

ATENUAÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR E DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DE ÁREA FOLIAR EM FLORESTA – RESERVA JARU - RONDÔNIA, BRASIL

Ari de O. MARQUES FILHO⁽¹⁾, Ricardo G. DALLAROSA⁽¹⁾

RESUMO - A atenuação de radiação solar em meio vegetal e sua relação com a distribuição espacial dos elementos vegetais são estudadas neste trabalho. Técnicas experimentais de amostragem de radiação no interior de coberturas vegetais de grande porte são utilizadas, tendo como base dispositivos de suporte móveis constituídos por reticulados modulares suspensos na parte superior das grandes árvores, que permitem a disposição dos sensores de radiação em diferentes níveis de uma mesma vertical no interior da cobertura. As medidas de radiação solar foram realizadas no sítio experimental da Reserva Florestal Jaru (10°05' S; 61°55' W), Ji-Paraná – Brasil, no período de 30 de outubro a 24 de novembro de 1999. A inversão de modelo físico de radiação permitiu o estabelecimento da função de densidade de área foliar com um valor médio de índice de área foliar IAF de 5,6 para a vegetação do local.

Palavras Chaves: índice de área foliar, radiação solar, floresta, Amazônia.

Solar Radiation Attenuation and Vertical Leaf Area Distribution in Forest – Reserva Jaru - Rondônia, Brazil

ABSTRACT - The attenuation of solar radiation in a forest medium and its relationship with the spatial distribution of the canopy elements are investigated in this work. A novel sampling technique is used for the radiation measurements inside the tall canopy covers, having a mobile support apparatus, made up of modular reticulates suspended on the top of the large trees, which allows the placement of the radiation sensors on different heights along a vertical line within the canopy. Solar radiation measurements were made at the experimental site of Reserva Jaru (10°05' S; 61°55' W), Ji-Paraná – Brazil, in the period from 30 Oct. to 24 Nov. 1999. Inversion of the solar radiation physical model allowed the establishment of the leaf area density and the average value for the leaf area index (LAI) for the local vegetation was found to be 5.6.

Keywords: leaf area index, solar radiation, forest, Amazonia.

INTRODUÇÃO

As trocas de energia e de massa entre coberturas vegetais e a atmosfera têm reguladores próprios na vegetação associados aos fatores estruturais e fisiológicos que a caracterizam. As relações energéticas que originam e sustentam essas trocas são governadas por uma fonte primária de radiação solar externa e independente, complementada pela radiação “interna” de onda longa dos elementos vegetais e do solo subjacente à

cobertura.

A atenuação da radiação solar em meio vegetal é um fenômeno físico de dupla utilidade nos limites pretendidos desta abordagem: por um lado, o conhecimento de seu perfil vertical no interior de uma cobertura vegetal permite a definição da distribuição de energia disponível nos diferentes estratos da vegetação e, por conseqüência, dos perfis verticais das fontes de calor e de vapor d'água na cobertura; por outro lado, a estreita dependência existente entre essa

¹Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – Coordenação de Pesquisas em Geociências. CP. 478. Manaus, AM - Brasil 69011-970

atenuação e a distribuição espacial dos elementos vegetais representa a base de apoio para uma grande parte dos métodos indiretos de caracterização de uma cobertura vegetal, especialmente na sua função de densidade de área foliar (distribuição vertical e variabilidade horizontal) e no seu índice de área foliar, IAF.

Os conceitos teóricos sobre a radiação solar em meio vegetal são reunidos em modelos físicos explicitados de forma analítica (Nilson, 1971; Ross, 1981; Myneni *et al.*, 1989) e apropriados à inversão matemática para a derivação de características principais da vegetação (índice de área foliar, IAF; distribuição vertical de densidade de área foliar) (Welles & Norman, 1991; Andrieu & Baret, 1993).

Estudos dessa natureza têm sido realizados em coberturas vegetais de médio e grande porte na Amazônia, constituindo-se de determinações do IAF e da distribuição vertical da função $a(z)$ (densidade de área foliar) por métodos indiretos baseados na penetração de radiação solar no meio vegetal (Honzák *et al.*, 1996; Wandelli & Marques Filho, 1999) que se posicionam como importantes alternativas aos métodos destrutivos e trabalhosos de medida direta de toda área foliar existente numa área amostral escolhida (McWilliam *et al.*, 1993).

As variações temporais da radiação solar e a distribuição vertical de área foliar em florestas foram medidas e estudadas com o suporte de torre metálica que sobressai acima das

copas das árvores e sobre a qual foram dispostos os sensores de radiação em diferentes níveis no interior da cobertura (Marques Filho, 1997). As dificuldades principais em tais tipos de experimentos estão sempre associadas à proximidade inevitável entre os sensores e os elementos estruturais da torre (afastamentos normais de 5 a 6 m). No domínio da interação radiação solar – vegetação, a presença da torre com seus patamares regularmente distribuídos na vertical incorpora superfícies adicionais (estranhas à vegetação) que interceptam radiação e cujos efeitos sobre as medidas não podem ser separados facilmente da atenuação natural da radiação imposta pela vegetação. O desenvolvimento de dispositivo alternativo de medidas de radiação solar no interior da vegetação que minimiza essas dificuldades experimentais foi apresentado por Marques Filho & Dallarosa (2000).

Nesse contexto, o presente estudo tem os seguintes objetivos: apresentar e analisar o comportamento da radiação solar no interior de floresta, enfocando a sua variabilidade espaço-temporal e os fatores que determinam a sua atenuação na direção vertical; inverter modelo físico do regime de radiação solar em meio vegetal para a derivação da função $a(z)$ de densidade de área foliar média para a cobertura do local.

MATERIAL E MÉTODOS

A) Área de estudo

Sítio/Vegetação

O trabalho foi realizado numa área da Reserva Biológica do Jaru, distante cerca de 80km ao norte de Ji-Paraná (RO), no sudoeste da região Amazônica (10°05'S; 61°55'W), entre os dias 30/10 e 24/11 de 1999. O tipo de solo característico é o Podsol, com um conteúdo particularmente alto de areia, principalmente no perfil próximo à superfície (McWilliam *et al.*, 1993). A altitude local é de 120m e o relevo apresenta pequenas ondulações que modulam a superfície média do dossel que registra uma altura de 33m, com algumas árvores emergentes chegando a atingir mais de 40m. A vegetação é constituída de espécies típicas de floresta natural não-perturbada e foi alvo de um breve levantamento realizado ao redor da

torre permitindo observar-se algumas das suas características (Fig.1; Tab. 1).

Foi delimitada uma área circular de diâmetro igual a 30m ao redor da torre meteorológica (quadrado ao centro da figura). A partir de então, dividiu-se essa área em quatro setores de igual área (N, L, S e O) conforme indicado na Figura 1. Foi efetuada a contagem da vegetação dentro de cada setor, caracterizada pelo respectivo DAP (diâmetro à altura do peito) e classificada segundo sua altura, conforme segue:

DAP < 10cm ⇒ arbusto (desde 1m até 4m)

⇒ arvoreta (acima de 4m; medida: altura aproximada)

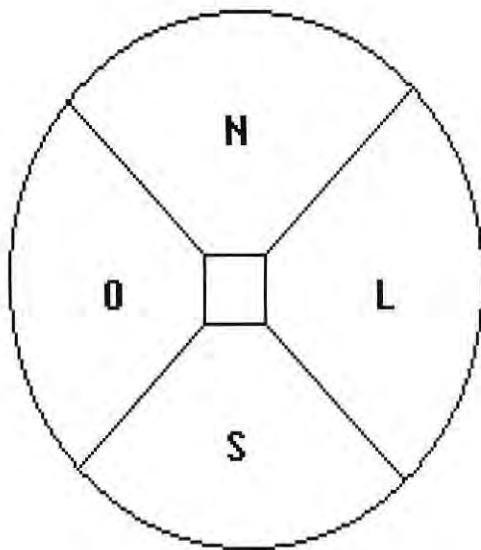


Figura 1. Esquema de posicionamento dos setores (N, L, S e O) utilizados no levantamento da vegetação em relação à torre meteorológica da Reserva do Jaru.

DAP \geq 10cm \Rightarrow árvores (medidas:
DAP (diâmetro à
altura do peito); BC
(base da copa); TC
(topo da copa)
 \Rightarrow palmeira jovem
(abaixo de 4m)
 \Rightarrow palmeira adulta
(acima de 4m)

Microclima

O comportamento das variáveis microclimáticas foi caracterizado a partir de medidas realizadas por meio de uma estação automática instalada no topo da torre meteorológica (\cong 45m); esses dados foram coletados durante os anos de 1992/1993, considerados típicos pela ausência de anomalias de grande escala. A precipitação mensal apresentou uma marcada tendência sazonal, característica da região Amazônica, com um período mais seco entre maio e outubro, seguido de um período bastante chuvoso entre novembro e abril. A umidade relativa seguiu o comportamento sazonal da precipitação apresentando registros médios entre 74,4% em setembro e 80,5% em janeiro. A temperatura média mensal apresentou uma pequena amplitude anual (\cong 3°C) com valores em torno de 23°C em julho, 26°C em setembro e uma amplitude térmica diária de 9°C. O escoamento médio apresentou um pequeno intervalo de variação na sua direção predominante (NW-SSE) com ventos

de fraca intensidade, de 1m/s a 2m/s. A radiação solar inúmeras vezes excedeu os 900 W/m² em valores absolutos e os valores médios observados em torno das 12hs revelaram picos entre os 600 W/m² e os 750 W/m², seguindo a tendência sazonal com valores inferiores a 700 W/m² no período de dezembro à maio e superiores aos 700 W/m² no período de junho a novembro. A radiação líquida variou entre um mínimo aproximado de -45 W/m² nos meses de julho e agosto (por volta das 19-20 horas) e um máximo de 620 W/m² em julho. Maiores detalhes podem ser obtidos em Dallarosa (1996) e Culf *et al.* (1996).

B) Medidas de radiação

As medidas de perfil de radiação solar sob a vegetação utilizadas no modelo de inversão matemática foram realizadas por um sistema automático de aquisição de dados (datalogger 21X, Campbell Scientific Inc, England) disposto junto ao solo. Os sensores utilizados foram solarímetros tubulares (Delta-T Devices Ltd, England) com superfície retangular de 2cm X 100cm e sensibilidade à radiação de comprimentos de onda entre 0,3 e 3,0 μ m (intervalo característico do espectro solar), cujas medidas foram compostas a partir de varreduras dos sensores em intervalos de dez segundos, com subsequentes integrações e cálculo de médias a intervalos de 20 minutos. As medidas nos diferentes níveis foram relacionadas às de um instrumento idêntico instalado no topo da torre

Tabela 1. Distribuição da vegetação em cada parcela, sendo os arbustos, as palmeira jovens e as palmeiras adultas indicados apenas pelo total de indivíduos, enquanto as arvoretas têm seu número total de indivíduos indicado entre parênteses e sua distribuição segundo suas alturas respectivas (conforme as classes estabelecidas), e as árvores, com seus correspondentes DAP, BC e TC.

		N			L			S			O		
	Arbusto	93			89			74			74		
DAP	p. jovem	22			30			46			24		
< 0,10m	p. adulta	00			01			00			00		
	Arvoreta	(43)			(19)			(24)			(37)		
		4-7m	7-10m	10-13m	4-7m	7-10m	10-13m	4-7m	7-10m	10-13m	4-7m	7-10m	10-13m
		28	12	3	11	7	1	18	6	0	21	8	8
	Árvore	DAP	BC	TC	DAP	BC	TC	DAP	BC	TC	DAP	BC	TC
DAP	01	0,10	8,0	16,2	0,11	9,0	12,6	0,10	12,6	14,4	0,11	5,0	12,6
≥ 0,10m	02	0,10	9,0	12,6	0,11	14,4	18,0	0,11	9,0	12,6	0,12	2,0	9,0
	03	0,11	12,6	14,4	0,12	9,0	16,2	0,14	14,4	18,0	0,16	10,8	12,0
	04	0,13	3,0	16,2	0,13	14,4	18,0	0,17	19,8	21,6	0,17	9,0	18,0
	05	0,13	10,0	18,0	0,14	9,0	12,6	0,18	9,0	18,0	0,19	9,0	21,8
	06	0,14	9,0	16,2	0,14	9,0	16,2	0,18	10,8	16,2	0,20	14,4	23,4
	07	0,15	14,4	18,0	0,14	10,8	18,0	0,30	21,6	30,6	0,33	18,0	23,4
	08	0,18	12,6	19,8	0,16	14,4	16,2	0,49	27,0	37,8	0,43	23,2	32,4
	09	0,23	8,0	19,8	0,18	10,8	14,4				0,44	14,4	30,6
	10	0,42	21,6	28,8	0,30	14,4	23,4				0,49	21,8	32,4
	11	0,73	18,0	37,8	0,44	30,6	37,8						
	12	0,74	23,4	39,6	0,58	25,2	39,6						
	13				0,68	18,8	34,2						

meteorológica.

Usualmente, tem-se adotado a utilização de mastros ou torres de estrutura metálica para a fixação dos instrumentos de medida. Essa estrutura, entretanto, interage com o ambiente contaminando as grandezas medidas cujos valores serão tanto mais significativos quanto maior for a influência determinada pela estrutura. Além disso, a dificuldade de deslocamento desses sistemas para a realização de medidas em várias verticais representa um fator limitante ao procedimento de múltipla amostragem. Assim sendo, foi criado um novo tipo de sistema que procurasse aproveitar o suporte natural representado pelas grandes árvores no sentido de suspender estruturas leves, flexíveis e modulares formando um reticulado vertical de sustentação por cabos de aço unindo seções paralelas (previamente montadas) servindo de suporte aos sensores. Esse sistema, detalhadamente descrito em Marques Filho & Dallarosa (2000), foi utilizado nesse trabalho. No contexto desse novo sistema de medidas, a escolha dos pontos amostrais dá-se ao acaso, limitando-se apenas à existência dos suportes de sustentação mais adequados representados pelas grandes árvores.

O período de medidas de radiação na floresta da Reserva Jaru - Rondônia estendeu-se de 30 de outubro a 24 de novembro de 1999. O conjunto total de medidas representa a distribuição de radiação solar acima e no interior da vegetação em três verticais distintas nas proximidades da

torre metálica existente no local. Os períodos específicos de funcionamento do dispositivo em cada vertical foram os seguintes: primeira vertical, de 30/10 a 24/11/99 (alturas de medidas: no solo 0,0; 3,6; 7,6; 11,6; 15,6; 19,6; e 23,6 metros); segunda vertical, de 30/10 a 14/11/99 (alturas de medidas: no solo 0,0; 2,4; 6,4; 10,4; 14,4; e 18,4 metros); terceira vertical, de 15/11 a 24/11/99 (alturas de medidas: no solo 0,0; 3,6; 7,6; 11,6; 15,6; e 19,6 metros). Percebe-se, portanto, a operação de dois sistemas atuando concomitantemente, sendo que um deles foi deslocado em 15/11 para possibilitar a obtenção de medidas em uma terceira vertical.

C) Modelo de obtenção de densidade de área foliar

A atenuação da radiação solar em meio vegetal é resultado primário da quantidade de elementos vegetais que interceptam os raios solares em seu percurso desde o topo até uma determinada altura no interior da vegetação. A orientação e a distribuição espacial desses elementos são outros fatores intervenientes que admitem e determinam configurações especiais da arquitetura da cobertura, responsáveis pelo grau de complexidade encontrado no estabelecimento e obtenção das soluções de equações que governam o regime de radiação em cada tipo de cobertura. Em vegetação densa algumas hipóteses sobre a variação desses fatores (distribuição espacial aleatória e orientação aleatória das normais dos elementos vegetais são os

exemplos mais comuns) simplificam o aparato matemático necessário. Nesses casos, a quantificação de área foliar existente em cada zona da vegetação obtida de forma indireta a partir de medidas de radiação torna-se factível e tem como ponto de partida o estabelecimento de uma relação (modelos físicos ou matemáticos) entre os fluxos de radiação solar e a área foliar acumulada (variação vertical preponderante), arranjados em equações do tipo,

$$\alpha_t = \alpha_t(A) = F_t(A) / F_{\text{global}}(A=0) \quad (1)$$

onde,

F = fluxo de radiação ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

A = área foliar acumulada (adimensional)

α = fluxo relativo de radiação, que é dado pela razão entre o fluxo medido em uma altura z da vegetação e o fluxo no topo.

t = sub-índice que indica radiação total (direta + difusa).

Nessas equações, as variáveis A, α_p , F são dependentes da coordenada vertical e a omissão de tal dependência tem o papel de focalizar as relações específicas que estão sendo apresentadas. Assim, com a subseqüente

preparação do procedimento de inversão (expresso usualmente na forma de um algoritmo computacional) a função inversa que permite a estimativa de área foliar acumulada para cada ponto de interesse de uma mesma vertical é dada formalmente por,

$$A = A(\alpha), \quad (2)$$

sendo o índice de área foliar acumulada dado por,

$$A(z) = \int_z^h a(z) dz$$

onde,

a = densidade de área foliar ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$)

z = altura (m)

h = altura da vegetação (m)

A associação entre fluxos relativos e área foliar acumulada, as definições particulares dos fluxos de radiação direta (proporção β_s), difusa (proporção β_d) e complementar no interior da vegetação, o algoritmo básico de inversão de modelo de radiação e os valores adotados para os diferentes parâmetros, seguem no presente estudo a metodologia proposta por Wandelli & Marques Filho (1999), que de forma resumida incorpora as seguintes equações:

$$\alpha_t(A) = \beta_s \alpha_s(A) + \beta_d \alpha_d(A) + \sum_{k=1}^n \gamma_k \left(\beta_s \alpha_{s,1,k}(A) + \beta_d \alpha_{d,1,k}(A) \right) \quad (3)$$

direta difusa
Radiação primária

(n zonas do espectro)
Radiação complementar

onde,

$$\alpha_s(A) = F_s(A) / F_s(A=0)$$

$$\alpha_d(A) = F_d(A) / F_d(A=0)$$

$$\alpha_{sl}(A) = F_{sl}(A) / F_s(A=0)$$

$$\alpha_{dl}(A) = F_{dl}(A) / F_d(A=0)$$

$$\alpha_x[A(z)] = e^{-K(\theta)A(z)} \quad (4)$$

$$\alpha_{ti}[A(z)] = \int_0^{\pi/2} e^{-K(\theta)A(z)} \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta \quad (5)$$

$$F_{s,dl}(A) = F_{p1}(A) - \frac{\Phi[\mu, r(A_0 - A)]}{\Phi[\mu, rA_0]} F_{p1}(0) - \frac{\Phi[1, rA]}{\Phi[\mu, rA_0]} F_{p2}(A_0) \quad (6)$$

$$\Phi[x, y] = xe^y - (xe^y)^{-1}$$

$F_{s,dl}$ = fluxo de radiação complementar descendente [direto (_s) ou difuso (_{dl})]

μ, r = parâmetros dependentes dos coeficientes de reflexão e transmissão dos elementos vegetais,

$K(\theta)$ = coeficiente de extinção de luz [=1/(2cos θ)] para a orientação aleatória dos elementos vegetais.

Na equação 3, a radiação complementar no interior da cobertura vegetal é representada pela última parcela sob a somatória, cujos termos estão afetados pelos coeficientes de partição γ_k , compreendendo duas zonas do espectro eletromagnético com valores equivalentes e iguais a 0,5, que representam a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e a radiação infravermelha (RIV).

As funções particulares F_{p1} e F_{p2} surgem dos procedimentos de integração dos sistemas de equações diferenciais e são específicas aos termos primários de radiação direta e difusa. As

formas adotadas no presente estudo são apropriadas para vegetação densa com distribuição espacial aleatória dos elementos vegetais e distribuição aleatória das normais aos elementos vegetais, e foram desenvolvidas no estudo de Marques Filho (1992).

Esses elementos de modelagem física da radiação solar em meio vegetal constituem a base de apoio para a inversão matemática expressa na equação 2, com a associação final entre os fluxos relativos no interior da cobertura e as estimativas correspondentes de área foliar acumulada; o procedimento de

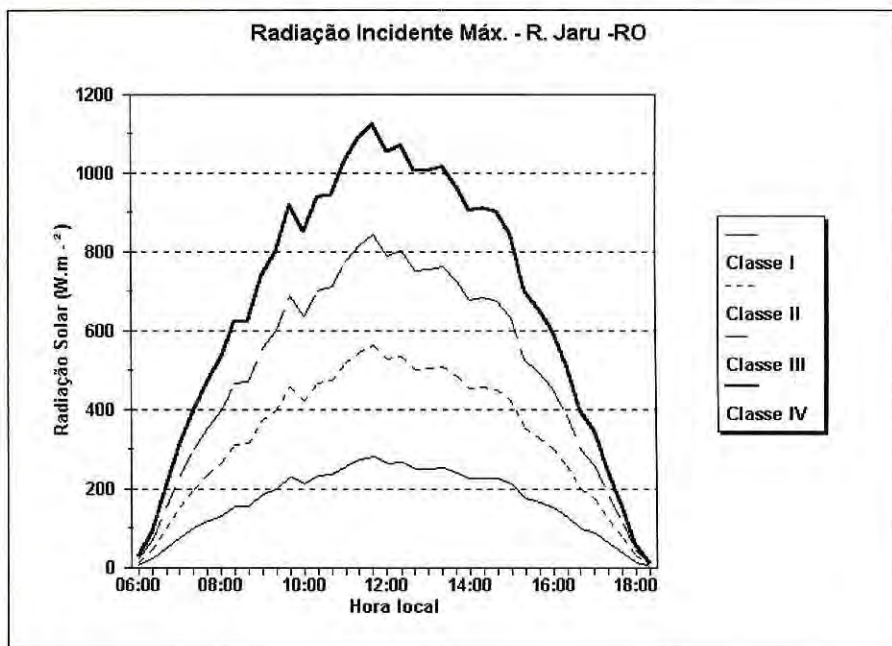


Figura 2. Classes de radiação externa: classe I – 0 a 25%; classe II - 25 a 50%; Classe III – 50 a 75%; classe IV – 75 a 100%.

inversão materializa-se na forma de um programa computacional desenvolvido em linguagem de programação estruturada Fortran 77, e do ponto de vista matemático é simplesmente um procedimento numérico iterativo de inversão.

D) Processamento dos dados

As medidas de radiação solar de todo o período de observação são agrupadas em quatro classes de radiação externa (I,II,III,IV), partindo de eventos em que predomina radiação difusa (céu encoberto, classes I e II) e alcançando aquelas ocasiões em que a radiação direta é dominante (céu limpo, classes III e IV), conforme representado na Figura 2.

Esses agrupamentos de dados viabilizaram a representação

condensada do conjunto total de informações acumuladas nas três verticais de observação. O tratamento desses dados gerou as estimativas de densidade de área foliar para os diferentes pontos no interior da floresta, que organizadas em classes favorecem as interpretações posteriores.

Uma compactação ainda maior do conjunto de dados foi obtida seguindo-se o critério de separação por horários de observação, seguida do cálculo das médias representativas dos diferentes horários dentro de cada classe.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No interior de uma cobertura vegetal os sensores de radiação solar atuam como pólos de observação e as suas medidas revelam a variabilidade

da vegetação em diferentes direções pelo alinhamento eventual da posição do sol com espaços vazios de folhas ou com grandes aglomerados de folhas. Essas zonas vazias ou com alta densidade de vegetação têm direções específicas para cada posição de observação no interior da cobertura e a apresentação das medidas deve contemplar esse caráter direcional intrínseco às interações entre radiação solar e coberturas vegetais.

Nesse contexto, as Figuras 3 a 6 representam em coordenadas polares para as classes I a IV, respectivamente, os cursos diurnos dos fluxos relativos α_i (parte superior das figuras) e os correspondentes valores de área foliar acumulada (parte inferior), calculados pela inversão do modelo de radiação solar em meio vegetal. Os valores apresentados são médios para cada horário e posição de medida no interior da cobertura, para o primeiro dos três perfis. A convenção de traços das curvas é mantida para as quatro classes, e a associação entre as curvas e os níveis de medidas fica estabelecida na Figura 3 pela regularidade e facilidade de visualização das curvas da Classe I: na parte superior da figura, os níveis de medidas crescem a partir da curva mais interna; em consequência, na parte inferior, a correspondência ocorre no sentido inverso.

As figuras 3 e 4 revelam a natureza similar das medidas de radiação pertencentes às classes I e II, tanto nos aspectos qualitativos como nas grandezas dos valores nos diferentes horários e posições no interior da vegetação, em contraste ao comportamento irregular e

dissociado entre curvas obtidas nas classes III e IV (5 e 6). Nesse último caso, a direcionalidade crescente da radiação tende a realçar os aspectos localizados da variabilidade de densidade de área foliar da vegetação. No presente estudo, predominam os efeitos de proteção sobre os sensores de radiação (redução importante em todos os níveis de medidas) de zonas mais densas da cobertura em grande parte do dia, especialmente pela manhã, em detrimento dos picos de radiação que ocorrem em poucos horários (por volta de 7 e 12 horas na figura 6). Os fluxos relativos são sempre superiores nas classes I e II, como resultado da preponderância da multidi-recionalidade da radiação difusa nesse tipo de vegetação.

Os valores médios de área foliar acumulada e desvios padrões correspondentes em diferentes níveis das três verticais de observação são apresentados nas tabelas 2, 3 e 4. O cálculo de médias equivale à integração dos efeitos individuais observados no curso diurno em cada classe, uma forma de incorporar nas médias dos índices de área foliar distintas zonas da vegetação. A observação dos valores médios de cada classe para uma dada altura no interior da vegetação mostra: (i) a similaridade entre os valores médios das classes I e II em um mesmo nível de observação no interior da cobertura; (ii) a integração de efeitos no cálculo de médias ao longo do curso diurno nas classes III e IV não foi em geral suficiente para aproximar as médias obtidas para um determinado nível da vertical, em contraste com resultados anteriores para floresta da Amazônia (Marques Filho & Dallarosa (2000); entre os fatores que ocasionam esse tipo de divergência pode ser destacado

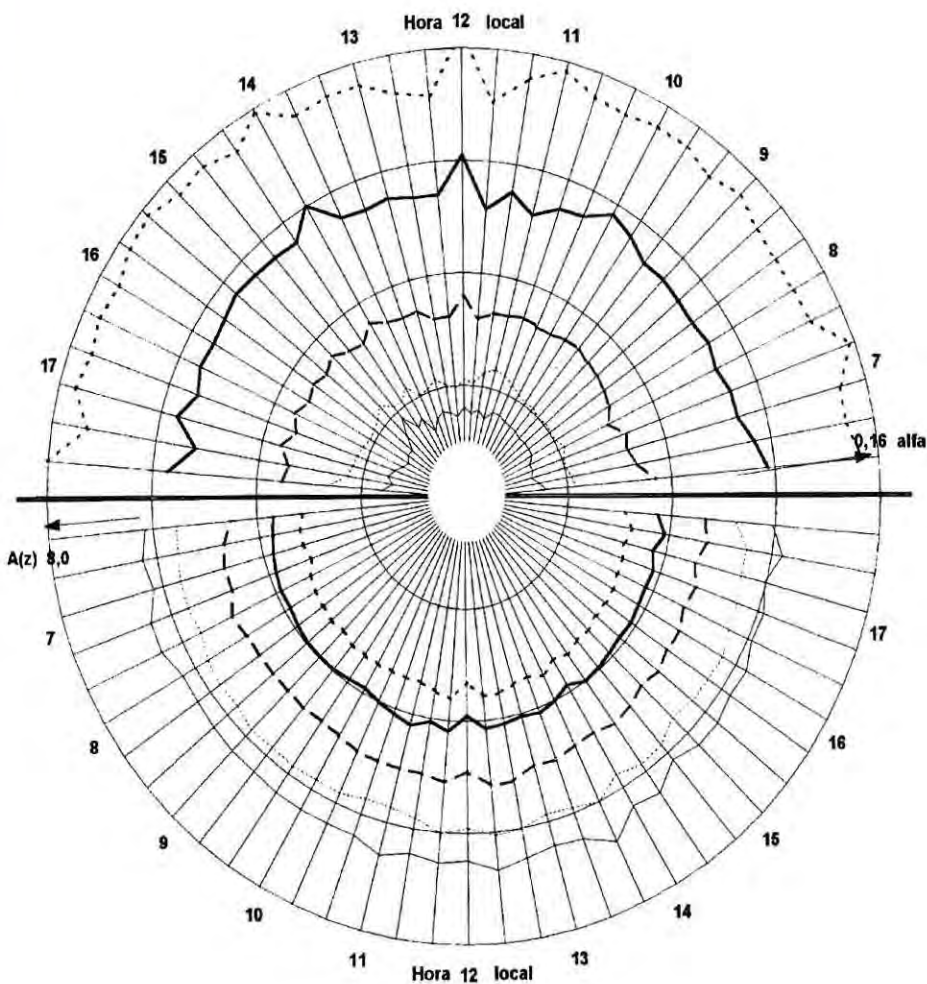


Figura 3. Curso diurno de Fluxos Relativos de radiação solar (parte superior) e valores correspondentes de Área Foliar Acumulada (parte inferior) em coordenadas polares. Primeira vertical, Classe I. Na parte superior da figura, os níveis de medidas crescem a partir da curva mais interna; em consequência, na parte inferior, a correspondência ocorre no sentido inverso. As curvas estão associadas aos níveis 0,0m; 3,6m; 7,6m; 11,6m e 15,6m. A escala radial é linear e o seu valor máximo está indicado e associado ao círculo externo de cada parte da figura.

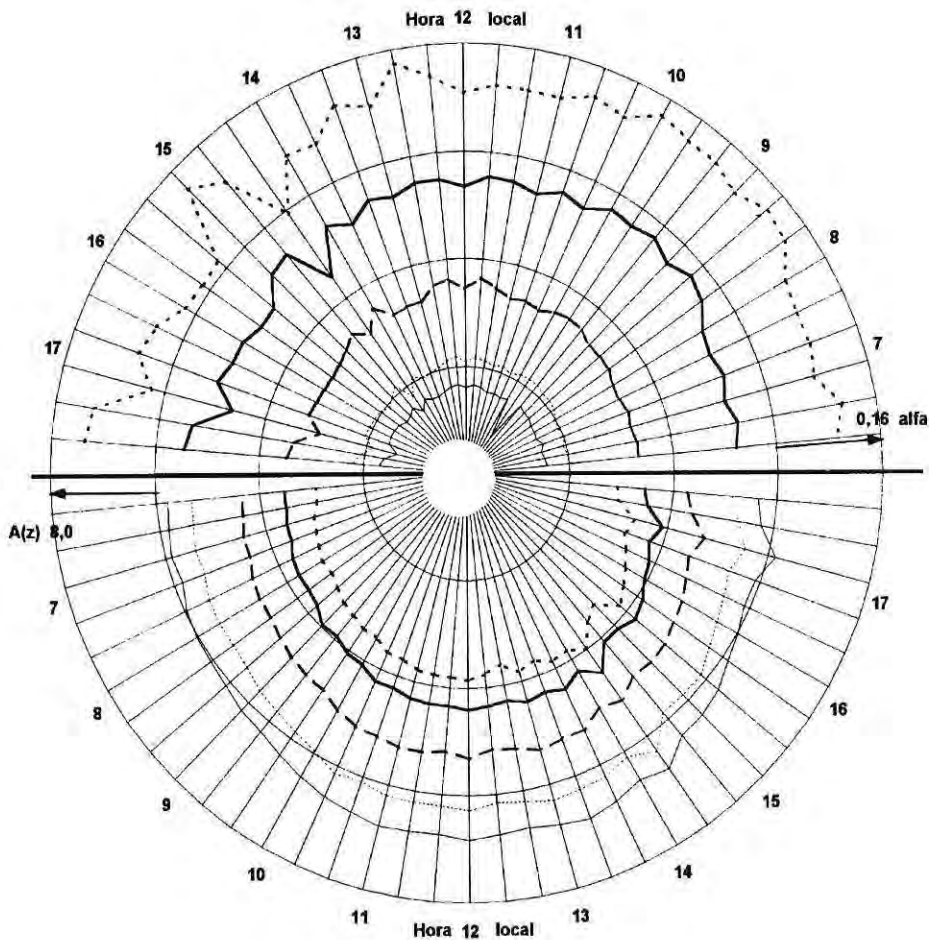


Figura 4. Curso diurno de **Fluxos Relativos** de radiação solar (parte superior) e valores correspondentes de **Área Foliar Acumulada** (parte inferior) em coordenadas polares. Primeira vertical, Classe II. Na parte superior da figura, os níveis de medidas crescem a partir da curva mais interna; em consequência, na parte inferior, a correspondência ocorre no sentido inverso. As curvas estão associadas aos níveis 0,0m; 3,6m; 7,6m; 11,6m e 15,6m. A escala radial é linear e o seu valor máximo está indicado e associado ao círculo externo de cada parte da figura.

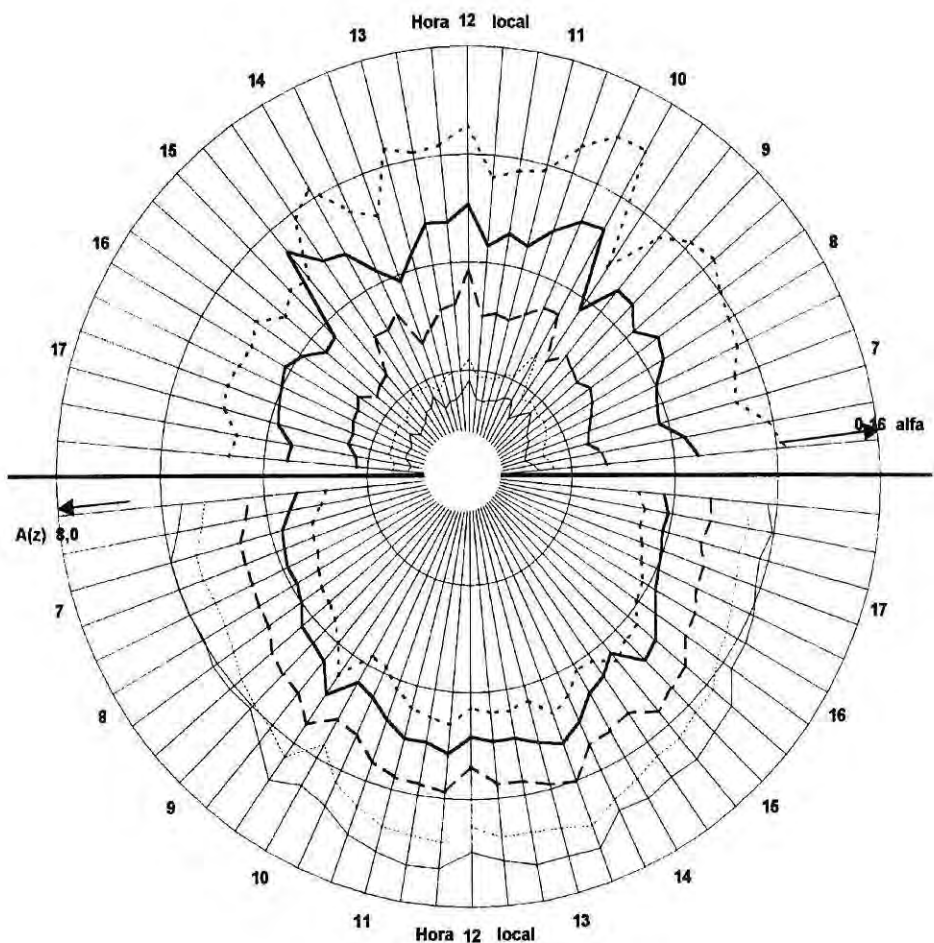


Figura 5. Curso diurno de **Fluxos Relativos** de radiação solar (parte superior) e valores correspondentes de **Área Foliar Acumulada** (parte inferior) em coordenadas polares. Primeira vertical, Classe III. Na parte superior da figura, os níveis de medidas crescem a partir da curva mais interna; em consequência, na parte inferior, a correspondência ocorre no sentido inverso. As curvas estão associadas aos níveis 0,0m; 3,6m; 7,6m; 11,6m e 15,6m. A escala radial é linear e o seu valor máximo está indicado e associado ao círculo externo de cada parte da figura.

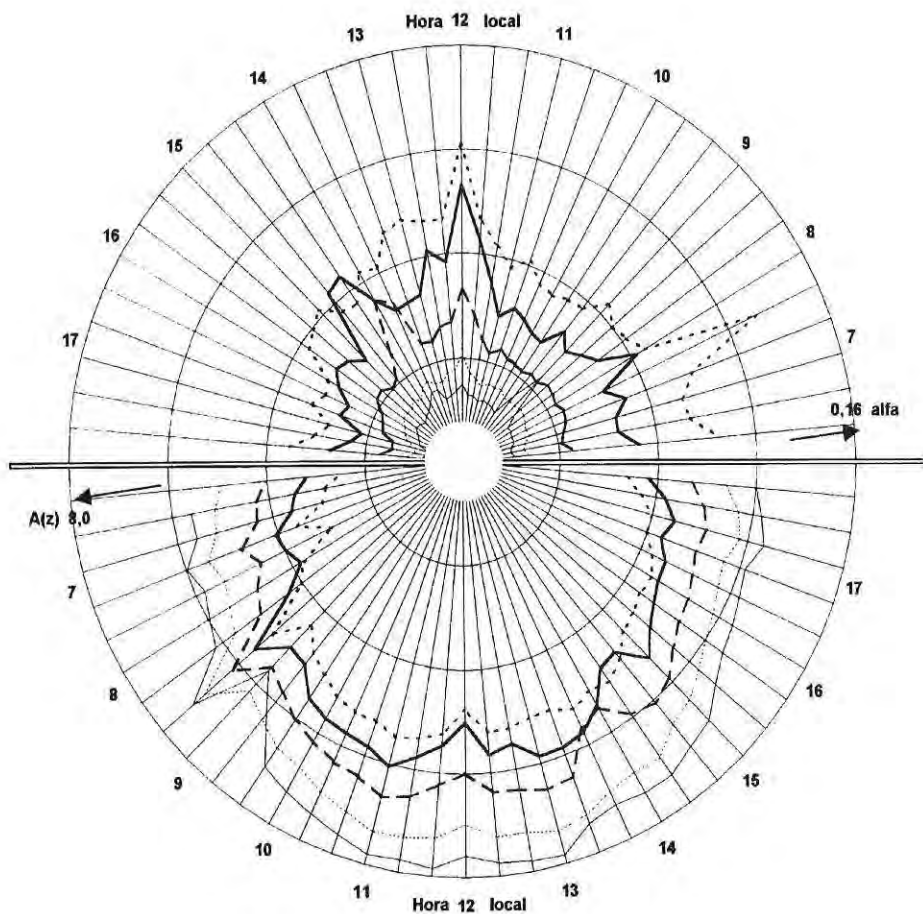


Figura 6. Curso diurno de **Fluxos Relativos** de radiação solar (parte superior) e valores correspondentes de **Área Foliar Acumulada** (parte inferior) em coordenadas polares. Primeira vertical, Classe IV. Na parte superior da figura, os níveis de medidas crescem a partir da curva mais interna; em consequência, na parte inferior, a correspondência ocorre no sentido inverso. As curvas estão associadas aos níveis 0,0m; 3,6m; 7,6m; 11,6m e 15,6m. A escala radial é linear e o seu valor máximo está indicado e associado ao círculo externo de cada parte da figura.

e é relevante o seguinte: nos casos em que predomina radiação direta apenas uma estreita faixa da vegetação interage com os raios solares ao longo do dia, enquanto que para o caso da radiação difusa a integração dos efeitos da interação radiação-vegetação cobre todo o hemisfério, envolvendo a cobertura vegetal em todos os azimutes e determinando medidas mais representativas e estáveis no curso diurno.

A comparação dos perfis de área foliar acumulada, obtidos para as três verticais (IAF médio, terceira coluna das tabelas 2,3,4), fornece uma indicação da variabilidade horizontal

de distribuição de área foliar da cobertura. A distribuição vertical de área foliar na primeira vertical é distinta das outras duas verticais e revela as diferenças possíveis na determinação do IAF de uma dada vegetação, como consequência natural da evolução, posicionamento relativo, e crescimento diferenciado em diferentes espécies vegetais.

Os perfis médios da função $A(z)$ apresentados na última coluna das tabelas anteriores permitem a derivação numérica da função de densidade de área foliar $a(z)$ para vários pontos na vertical a partir da expressão,

$$a(z_m) = - dA(z_m)/dz = [A(z_1) - A(z_2)]/(z_2 z_1) \quad (7)$$

sendo z_m o ponto intermediário das alturas z_1 e z_2 .

Tabela 2. IAF calculado para cada classe de radiação, valores entre parênteses representam o desvio padrão.

PRIMEIRA VERTICAL DE MEDIDAS

	IAF médio por classe de radiação				IAF Médio
	I	II	III	IV	
- Nível de medida (m) no interior da cobertura					
	(0-25%)	(25-50%)	(50-75%)	(75-100%)	
- 0,0	6,23 (0,35)	6,20 (0,42)	6,58 (0,62)	6,95 (0,82)	6,49
- 3,6	5,62 (0,31)	5,70 (0,39)	6,11 (0,53)	6,53 (0,77)	5,99
- 7,6	4,77 (0,26)	4,79 (0,38)	5,26 (0,55)	5,73 (0,75)	5,14
- 11,6	3,87 (0,22)	3,94 (0,36)	4,46 (0,63)	5,54 (0,81)	4,48
- 15,6	3,27 (0,25)	3,39 (0,37)	3,96 (0,52)	4,63 (0,85)	3,81
- 19,6	3,12 (0,18)	3,26 (0,35)	3,76 (0,62)	4,39 (0,88)	3,63
- 23,6	2,94 (0,24)	3,11 (0,36)	3,66 (0,67)	4,22 (0,83)	3,48

Tabela 3. IAF calculado para cada classe de radiação, valores entre parênteses representam o desvio padrão.

SEGUNDA VERTICAL DE MEDIDAS

- Nível de medida (m) no interior da cobertura	IAF médio por classe de radiação				IAF
	I	II	III	IV	Médio
	(0-25%)	(25-50%)	(50-75%)	(75-100%)	
- 0,0	4,76 (0,33)	4,82 (0,33)	5,00 (0,55)	4,94 (0,93)	4,88
- 2,4	5,38 (0,25)	5,44 (0,33)	5,70 (0,48)	5,73 (0,68)	5,56
- 6,4	5,04 (0,41)	5,18 (0,31)	5,34 (0,49)	5,37 (0,75)	5,23
- 10,4	4,45 (0,48)	4,41 (0,39)	4,43 (0,69)	4,61 (1,05)	4,48
- 14,4	3,38 (0,20)	3,38 (0,43)	3,57 (0,75)	3,62 (1,25)	3,49
- 18,4	3,64 (0,24)	3,63 (0,38)	3,86 (0,65)	3,64 (1,29)	3,69

Tabela 4. IAF calculado para cada classe de radiação, valores entre parênteses representam o desvio padrão.

TERCEIRA VERTICAL DE MEDIDAS

- Nível de medida (m) no interior da cobertura	IAF médio por classe de radiação				IAF
	I	II	III	IV	Médio
	(0-25%)	(25-50%)	(50-75%)	(75-100%)	
- 0,0	5,50 (0,65)	5,05 (0,64)	5,20 (0,74)	5,47 (0,76)	5,30
- 3,6	4,50 (0,80)	5,20 (0,91)	5,42 (0,79)	5,89 (0,82)	5,25
- 7,6	4,50 (0,50)	4,70 (0,52)	4,94 (0,70)	5,39 (0,87)	4,88
- 11,6	5,07 (0,47)	4,78 (0,56)	4,86 (0,67)	5,07 (1,07)	4,95
- 15,6	3,66 (0,88)	3,83 (0,71)	3,77 (0,90)	4,16 (1,17)	3,85
- 19,6	2,80 (0,44)	2,83 (0,42)	3,00 (0,80)	3,42 (1,11)	3,01

A função $A(z)$ deve ser representativa para a vegetação de um dado local e no estudo atual foi estabelecida como o perfil médio das três verticais com um índice de área foliar (IAF) total dado pela média dos valores da função $A(z)$ estimada junto ao solo em cada uma das três verticais (valor numérico de 5,6). Com esse procedimento, a distribuição vertical de área foliar foi determinada e aparece representada na Figura 7. O detalhamento da distribuição vertical de $a(z)$ no estudo atual é preciso em razão do maior número de pontos de observação especialmente na parte baixa da vegetação e da maior representatividade horizontal das medidas (três verticais). Na curva atual, como já encontrado para outras coberturas na Amazônia (Marques Filho & Dallarosa (2000)), existem em essência duas zonas distintas de concentração de área foliar: uma prin-

cipal situada na parte alta da vegetação com concentração máxima de área foliar próxima de $0,27 \text{ m}^2/\text{m}^3$, localizada logo acima dos 28 m de altura; e uma secundária na parte baixa da vegetação, que apresenta densidade de área foliar variável com picos secundários variando na faixa de 0,15 a $0,22 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Esses dois estratos são intercalados por uma zona de transição com baixa densidade de área foliar, cujo valor mínimo atinge $0,1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (localizada na altura de 17 m – 18 m).

Essa distribuição de área foliar é consistente em seus aspectos essenciais com a distribuição vertical e extensão das copas das principais árvores (Figura 8) da área amostral do local descrita anteriormente neste estudo. A concentração máxima das copas do estrato inferior da vegetação situa-se na faixa de 12 a 15 metros com a concorrência de um número de

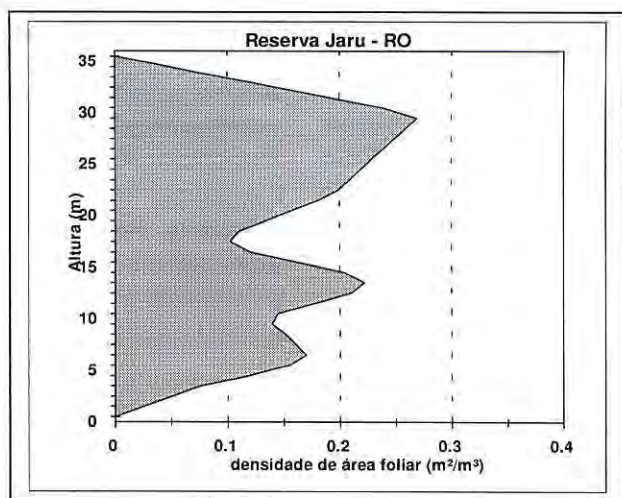


Figura 7. Densidade de área foliar, $a(z)$

árvores superior a 20; no estrato superior a zona mais densa ocorre na faixa de 27 a 31 metros com um total de 10 árvores. Uma zona de transição entre esses dois estratos ocorre na faixa entre os 17 a 20 metros de altura. A inversão dos picos dessas duas figuras não é relevante e pode ser eliminada pela inclusão do volume das copas das grandes árvores como fator modulador na figura 8.

A transposição qualitativa das características da curva de distribuição vertical das copas das árvores para a distribuição de área foliar depende de fatores associados à extensão horizontal das copas e das densidades foliares específicas das diferentes espécies que compõem a vegetação. Em princípio, um procedimento direto possível para o estabelecimento da função $a(z)$ consiste na definição de camadas horizontais de espessura Δh (um metro por exemplo) em torno da altura z , com uma extensão horizontal suficiente para incorporar um grande número de árvores (descrição anterior), e dentro de cada uma dessas camadas medir e somar as áreas de todas as folhas das diferentes árvores parcialmente presentes na camada; a formulação correspondente a essa operação pode ser expressa pelas equações equivalentes;

- área foliar(m²/m³)
- V_{copa} - volume da copa da árvore i na camada
- A_{copa} - área da copa da árvore i na camada
- Δh - espessura da camada
- n - número de árvores (copas) presentes na camada

Para densidades foliares iguais entre as copas das diferentes árvores de uma mesma camada, tem-se uma equação simplificada do tipo,

$$a(z) = a_{fm} \left[\frac{\sum_1^n A_{\text{copa}}(i)}{A_{\text{camada}}} \right]$$

$$= a_{fm} \cdot (\text{fator de ocupação})$$

Essa forma de interpretação da função $a(z)$ deixa transparecer as dificuldades experimentais implícitas em métodos diretos para o estabelecimento da distribuição de área foliar em coberturas vegetais de grande porte. Outras funções características da vegetação, como por exemplo a função que expressa a distribuição de normais dos elementos vegetais, necessitam de medidas direcionais e os aparatos experimentais crescem em

$$a(z) = \frac{\text{Área foliar da camada}}{\text{Volume da camada}} = \frac{\sum_1^n a_{fm}(i) \cdot V_{\text{copa}}(i)}{V_{\text{camada}}} = \frac{\sum_1^n a_{fm}(i) \cdot A_{\text{copa}}(i) \cdot \Delta h}{A_{\text{camada}} \cdot \Delta h} \quad (8)$$

onde,

a_{fm} - densidade média de

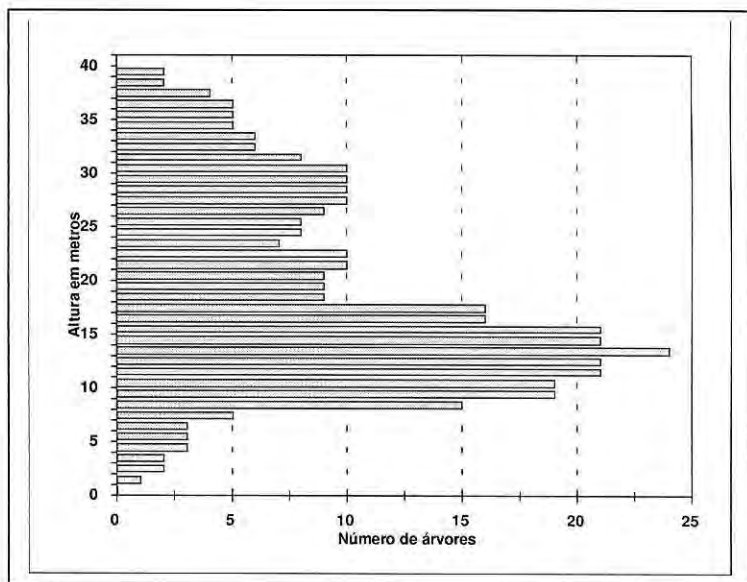


Figura 8 . Distribuição vertical das copas das árvores, composta a partir das medidas de extensão (localização) vertical das árvores com diâmetros superiores à 10 cm (DAP)

complexidade.

A compatibilização entre os requisitos teóricos que precisam ser observados e os meios práticos de execução de medidas diretas de área foliar em floresta é uma tarefa complicada, e este fato sugere que a questão da viabilidade de tal operação precisa antes ser respondida. Nessas condições, os métodos indiretos explorados no presente estudo e baseados sobre o regime de radiação em coberturas vegetais crescem de importância especialmente quando reforçados por estudos independentes sobre a estrutura e composição de espécies da vegetação.

CONCLUSÃO

A variabilidade espaço-temporal da radiação solar no interior da

vegetação e a sua relação direta com a distribuição espacial dos elementos vegetais foi analisada para a floresta da Reserva Jaru – Ji-Paraná. O tratamento indireto de obtenção da distribuição vertical de área foliar da floresta da Reserva Jaru, desenvolvido neste estudo, produziu uma forma para a função $a(z)$ que é consistente com indicações independentes dos aspectos estruturais da vegetação: altura das árvores, posicionamento e extensão das copas, ocorrência de pequenas árvores e arbustos, conforme elementos detalhados na Tabela 1 e Figura 8. A existência de dois estratos principais na vegetação, com uma subdivisão no estrato inferior, pode ser enquadrada e explicada por essas indicações. Em particular, o pico de densidade de área foliar na faixa entre 5 e 10 metros deve ser associado

ao grande número de arvoretas e plântulas que se desenvolvem nessa zona. De outra parte, o procedimento de separação em classes de radiação externa, cobrindo desde modelos de radiação puramente difuso até modelos com predominância de radiação direta, revela a maior abrangência, a grande estabilidade e representatividade das estimativas da função $A(z)$, quando associadas com as classes I e II. Nas outras duas classes, aspectos particulares da vegetação são relevantes e determinam a dissociação das médias de $A(z)$ observadas entre as classes. Essas distorções encontradas para as funções de área foliar sugerem novos desenvolvimentos no campo de técnicas experimentais ou simplesmente um maior número de verticais em determinados tipos de cobertura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos pesquisadores do INPE Dr. Antônio Manzi e MSc Rildo de Moura e Engenheiro Jorge Mello pelo intercâmbio de dados de radiação solar da Reserva Jaru, discussões sobre técnicas experimentais e apoio na execução das medidas em Ji-Paraná, aos técnicos da Coordenação de Pesquisas em Geociências do INPA: Afonso Ligório da Mota, Hermes Braga Xavier, Jauapery Neves Pereira Júnior, Sérgio Magno Valério de Souza e Valdelice Pereira da Silva pela ajuda na preparação e instalação dos sistemas de medidas; a Gotz Schroth (EMBRAPA) pelo empréstimo dos

solarímetros tubulares. Este estudo se insere no Projeto de Pesquisa "Balanço de energia, vapor d'água e CO_2 em área de floresta tropical na Amazônia Central", financiado sob a referência PPD 95/0966.

Bibliografia citada

- Andrieu, B.; Baret, F. 1993. Indirect methods of estimating crop structure from optical measurements. *In: Varlet-Grancher, C.; Bonhomme, R.; Sinoquet, H. (Eds.) 1993 Crop Structure and Light Microclimate.* INRA, France. p. 285-322.
- Culf, A.D.; Esteves, J.L.; Marques Filho, A.O.; Rocha, H.R. 1996. Radiation, temperature and humidity over forest and pasture in Amazonia, *In: Gash, J.H.C.; Nobre, C.A.; Roberts, J.M.; Victoria, R. L. (Eds.) 1996. Amazonian Deforestation and Climate.* Institute of Hydrology, UK. P, 175-192.
- Dallarosa, R. G. 1996. Evapotranspiração em Floresta da Amazônia Equatorial - Tese Mestrado - UFRGS - IPH; 102 p.
- Honzák, M.; Lucas, R.M.; Amaral, I.; Curran, P.J.; Foody, G.M.; Amaral, S., 1996. Estimation of the leaf area index and total biomass of tropical regenerating forests: comparison of methodologies, *In: Gash, J.H.C.; Nobre, C.A.; Roberts, J.M.; Victoria, R.L. (Eds.) 1996. Amazonian Deforestation and Climate.* Institute of Hydrology, UK. p, 365-381.
- McWilliam, A.L.C.; Roberts, J.M.; Cabral, O.M.R.; Leitão, M.V.B.R.; Costa, A.C.L.; Maitelli, G.T.; Zamparoni, C.A.G.P. 1993. Leaf area index and above ground biomass of terra firme rain forest and adjacent clearings in Amazonia. *Functional Ecology*, 7: 210-217.
- Marques Filho, A.O. 1992. Modèles des transferts radiatifs à l'intérieur des couverts végétaux - les solutions analytiques. *Acta Amazonica*, 22(4):541-565.
- Marques Filho, A.O. 1997. Regime de radiação solar e características da vegetação -

- Modelos de inversão. *Acta Amazonica*, 27(2):119-134.
- Marques Filho, A.O.; Dallarosa, R.G. 2000. Interceptação de radiação solar e distribuição espacial de área foliar em floresta de terra firme da Amazônia Central. *Acta Amazônica*, 30(3):453-470.
- Myneni, R.R.; Ross, J.; Asrar, G. 1989. A review on the theory of photon transport in plant canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 45: 1-153.
- Nilson, T. 1971. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands, *Agricultural and Forest Meteorology*, 8: 25-38.
- Ross, J. 1981. *The Radiation Regime and the Architecture of Plant Stands*. Dr. W. Junk Publ., The Netherlands.
- Wandelli, E.V.; Marques Filho, A.O. 1999. Medidas de radiação solar e índice de área foliar de coberturas vegetais. *Acta Amazonica*, 29(1): 57-78.
- Welles, J.M.; Norman, J.M. 1991. Instrument for indirect measurement for canopy architecture. *Agronomy Journal*, 53:818-825.

Aceito para publicação em 06/12/2000