água, a velocidade do vento, etc) com os fluxos correspondentes (fluxo de calor sensível, vapor d'água, momentum, etc). Esse vínculo é que possibilita a pesquisa de modelos mais simplificados, que reproduzam adequadamente os processos, e apropriados aos estudos em que se disponham de informações em um único nível de referência acima da vegetação.

A utilização desses modelos para estimativas das taxas de evaporação de superfícies naturais, uma das suas aplicações mais importantes, depende do conhecimento dos parâmetros característicos da rugosidade da superfície e do estabelecimento de funções específicas que permitam as correções necessárias aos fluxos, quando estimados a partir das características dos perfis, frente às diferentes condições de estabilidade atmosférica em que são obtidas as informações.

Estudos realizados em superfícies naturais ou modificadas com cobertura vegetal de pequeno e médio porte, reunidos por Jarvis et alli (1975), mostram o comportamento dos parâmetros de rugosidade da vegetação, procurando vinculá-los às características geométricas comuns da cobertura. Por outro lado, Yaglom (1976) comparou os principais trabalhos que estudaram diferentes formas para as funções adimensionais relativas aos fluxos de momentum e de calor sensível, e mostrou as principais deficiências dos dados experimentais que propiciaram as análises.

¹ Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Cx.P. 478 Manaus - Am - Brasil CEP 69011 -970

O presente estudo tem como objetivos a determinação de valores característicos da rugosidade da floresta (ϕ representando a altura de deslocamento do plano de referência e z_0 a rugosidade da vegetação propriamente dita) obtidos a partir de uma análise dos perfis de velocidade do vento ocorridos em condições de neutralidade atmosférica; e, nesta primeira etapa, o estabelecimento da função adimensional da estabilidade para momentum ϕ_m . As informações utilizadas foram todas obtidas na Reserva Florestal Ducke, Rodovia Manaus-Itacoatiara em campanhas realizadas durante os meses de agosto-setembro de 1983 e julho-agosto de 1984.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados analisados neste trabalho fazem parte de um conjunto amplo de medidas meteorológicas, que vem sendo formado no âmbito do "Experimento Micrometeorológico na Região Amazônica", cujos aspectos mais gerais foram apresentados por Shuttleworth et alli (1984).

Os perfis de velocidade do vento utilizados para a determinação dos parâmetros de rugosidade da floresta, foram compostos a partir de medidas realizadas em seis níveis diferentes acima das copas das árvores (35,69; 37,52; 39,33; 41,04; 42,82 e 44,66m), por meio de anemômetros de conchas dispostos nas extremidades de tubos metálicos que os mantêm afastados 3,5m das faces laterais da torre.

As medidas de temperatura e umidade específica do ar, necessárias para a definição das condições de estabilidade atmosférica, foram obtidas através de pares de termômetros (termômetro de bulbo seco e bulbo úmido), que constituem um sistema de intercâmbio de posição em que cada par de termômetros (psicrômetro) acaba fazendo medidas em dois níveis, de forma alternada, e minimizando assim o erro sistemático próprio a cada conjunto psicrométrico. Os sensores de temperatura são cristais de quartzo. No experimento da Reserva Ducke esse sistema fornece medidas para quatro níveis acima das árvores (35,65; 39,35; 40,94 e 44,65).

Esses sensores (termômetros e anemômetros) enviam os sinais (oscilações e giros) para um acumulador eletrônico, que em períodos pré-selecionados remete as informações ao microcomputador, assim habilitando-o ao processamento das velocidades e temperaturas médias para intervalos de 20 minutos. Uma descrição detalhada do sistema de aquisição de dados é encontrada no trabalho de McNeil & Shuttleworth (1975).

As medidas dos fluxos de calor sensível, calor latente e de momentum, foram realizadas por meio do Hydra, um sistema composto por um anemômetro sônico vertical, um higrômetro de absorção no infra-vermelho (2700 nm), um termômetro constituído por termo-par, e dois anemômetros de hélice montados ortogonalmente num plano horizontal, todos eles acoplados a um micro-processador, que executa o cálculo dos fluxos (Shuttleworth et alli, 1984).

Acima de uma superfície uniforme coberta ou não por vegetação a variação da velocidade do vento com relação a altura é descrita pela equação,

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_*}{k(z-d)} \phi_m \quad (1)$$

na qual,

- u expressa a velocidade do vento (m/s)
- z altura de observação (m)
- u_* velocidade de fricção (m/s)

- K constante de von karman (adimensional) = 0,4
- d altura de deslocamento do plano de referência (m)
- ϕ_m função adimensional de estabilidade para momentum

Considerações teóricas prevêm que essa função apresenta os valores $\phi_m > 1$ para condições estáveis; $\phi_m < 1$ para condições instáveis e $\phi_m = 1$ para condições de neutralidade na atmosfera.

Um critério adequado para a caracterização das condições de estabilidade atmosférica, apropriado para utilização nos casos em que sejam disponíveis informações apenas sobre os gradientes das variáveis meteorológicas, é o número de Richardson, Ri, definido por,

$$Ri = (g/T_0) (\partial\Theta/\partial z) / (\partial u/\partial z)^2 \quad (2)$$

em que Θ representa a temperatura potencial ($\Theta = \Gamma + G z$; Γ é o valor do gradiente de temperatura da adiabática seca $\approx 0,01^\circ\text{K/m}$).

No caso específico de neutralidade na atmosfera, a equação 1 pode ser integrada imediatamente, resultando a expressão.

$$u = (u^*/k) \ln\{(z-d)/z_0\} \quad (3)$$

A constante de integração z_0 representa uma medida da rugosidade da cobertura vegetal quando submetida ao fluxo horizontal de ar. O parâmetro d por sua vez aparece para a obtenção de um melhor ajuste das observações, em cobertura vegetal de grande porte, ao perfil logarítmico.

Esses dois parâmetros podem ser determinados a partir de uma série de perfis de velocidade do vento, observados em condições próximas da neutralidade atmosférica, $\partial\Theta/\partial z = 0$, e ajustados à equação 3 pelo processo dos mínimos quadrados, segundo o seguinte procedimento:

-estabelece-se a função objetiva S, que se procura minimizar, como função das variáveis u_0 , d e z_0 , na seguinte expressão:

$$S = \sum_{i=1}^N \{ u_0(i) - u(i) \}^2$$

onde $u_0(i)$ representa os valores observados de velocidade do vento, $u(i)$ os valores calculados através da equação 3 e N é o número de pontos em cada perfil.

- o mínimo da função objetiva deve apresentar valores nulos em todas as derivadas primeiras com relação a cada um dos parâmetros, ou seja, $\partial S/\partial u_0 = \partial S/\partial d = \partial S/\partial z_0 = 0$. As expressões correspondentes são as seguintes:

$$\partial S/\partial u_0 = \sum_{i=1}^N -2 \{ u_0(i) - u(i) \} (1/k) \ln\{(z-d)/z_0\} = 0$$

$$\partial S/\partial d = \sum_{i=1}^N 2 \{ u_0(i) - u(i) \} (u_0/k) \{ 1/(z-d) \} = 0$$

$$\partial S / \partial z_0 = \sum_{i=1}^N 2 \{u_0(i) - u(i)\} (u_i/k) \{1/z_0\} = 0$$

O procedimento adotado para pesquisar a solução desse sistema de equações está baseado no método iterativo de Neuton-Raphson, adaptado ao caso particular em estudo. Uma determinação preliminar do parâmetro d, já próxima da solução final, permite uma aceleração no processo de otimização. Esse método apresenta a particularidade de ser sempre convergente para a situação em que as estimativas iniciais dos paraâmetros procurados já estejam próximas dos valores ótimos, isto notadamente quando a função objetiva não é bem comportada.

Como medida da estabilidade atmosférica, na análise relativa a função adimensional para momentum, foi utilizado o conceito de comprimento de estabilidade de Monin-Obukhov. No estudo dimensional que originou a proposta desse parâmetro, a hipótese básica assumida é que para turbulência completamente desenvolvida os gradientes verticais de uma certa propriedade são determinados pelos fluxos constantes de momentum, calor sensível, e o próprio fluxo relativo a propriedade, além do parâmetro que caracteriza as condições de flutuabilidade, g/T_0 , e da coordenada (z-d) (Calder, 1967). No caso específico de momentum, isto equivale pesquisar a dependência dada por $\phi_M = \phi_M \{(z-d)/L\}$. O comprimento de estabilidade L é dado por

$$L = -(u_* \rho) / \{kg[H/(T_0 c_p + 0,61E)]\} \quad (4)$$

onde os símbolos têm os seguintes significados:

- ρ densidade do ar (Kg/m³)
- c_p calor específico do ar a pressão constante {joule/(kg°K)}
- g aceleração da gravidade (m/s²)
- T_0 temperatura do ar no nível de referência (°K)
- E fluxo de calor latente {Kg/m²s}
- H fluxo de calor sensível (watt/m²)

Em condições instáveis, a função adimensional para momentum tem sido amiudemente relacionada a razão (z-d)/L por meio da equação

$$\phi_M = \{1 - (z-d)/L\}^B \quad (5)$$

Uma série de observações simultâneas de fluxos e gradientes permite a formação de pares de valores ϕ_M (calculado através da equação 1) e (z-d)/L (L obtido através da equação 4), que podem ser usados para ajustar a forma da equação 5, com a consequente determinação dos parâmetros α e B mais apropriados. Neste caso o critério de ajuste escolhido foi a minimização da equação

$$ZT = ZT(\alpha, B) = \sum_{i=1}^N \{Ln\phi_{M_0} - Ln\phi_M\}^2$$

na qual

- ϕ_{M_0} representa valores observados
- ϕ_M valores calculados através da equação 5

n número total de pontos obtidos

A solução final, neste caso, é pesquisada através da conformação própria apresentada pela função objetiva, procurando-se dessa forma trazer informações adicionais sobre a dependência e sensibilidade dos parâmetros α e B .

RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Originalmente os dados meteorológicos que formam os perfis de velocidade do vento, temperatura e umidade específica do ar foram armazenados como valores médios para intervalos de 20 minutos; as medidas dos fluxos de calor sensível, calor latente e momentum, correspondem a valores médios horários. Numa etapa preliminar fêz-se a adequação de todas as informações ao padrão de médias horárias.

A partir daí as condições de estabilidade das camadas de ar acima da floresta foram determinadas pelo cálculo do número de Richardson Ri , na região em que se dispunham medidas de temperatura e umidade específica do ar, registradas pelo sistema de intercâmbio; nessa região os gradientes mais confiáveis das variáveis meteorológicas correspondem às camadas compreendidas entre os níveis 44,65-40,94 e 39,33-35,65 m, devido a eliminação dos erros sistemáticos de medidas que ocorrem entre estes níveis.

A justaposição dos perfis de velocidade do vento, observados em condições de neutralidade atmosférica, revela que os níveis inferiores encontram-se numa zona de transição, sob a influência da parte superior das copas das árvores, especialmente velocidades do vento registradas no nível de 35,69 m. Desta forma, as informações correspondentes a este nível não foram incluídas na análise dos parâmetros de rugosidade da floresta.

A seleção de um dado perfil para execução desta tarefa esteve subordinada às seguintes condições:

- . a condição de neutralidade é assumida para todos os perfis que apresentem $|Ri| < 0,005$;
- . perfis com velocidades baixas não são considerados ($u < 1$ m/s);
- . os perfis selecionados pertencem às campanhas de ago/set 83 e jul/ago 84.

Na tabela 1 são mostrados os perfis de velocidade do vento, selecionados sob as condições acima, em conjunto com os valores otimizados dos parâmetros u_* , d e z_0 . É mostrada nesta tabela, uma otimização global, na qual cada perfil contribui com uma parcela na composição de uma função objetiva que integraliza simultaneamente, para valor fixo de d , as diferenças entre pontos observados e calculados em cada perfil. O mínimo desta função é que determina os valores a serem adotados para os parâmetros d e z_0 . A escolha de tal procedimento se apoia no fato de que é mais conveniente se ter um ajuste de boa qualidade para todos os perfis selecionados, do que se estabelecer ajustes individuais em cada perfil e a partir daí, calcular os valores médios resultantes para os parâmetros. Não há garantia de que estas médias manteriam bons ajustes em todos os perfis.

Desta forma os valores otimizados dos parâmetros característicos da rugosidade da floresta são os seguintes: $d=30,7$ m e $z_0 = 2,2$ m, que são propostos como estimativas apropriadas para o porte da floresta Amazônica. As relações destes valores com a altura da vegetação ($h=35$ m) são expressas pelas igualdades: $d= 0,88h$ e $0,03 < z_0/h < 0,08$.

A qualidade dos ajustes alcançados é mostrada nas figuras 1 e 2, nas quais são desenhados os perfis originais, tendo como coordenadas u versus $\ln(z)$, e os perfis otimizados com u versus $(\ln(z-d))$. É aparente na figura 1 algum problema relacionado com a velocidade do vento no nível intermediário do perfil. Essas pequenas imperfeições não foram eliminadas, procurando-se evitar o excesso de regras restritivas na etapa de seleção. Já na figura 2 têm-se uma concordância bastante aceitável entre valores observados e calculados.

A faixa de valores na qual se situam as estimativas do parâmetro z_0 , 1,3 a 2,7m, não se constitui um fato inesperado; esses resultados estão associados a cobertura vegetal de grande

Tabela 1 - Perfis de velocidade do vento.

Data		Perfil observado					Otimização isolada			Otimização global		
		"1	"2	"3 m/s	"4	"5	u_0 m/s	d m	z_0 m	d m	u_0 m/s	z_0 m
021083	10	3,00	2,77	2,57	2,21	1,84	0,55	32,39	1,30	30,7	0,67	2,19
	11	3,28	3,08	2,91	2,54	2,16	0,42	34,04	0,42	30,7	0,85	1,72
260884	15	2,46	2,29	2,12	1,97	1,70	0,44	30,28	1,50	30,7	0,43	1,32
	16	2,96	2,71	2,43	2,19	1,79	0,76	29,25	3,15	30,7	0,66	2,25
	20	3,14	2,84	2,51	2,23	1,77	1,04	27,34	5,06	30,7	0,77	2,68
	21	3,07	2,78	2,49	2,20	1,77	0,89	28,64	3,91	30,7	0,73	2,53
	23	2,71	2,46	2,19	1,95	1,52	0,65	30,99	2,47	30,7	0,67	2,66
270884	02	3,44	3,14	2,82	2,53	2,05	0,92	29,03	3,37	30,7	0,78	2,32

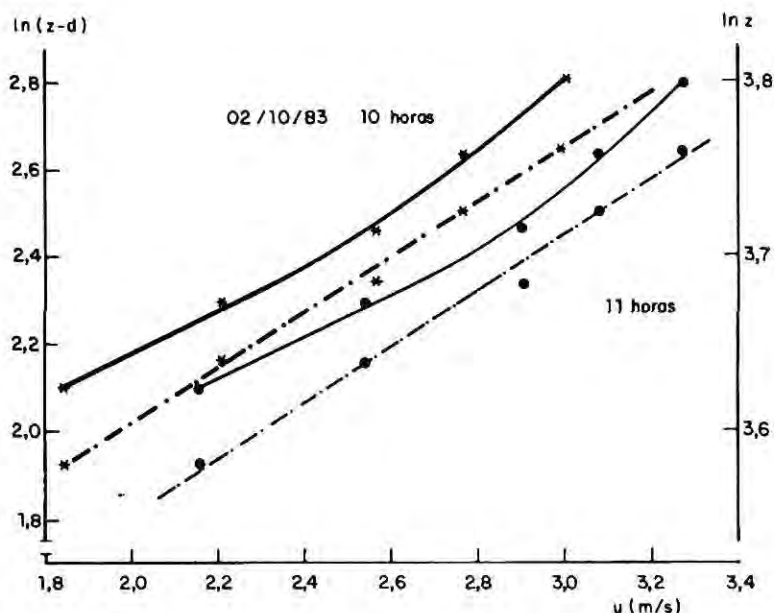


Figura 1 - Perfis de velocidade do vento observados em condições de neutralidade atmosférica (1983).

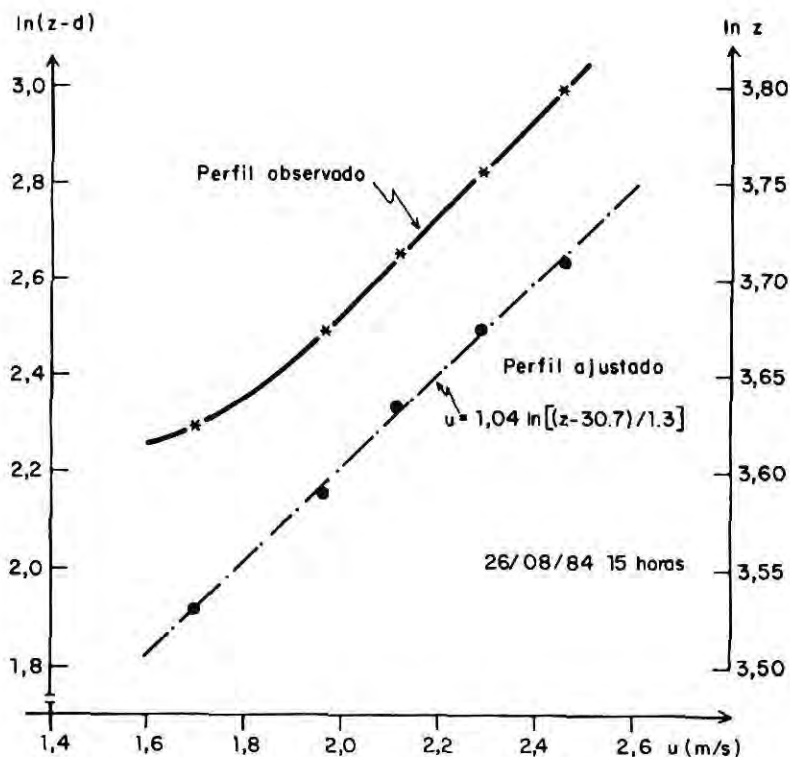


Figura 2 - Perfil de velocidade do vento observado em condições de neutralidade atmosférica (1984).

porte, composta por elementos flexíveis, que devem responder a ação do fluxo horizontal de ar, de diferentes maneiras em correspondência às características próprias do fluxo. Provavelmente a faixa de variação para z_0 é mais larga do que esta obtida presentemente.

Na tabela 2 estão reunidas as informações que permitiram o estabelecimento da dependência da função adimensional para momentum ϕ_w e a variável independente $(z-d)/L$.

Os critérios adotados para a seleção das observações sobre os fluxos e gradientes foram os seguintes:

- . o valor médio da velocidade do vento medida ao nível do Hydra; 48,4m, deve ser maior do que 1 m/s;
- . os perfis e fluxos observados devem corresponder ao período entre 8 e 17 horas;
- . horários com excessiva variação nas condições de observação local não são considerados;
- . as discrepâncias entre os valores da velocidade de fricção medida pelo Hydra, que apresenta erros sistemáticos no valor de u_* numa subestimação que pode alcançar 30%, e u_* determinado a partir das características dos perfis de velocidade do vento devem ser da mesma ordem de grandeza do erro instrumental da medida.

Utilizando o valor de 30,7m como o nível do plano de referência estabelecido na etapa anterior, a figura 3 mostra os pontos que correspondem aos pares de valores ϕ_w e $(z-d)/L$, utilizados para a determinação dos parâmetros α e β . A faixa de variação da variável

Tabela 2 - Perfis de velocidade do vento e fluxos observados.

Data		"1 ←	"2	"3	"4 m/s	"5	"6 →	LF Watt/m ²	H	U _{ph} U _p ← m/s →	-L m
240983	11	-	1,92	-	1,71	1,52	1,28	321	186	0,30 0,39	27
250983	09	-	1,28	-	1,13	1,04	0,83	233	185	0,30 0,34	18
	12	-	2,39	2,28	2,17	1,95	1,63	412	228	0,40 0,52	50
	13	-	1,41	1,35	1,25	1,16	0,96	293	150	0,34 0,32	18
260983	13	-	2,42	2,25	2,05	1,78	1,47	329	118	0,41 0,51	84
	14	-	2,82	2,67	2,48	2,14	1,76	372	252	0,44 0,62	77
090884	08	3,08	2,72	2,61	2,29	1,86	1,40	200	70	0,45 0,76	460
	09	3,44	3,13	2,97	2,64	2,17	1,70	330	124	0,59 0,76	270
	14	3,27	2,98	2,90	2,64	2,38	2,09	294	58	0,46 0,47	119
100884	10	3,90	3,48	3,31	2,95	2,43	2,01	341	153	0,60 0,87	339
	11	3,71	3,30	3,20	2,90	2,42	1,97	406	163	0,56 0,87	308
110884	08	3,15	2,78	2,67	2,30	1,95	1,45	230	78	0,49 0,82	526
	09	3,64	3,28	3,13	1,73	2,36	1,81	337	142	0,58 0,89	381
	10	3,76	3,37	3,23	2,83	2,49	1,91	409	189	0,60 0,96	363
150884	10	2,63	2,43	2,35	2,11	1,90	1,48	305	216	0,47 0,68	120
	11	1,88	1,72	1,66	1,46	1,28	1,01	450	216	0,49 0,45	33
	12	2,01	1,84	1,81	1,62	1,50	1,22	416	188	0,41 0,46	40
	13	1,97	1,75	-	1,53	1,41	1,14	313	174	0,36 0,44	39
190884	10	1,76	1,67	1,59	1,39	1,28	0,99	274	138	0,24 0,26	10
200884	09	2,00	1,94	1,84	1,66	1,63	1,36	288	151	0,33 0,44	45
	10	2,04	1,95	1,87	1,65	1,57	1,29	303	163	0,30 0,46	48
	12	2,08	2,00	1,91	1,67	1,55	1,26	357	113	0,31 0,25	9
	15	1,95	1,84	-	-	1,61	1,42	194	82	0,32 0,32	31
210884	14	3,38	3,09	3,02	2,51	2,24	1,77	365	123	0,55 0,77	274
	15	2,73	2,50	-	2,12	1,88	1,55	276	79	0,47 0,55	147
220884	10	3,85	3,51	3,28	2,97	2,53	2,02	510	205	0,67 0,84	222
	14	3,44	3,12	-	2,57	2,12	1,60	404	134	0,56 0,85	340
	16	2,60	2,38	-	2,08	1,86	1,52	137	53	0,35 0,56	245
230884	08	3,43	3,03	2,83	2,55	2,23	1,73	250	78	0,49 0,81	517
	09	3,36	3,06	2,87	2,62	2,29	1,82	353	135	0,53 0,77	252
	11	3,21	2,95	2,77	2,50	2,18	1,75	454	202	0,56 0,70	133
	13	2,75	2,58	-	2,26	1,97	1,62	411	196	0,48 0,57	73
	14	2,79	2,57	-	2,18	1,86	1,42	314	107	0,42 0,71	253
240884	10	3,58	3,31	3,10	2,87	2,56	2,12	436	137	0,53 0,71	193
	13	2,62	2,43	-	2,17	1,98	1,69	412	124	0,45 0,48	65
250884	09	3,38	3,06	2,87	2,69	2,52	2,14	218	106	0,43 0,61	172
	10	3,18	2,92	2,78	2,62	2,50	2,19	312	166	0,51 0,49	58

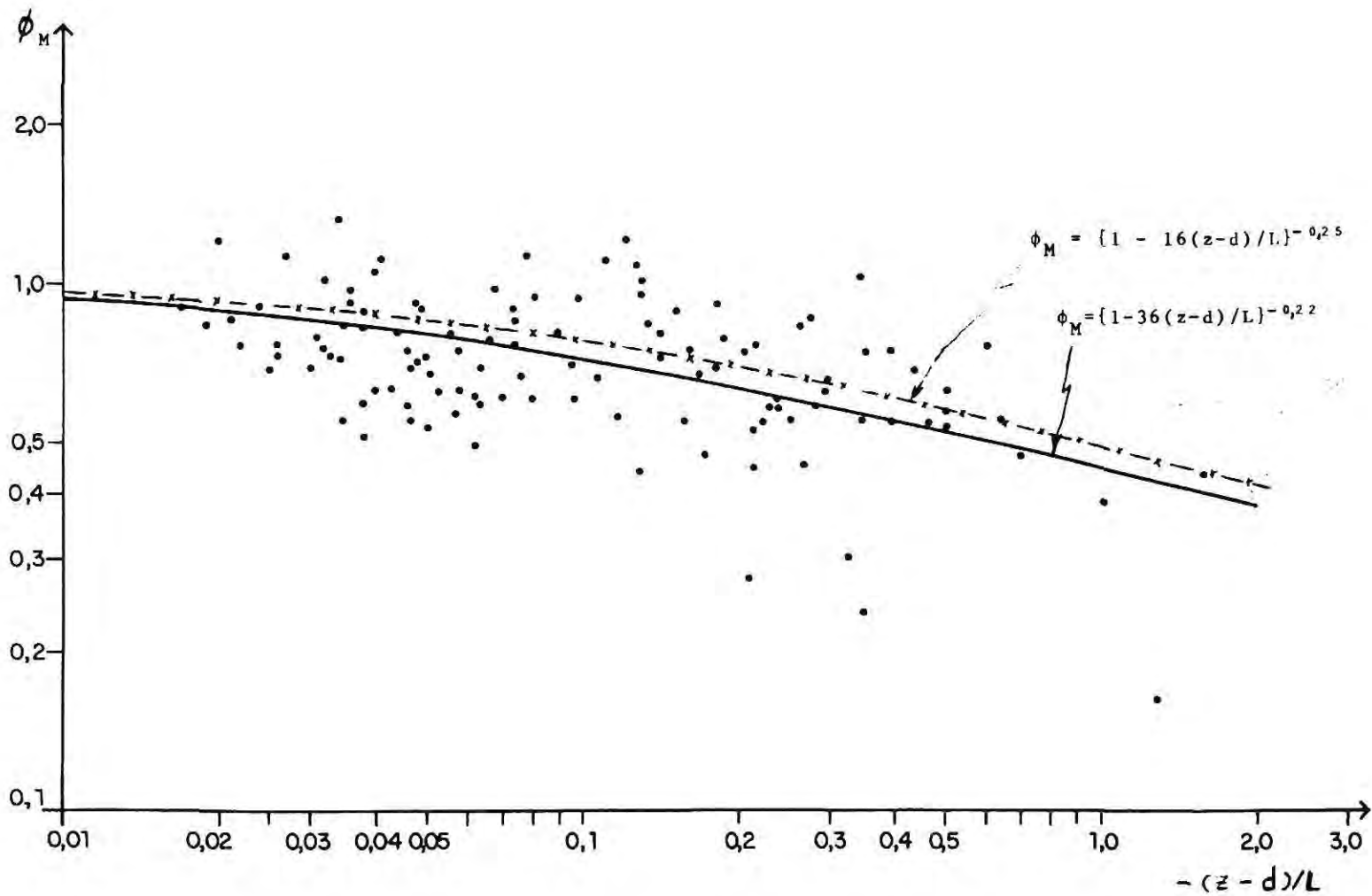


Figura 3 - Estudo da dependência da função adimensional para momentum ϕ_M e o parâmetro $(z - d) / L$.

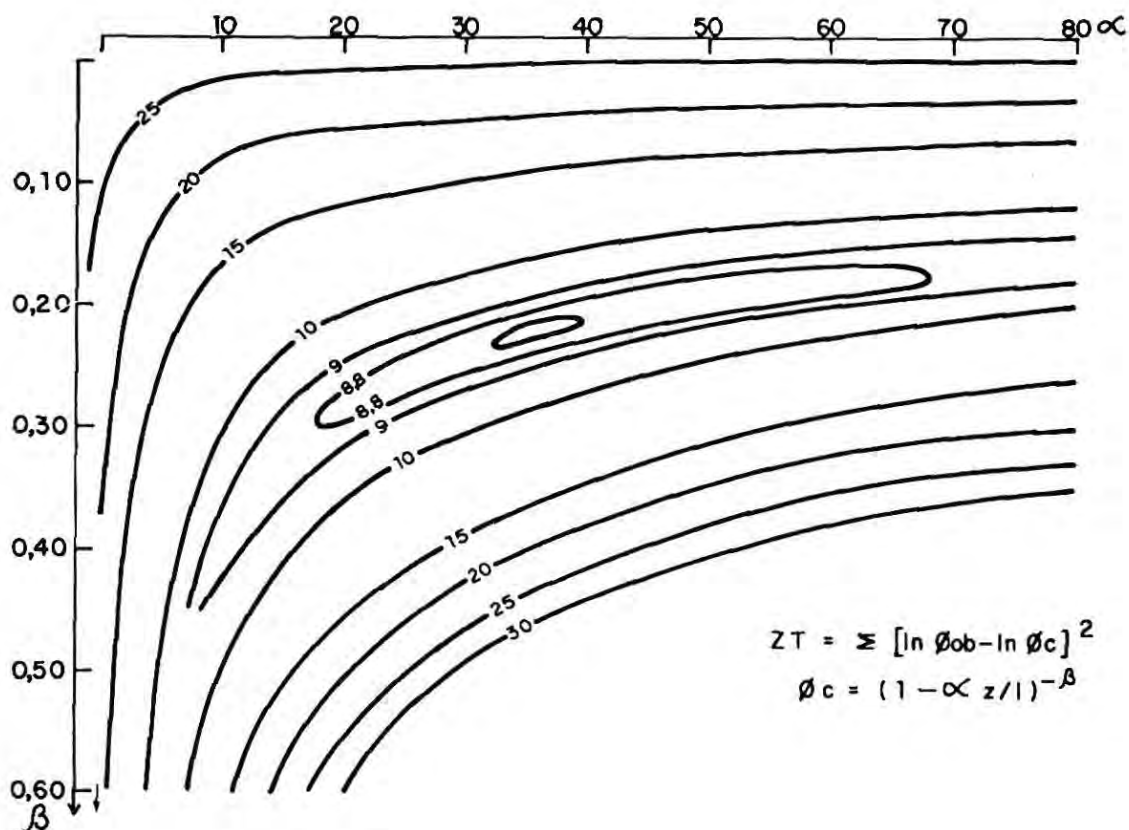


Figura 4 - Conformação da função objetiva ZT

independente é dada por $-0,01 < (z-d)/L < -2$, enquanto que a função adimensional tem um campo de valores $0,16 < \phi_n < 1,35$.

A figura 4 mostra a conformação da função objetiva ZT; certa dependência, revelada pelo aspecto das curvas de iguais valores de ZT, parece existir entre os dois parâmetros α e β . Outro fato interessante da figura é a pequena sensibilidade da função objetiva diante de variações do coeficiente α , o que permite afirmar que a solução final pode dispensar uma determinação mais precisa desse coeficiente. Dessa figura são retirados os valores ótimos procurados quais sejam, $\alpha = 36$ e $\beta = 0,22$. Um confronto entre essa curva resultante com outras curvas, provenientes de estudos similares realizados em coberturas vegetais de médio porte, é apresentado na figura 3.

Estabelecida a função adimensional de estabilidade para momentum, $\phi_n = [1 - 36(z-d)/L]^{-2/9}$, torna-se possível a integração da equação 1, para produzir uma relação entre a velocidade do vento, tomada como variável dependente, em função da altura de observação e das condições de estabilidade atmosférica. Assumindo as igualdades $y = (z-d)/L$, $dy = (1/L)dz$, e $x = (1 - 36y)^{1/9}$, a integração da equação 1 pode ser reduzida a seguinte forma:

$$\partial u = (u_*/k) \{ [1 - 36(z-d)/L]^{-2/9} / (z-d) \} \partial z = (u_*/k) \{ 9x^6 / (x^9 - 1) \} dx$$

que é integrável por meio do desmembramento em frações parciais, conforme a descrição abaixo.

As raízes do polinômio (x^9-1) estão subordinadas a formulação genérica, $\cos(k_0 \pi/9) + i.\text{sen}(k_0 \pi/9)$, $k_0 = 1, 2, \dots, 8$. Reunindo as raízes imaginárias conjugadas em termos de segundo grau, é possível representar esse polinômio pelo produto dos seguintes termos

$(x-1)\{x^2-2\cos(2\pi/9)x+1\}\{x^2-2\cos(4\pi/9)x+1\}\{x^2-2\cos(6\pi/9)x+1\}\{x^2-2\cos(8\pi/9)x+1\}$, pelo procedimento que viabiliza o desmembramento da integral.

Após a determinação das constantes que devem aparecer nos numeradores das frações parciais, a solução procurada resume-se na integração das seguintes parcelas:

$$\int (x-1)^{-1} dx + \int \frac{2\cos(4\pi/9)x + 1}{\{x^2-2\cos(2\pi/9)x + 1\}} dx + \int \frac{2\cos(8\pi/9)x + 1}{\{x^2-2\cos(4\pi/9)x+1\}} dx$$

$$+ \int \frac{2\cos(12\pi/9)x - 2}{\{x^2-2\cos(6\pi/9)x + 1\}} dx + \int \frac{2\cos(16\pi/9)x + 1}{\{x^2-2\cos(8\pi/9)x + 1\}} dx$$

As soluções correspondentes a cada uma dessas parcelas, a definição da constante de integração a partir da condição de que $u=0$ para $(z-d) = z_0$, e a consideração da variável $x_0=(1-36z_0/L)^{1/9}$, possibilitam expressar a solução final na forma generalizada do perfil logarítmico, dada por

$$u = (u_s/k) \{ \text{Ln} |(z - d)/z_0| + \Psi \} \quad (7)$$

na qual aparece a função integral de estabilidade para momentum, obtida como parte da solução das cinco integrais apresentadas acima e descrita numa forma sintética pela seguinte equação:

$$\Psi = \sum_{n=1}^4 \left\{ [\cos(4n\pi/9)-1] \text{Ln} \left[\frac{x^2-2\cos(2n\pi/9)x+1}{x_0^2-2\cos(2n\pi/9)x_0+1} \right] \right.$$

$$\left. + S_n \frac{1+2\cos(2n\pi/9)\cos(4n\pi/9)}{\text{sen}(2n\pi/9)} \text{atg} \frac{x-\cos(2n\pi/9)}{\text{sen}(2n\pi/9)} - \text{atg} \frac{x_0-\cos(2n\pi/9)}{\text{sen}(2n\pi/9)} \right\} \quad (8)$$

onde a variável S_n apresenta os seguintes valores $S_1=S_2=S_4 = 1$ e $S_3 = -1$. Essa equação é facilmente adaptável para procedimentos computacionais em estudos hidrometeorológicos que prevejam correções de estabilidade aos fluxos, quando estes são determinados a partir de informações indiretas dos perfis de velocidade do vento, temperatura e umidade específica do ar.

CONCLUSÕES

Os parâmetros característicos da rugosidade da vegetação existente na Reserva Florestal Ducke, devem assumir os seguintes valores: $d = 30,7\text{m}$ e $z_0 = 2,2\text{m}$, em modelos simplificados usados para estimar a evaporação da floresta.

Em outros locais na região, esses parâmetros podem ser estabelecidos a partir do conhecimento da altura média da vegetação, por meio das relações, $d = 0,88h$ e $z_0 = 0,06h$.

As correções que devem sofrer os fluxos de momentum em condições de instabilidade atmosférica, $0 > (z-d)/L > -2$, podem ser feitas agora através da equação $\phi_w = \{ 1 - 36(z-d)/L \}^{-2/9}$. Funções similares para os fluxos de calor sensível e calor latente precisam ainda ser estabelecidas, de forma a completar o quadro de relações básicas, que representam o suporte para a aplicação apropriada de formulações simplificadas da interação floresta-atmosfera na região.

SUMMARY

Values of parameters which characterize forest rugosity for horizontal air flux are determined from wind velocity profiles over the vegetation, in atmospheric neutral conditions, $\partial\Theta/\partial z = 0$. These profiles are adjusted to the logarithmic profiles by numeric optimization procedure. Analyses over the connection between flux and gradients of wind velocity for other atmospheric conditions are also presented. Meteorological informations of this work were obtained in the Amazon. Micrometeorological Experimente, during september 1983 at Ducke Reserve, Manaus-AM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CALDER, K.L. 1967 A criticism of Bernstein's new adimensional approach to the flux-gradient relationship near the ground. *Quart. Jour. Royal Met. Society* 93(398):544-551
- JARVIS, P.G.; JAMES, G.B.; LANDSBERG, J.J. 1975 Coniferous forest. In: *Vegetation and the atmosphere*, Editor J.L. Monteith-Academic Press
- MCNEILL, D.D.; SHUTTLEWORTH, W.J. 1975 Comparative measurements of the energy fluxes over a pine; *Boundary - Layer Meteorology* 9: 297-313
- SHUTTLEWORTH, W.J.; GASH, J.H.C.; LLOYD, C.R.; MOORE, C.J.; ROBERTS, J.M.; MARQUES FILHO, A.O.; FISCH, G.F.; SILVA FILHO, V.P.; RIBEIRO, M.N. MOLION, L.C.B.; SÁ, L.D.A.; NOBRE, J.C.; CABRAL, L.M.R.; PATEL, S.R.; MORAES, J.C. 1984 Eddy correlation measurements of energy partition for Amazonian forest. *Quart. Jour. Royal Meteor. Society* 110:1143-62.
- YAGLOM, A.M. 1977 Comments on wind and temperature flux-profiles relationship. *Boundary - Layer Meteorology* 11: 89-102

Aceito para publicação em 25.05.1992