

Paper CIT02-0717

ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR EM FLORESTAS TROPICAIS PRÓXIMO DE ÁREAS DESMATADAS

Edileuza C. de Melo

Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro - Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica, Asa Norte - 70910-900 - Brasília. DF.
edileuza@unb.br

Antonio C. P. Brasil Junior

Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro - Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica, Asa Norte - 70910-900 - Brasília. DF.
brasiljr@unb.br

Resumo. *O presente trabalho apresenta um modelo de atenuação 2D da radiação solar em camadas vegetativas, com o objetivo de quantificar a transferência de calor radiativa no interior de florestas tropicais primárias. Considera-se no modelo, uma distribuição heterogênea de cobertura vegetal no sentido de estabelecer uma distribuição de radiação solar em regiões florestais próximas a áreas desmatadas (clareiras). O modelo proposto adota a metodologia de traçado de raios para estimativas de parcelas de radiação direta e difusa atenuadas. Os resultados do modelo estão próximos dos dados obtidos experimentalmente na Reserva Florestal Duce na região de Manaus-Am.*

Palavras chave: Radiação solar em floresta, Transferência de calor em florestas tropicais.

1. Introdução

Em florestas tropicais a maior parte da radiação solar que intercepta o dossel, é absorvida naturalmente pelos processos de fotossíntese e evapotranspiração, outra parcela é refletida para a atmosfera e apenas uma pequena fração atinge o solo. Abaixo do dossel o fluxo de radiação é extremamente baixo; a fração da radiação solar que alcança a base da floresta é cerca de 1% (Shuttleworth et al., 1984). A distribuição da radiação disponível em cada nível do dossel depende dos seguintes fatores: da radiação solar incidente no topo da floresta e sua orientação, da distribuição da área foliar e das características óticas dos elementos de vegetação. Para florestas primárias, considera-se que a radiação solar é atenuada da mesma maneira que para um meio ótico semitransparente contínuo. O equacionamento para este caso é descrito por uma equação de atenuação expressa por um decaimento exponencial (Lei de Beer), onde o coeficiente de extinção depende do tipo de vegetação florestal e sua orientação (Zênite), do tipo de radiação incidente (direta ou difusa) e da banda do espectro: PAR – *Photosynthetic Active Radiation* (0,4 – 0,7 μm) ou infravermelho próximo NIR – *Near Infrared* (> 0,7 μm).

Nos casos em que o dossel apresenta clareiras, uma quantidade maior de radiação incidente alcança o solo, permitindo a secagem da serrapilheira depositada no chão, transformando-a em material combustível. A abertura gradual do dossel induz a redução da umidade no sub-bosque de uma floresta tropical provocada pela penetração da radiação solar, (Nepstad et al., 1999). Nas proximidades dessas clareiras, a radiação solar incide não somente do topo da floresta como também da superfície lateral de interface floresta-clareira. Modelos que considerem a atenuação de radiação incidente de ambos os planos devem ser utilizados.

Neste trabalho considera-se que a distribuição de elementos de vegetação é heterogênea, cuja radiação solar incidente será atenuada a partir do plano superior do dossel e da superfície de interface floresta-clareira. Assim, o objetivo principal do presente trabalho é de estabelecer um modelo bidimensional de atenuação da radiação solar no interior de florestas tropicais, considerando a proximidade de áreas desmatadas.

O assunto aqui tratado relaciona-se diretamente com o domínio de conhecimento da transferência de calor envolvendo a troca radiativa em coberturas vegetais (Sellers, 1992). A abordagem do assunto não é uma novidade na literatura concernente ao balanço térmico em ecossistemas florestais (Bonnar, 1996; Sellers et al. 1996; Machado, 2000). Este tema de pesquisa tem sido extensivamente explorado, com interesses multidisciplinares no desenvolvimento de modelos de previsão de clima e de crescimento de florestas. O aspecto inovador do modelo baseia-se na consideração de proximidade de clareiras, permitindo assim uma análise local de problemas, com possibilidades de aplicações em balanços térmicos nestas áreas e avaliação dos impactos ambientais associados a zonas tampões de interface floresta-áreas desmatadas.

As equações propostas por Campbell e Norman (1998), para um modelo de interceptação da luz pela cobertura vegetal, foram adaptadas para o modelo proposto. As mesmas foram utilizadas com sucesso em florestas de coníferas (Chun-Ta Lai et al., 1999), para modelos locais de troca de CO_2 e vapor d'água.

Em estudos de troca de energia (Nobre, C.A. et al., 1999) é fundamental estabelecer o regime de radiação no interior da floresta. O perfil do comportamento da radiação interage com a atmosfera e configura os padrões de temperatura, umidade específica, ventos e concentração de CO_2 .

A distribuição da radiação dentro do ambiente de uma floresta tropical é muito heterogênea. A densidade de plantas, geralmente muito alta, combinada com árvores caídas e aberturas de clareiras, produz uma distribuição da luz altamente variável (Canahm et al., 1990; Chazdon, 1988; Fernández e Myster, 1995; Washitani and Tang, 1991), não só abaixo da cobertura, mas ao longo do volume da cobertura florestal. Para descrever adequadamente a heterogeneidade da luz dentro de um ambiente de floresta, de Castro e Fetcher, (1998), desenvolveram um modelo tridimensional. A maioria dos modelos de interceptação da luz disponíveis na literatura com uma dimensão (e.g., Wang e Baldocchi, 1989) ou duas dimensões normalmente é aplicada em plantações onde uma homogeneidade horizontal pode ser assumida (Yang et al., 1990; Federer, 1971; Jarvis Leverenz, 1983; Oker-Blom et al., 1991). O modelo aqui desenvolvido descreve a atenuação da radiação solar no interior de florestas tropicais, a partir do plano superior do dossel e da superfície de interface floresta-clareira. Considera como parâmetro de entrada nos cálculos da distribuição da radiação: a variação da área foliar, radiação direta e difusa nas bandas PAR e NIR, variáveis de fisionomia florestal e dados micrometeorológicos.

Para validar os resultados deste modelo, utilizou-se as medidas de radiação solar obtidas por Marques Filho (1994), no sítio experimental da Reserva Florestal Ducke, Manaus-AM no período de janeiro a abril de 1994. Estas medidas foram realizadas para florestas primárias, que são o ponto de partida para a validação do presente modelo. Em segunda análise simulações bidimensionais são efetuadas.

2. Descrição do Modelo

2.1 Caracterização do dossel e distribuição dos elementos de vegetação

O dossel de uma floresta tropical primária é caracterizado pela quantidade, distribuição espacial, orientação e características óticas dos elementos de vegetação (folhas e galhos), que representam parâmetros fundamentais para definição do regime de radiação no seu interior. Os elementos de vegetação do dossel apresentam uma distribuição bastante heterogênea e são caracterizados por níveis distintos de concentração ao longo de todo perfil vertical da floresta. O índice de área foliar – *LAI* (*leaf area index*) é um importante parâmetro da vegetação que permite estabelecer a arquitetura do dossel e é definida como sendo a área foliar total projetada por unidade de área do terreno (m^2/m^2), ou seja, é uma grandeza adimensional. O *LAI* acumulado resulta da integração da densidade de área foliar - $a(z)$ variando a partir do solo até à altura (H) total do dossel, sendo representada pela seguinte equação:

$$L(z) = \int_z^H a(z) dz \quad , \quad LAI = L(0) \quad (1)$$

$a(z)$ é a densidade de área da folhagem por unidade de volume (m^2/m^3) variando em relação à altura (z) da camada.

Para uma floresta tropical, o perfil da densidade de área foliar típica, partindo do topo do dossel para a base é representado na Fig. (1), a partir de dados experimentais medidos na Reserva Florestal Ducke, Manaus - AM. (Marques Filho, 1994).

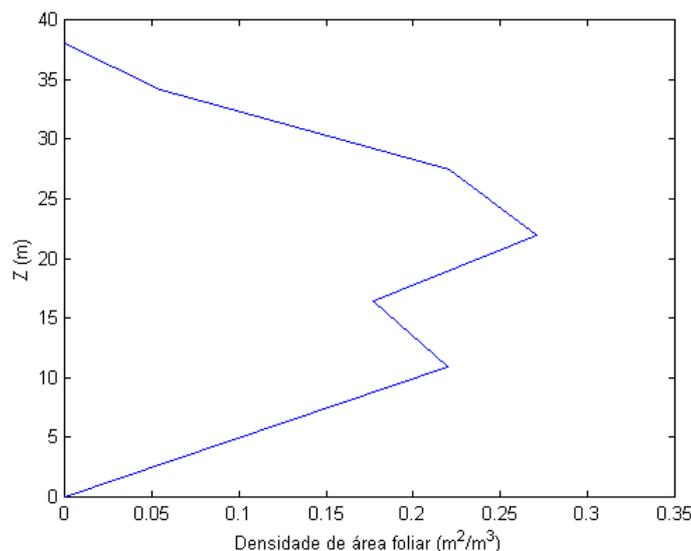


Figura 1. Perfil da distribuição vertical de área foliar para a Reserva Florestal Ducke (Manaus - AM).

No perfil apresentado, nota-se duas zonas distintas de concentração de área foliar. A principal situa-se na parte alta da vegetação com concentração máxima de densidade de área foliar próxima de $0,27 m^2/m^3$, localizada na altura de 22m e outra secundária na parte baixa da vegetação, apresentando densidade de área foliar próxima de $0,22 m^2/m^3$. Nota-se

que esses dois estratos são intercalados por uma zona de transição com baixa densidade de área foliar, cujo valor aproxima-se de $0,17 \text{ m}^2/\text{m}^3$, localizada na altura de 16m. Com base nesses dados o índice de área foliar da vegetação da Reserva Ducke situa-se entre os limites de 5,7 a 6,1 com um valor médio de 5,9. Este valor é consistente com o determinado em outros estudos para a área de floresta tropical (McWilliam et al., 1993), utilizando a metodologia destrutiva de medida direta de toda área foliar existente em uma área amostral escolhida. Nobre, C.A. et al., (1999).

Para o cálculo discreto no modelo proposto para atenuação da radiação, utiliza-se uma malha 2D com domínios em $x \in [0, L_{max}]$ e $z \in [0, H]$, constituindo um conjunto de células $\{(i, j)\}$, sendo $i=1, n$ e $j=1, m$. As coordenadas dos pontos centrais são dadas por: $(x(i), z(j))$. Nota-se que cada célula (i, j) tem distribuição foliar dada por $a_{ij} = a(z(j))$, como aparece representado na Fig.(2). Para cada célula serão calculados os níveis de radiação solar disponíveis, caracterizando um mapeamento bidimensional. A análise será efetuada para os casos mais desfavoráveis, ou seja, nas situações onde as faces estão voltadas para oeste ou leste.

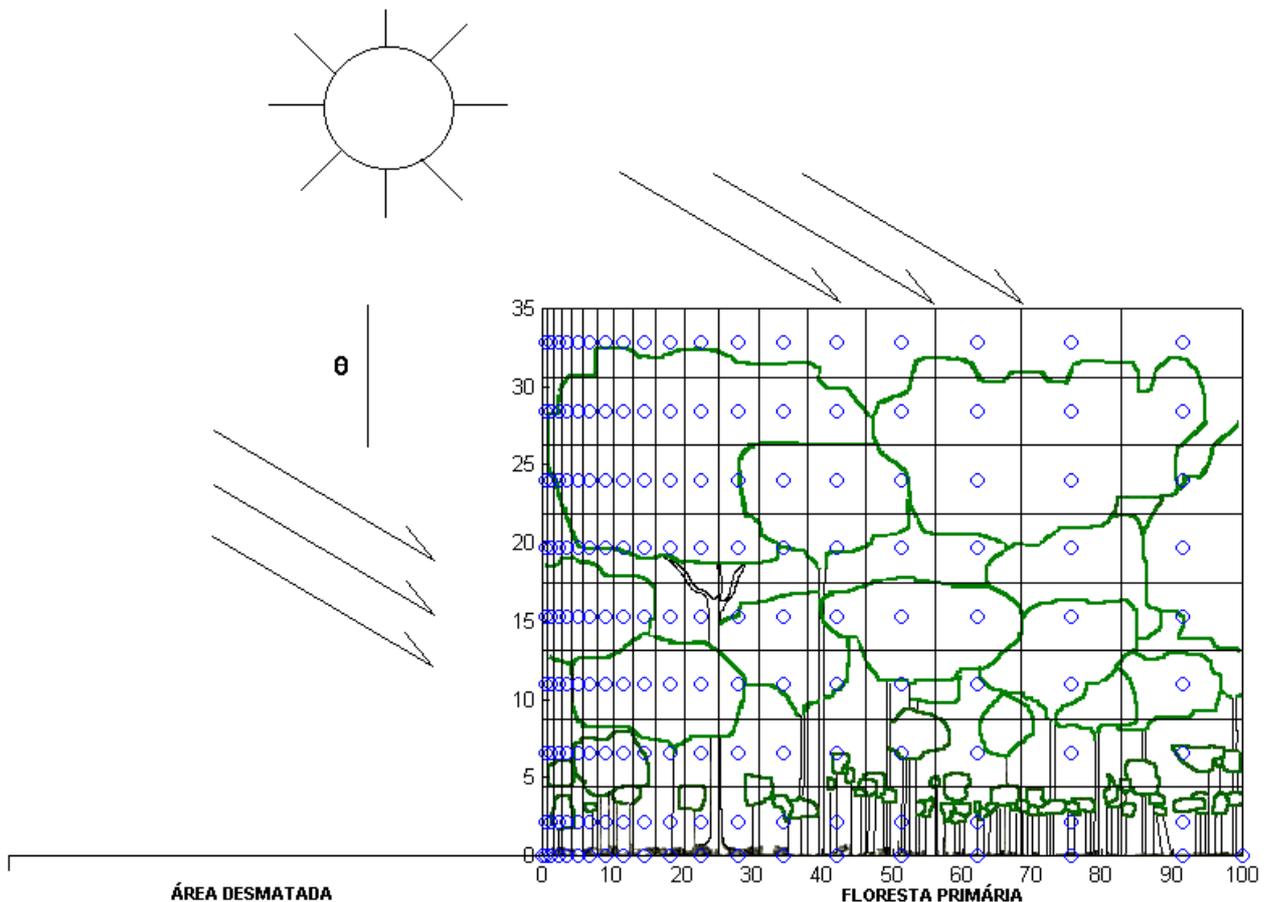


Figura 2. Representação da malha bidimensional considerada no modelo.

2.2 Mecanismo de atenuação da radiação direta

Seja um raio incidente sobre o topo da floresta, a probabilidade que ele intercepte os elementos de vegetação é proporcional ao caminho percorrido pelo mesmo através do dossel e pela distribuição e orientação desses elementos. Para uma floresta tropical, com distribuição dos elementos heterogênea, um raio com direção descrita pelo ângulo zênite, tem a probabilidade de não interceptar o dossel e alcançar o ponto (x, y) . Esta probabilidade dada por $P(\theta_z; x, z)$ é definida por duas diferentes condições de radiação que são atenuadas a partir do plano superior do dossel e da superfície de interface floresta-clareira. Na Fig. (3), seja um ponto qualquer (x, z) , em uma célula (i, j) da malha 2D, as duas retas que passam por este ponto representam cada uma as condições definidas para o modelo. A primeira condição (I), considera o raio penetrando no topo da floresta com ângulo zênite (θ_z) , através do ponto inicial (x_0, z_0) chegando ao ponto no interior da célula. Na segunda condição (II), o raio entra a partir da área desmatada lateral.

As duas condições representam as possibilidades reais de origem da radiação solar, que ocorrem em diferentes horas do dia.

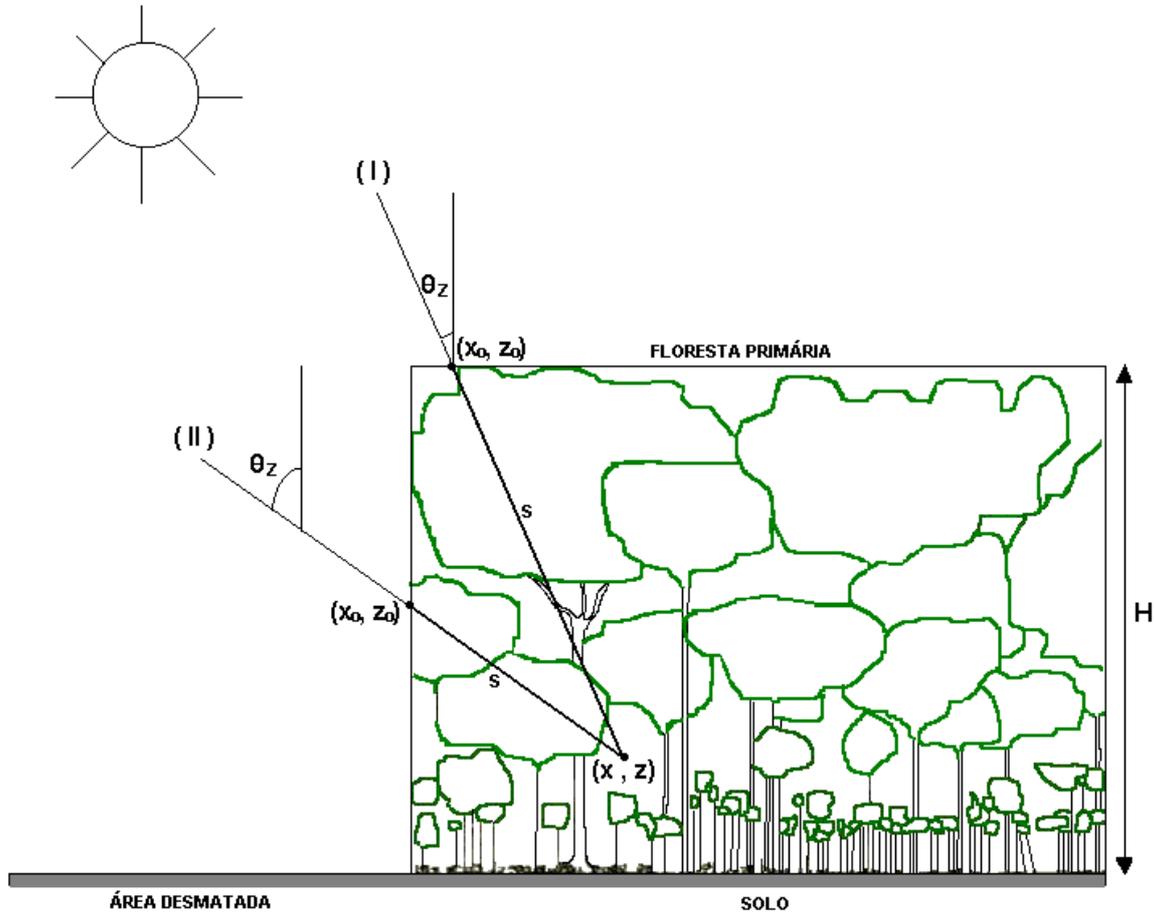


Figura 3. Representação esquemática das condições I e II.

A probabilidade de um raio não interceptar os elementos de vegetação, tanto para a condição (I) quanto para a condição (II) é definida pela Eq. (2).

$$P(\theta_z; x, z) = e^{-K(\theta_z, x_e)S} \int_{(x_0, z_0)}^{(x, z)} a \, dS \quad (2)$$

Onde, S é o comprimento do caminho percorrido pelo raio através do dossel e $K(\theta_z, x_e)$ é o coeficiente de extinção dos elementos de vegetação. O coeficiente de extinção depende de parâmetros que estão associados com a disposição geométrica desses elementos, com a arquitetura e com a disposição das árvores que compõem a densidade dos elementos. Considera-se neste trabalho que o tipo de distribuição para os elementos de vegetação é elipsoidal (Campbell & Norman, 1998) modificado para direção do raio, de maneira que:

$$K(\theta_z, x_e) = \frac{\sqrt{x_e^2 \cos^2 \theta_z + \sin^2 \theta_z}}{x_e + 1.774(x_e + 1.182)^{-0.733}} \quad (3)$$

x_e é a relação das áreas de vegetação projetadas nas superfícies horizontal e vertical. Este parâmetro depende do tipo de bioma. Para distribuições esféricas $x_e = 1$, para distribuições verticais $x_e = 0$ e para distribuições horizontais $x_e \rightarrow \infty$. (Campbell & Norman, 1998). Para florestas tropicais sugere-se no presente trabalho $x_e = 2.5$.

A probabilidade definida pela Eq. (2), pode ser diretamente relacionada com a transmissividade média da radiação em cada camada. Portanto a energia atenuada na saída de cada camada é dada por:

$$Q_b(x, z) = I_b P(\theta_z; x, z) = I_b e^{-K(\theta_z, x_e)S} \int_{(x_0, z_0)}^{(x, z)} a \, dS \quad (4)$$

A partir da Eq.(4), pode-se determinar a parcela da radiação direta incidente que é atenuada desde o topo do dossel até o ponto (x,z) no seu interior. Nesta equação, I_b é a parcela de radiação solar direta no topo da floresta. A transmissividade para o meio óptico é definida como:

$$\tau_b(\theta_z; x, z) = \frac{Q_b(x, z)}{I_b} = e^{-K(\theta_z, x_e)S} \int_{(x_0, z_0)}^{(x, z)} a \, dS \quad (5)$$

Nota-se que no cálculo de τ_b para representação da distribuição da radiação em uma hora do dia são incluídos os raios oriundos da condição (I) e/ou (II).

2.3 Mecanismo de atenuação da radiação difusa

A radiação difusa no interior de coberturas vegetais tem dependência com a estrutura do dossel e distribuição espacial dos seus elementos. Chega de todas as direções e é diferentemente atenuada da radiação do raio que chega de apenas uma direção. O modelo de atenuação é o mesmo da componente direta, entretanto considera-se a atenuação dos raios a partir da emissão hemisférica no topo do dossel. A radiação difusa é então obtida pela integração em todas as direções de emissão, dada pela Eq. (6).

$$Q_d(x, z) = I_d \int_0^{2\pi} \tau_b(\theta_z; x, z) \sin\theta \cos\theta \, d\theta \quad (6)$$

A variável I_d representa a parcela da radiação solar difusa no topo do dossel. A transmissividade é definida pela Eq. (7).

$$\tau_d(\theta_z; x, z) = \frac{Q_d(x, z)}{I_d} = \int_0^{2\pi} \tau_b(\theta_z; x, z) \sin\theta \cos\theta \, d\theta \quad (7)$$

No cálculo de τ_d a distribuição da radiação diária considera para as condições (I) e (II) os raios distribuídos no intervalo de $[0, 2\pi]$.

2.4 Posicionamento solar

No modelo de atenuação da radiação, é muito importante a relação geométrica entre os elementos que constituem a cobertura vegetal e a incidência da radiação, portanto é necessário inicialmente obter o cálculo da posição do Sol para a latitude, longitude, data e hora da simulação. O posicionamento solar é descrito por um conjunto de equações, que estão disponíveis na literatura. Por trigonometria esférica, o cosseno do ângulo zênite é dado por:

$$\cos \theta_z = \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos h \quad (8)$$

Onde ϕ é a latitude local (positiva para o hemisfério norte), δ é a declinação solar e h o ângulo hora (com periodicidade de 24 horas) do Sol. Estes valores angulares variam ao longo do dia. No presente artigo, será utilizada a metodologia de cálculo de posicionamento solar proposta por Michalsky (1988) que apresentam uma acurácia de 0.01° entre os anos de 1950-2050.

2.5 Modelo de disponibilidade da radiação incidente sobre a cobertura vegetal

Um dos parâmetros mais importantes do modelo é a quantidade da radiação incidente no topo da floresta (radiação solar global (I_g)), que se divide em duas componentes: radiação direta (I_b) e radiação difusa (I_d). Essas componentes devem ser calculadas, bem como a quantificação na banda do visível (PAR).

Na literatura são encontradas várias referências sobre o assunto, e dos modelos solarimétricos disponíveis, o modelo de Orgill & Hollands (1977), é o mais adequado para calcular a proporção da radiação direta e difusa na radiação solar global incidente. Neste modelo a parcela da radiação difusa (I_d) é quantificada por:

$$\frac{I_d}{I_g} = \begin{cases} 1 - 0.294k_T, & \text{para } k_T < 0.35 \\ 1.57 - 1.84k_T, & \text{para } 0.35 < k_T < 0.75 \\ 0.177, & \text{para } k_T > 0.75 \end{cases} \quad (9)$$

Onde $k_T \equiv I_g / I_0$ é a transmissividade da atmosfera e I_0 é a radiação solar extraterrestre no plano horizontal. Este valor pode ser estimado por Duffie & Beckman (1980):

$$I_0 = I_{sc} \left[1 + 0.33 \cos \left(\frac{360n_d}{365} \right) \right] \cos \theta_z \quad (10)$$

Nesta equação n_d é o dia do ano e $I_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2$ é a constante solar.

A distribuição espectral da radiação, de acordo com Campbell & Norman (1998), corresponde a 45% na região do visível e 55% na região do infravermelho próximo.

3. Implementação numérica

O perfil do decaimento da radiação solar no interior de uma floresta tropical com proximidade de clareiras é calculado numericamente pelas equações que descrevem a distribuição da radiação incidente sobre o dossel nas parcelas direta, difusa e espalhada, equivalente à hora do dia. No cálculo da transmissividade da radiação difusa considera-se a emissão em torno de 40 raios distribuídos no intervalo de $[0, 2\pi]$, que após testes com problemas sem interferência de clareiras apresentaram resultados mais precisos. A integração numérica da equação é feita pelo método de trapézios, considerando cada ponto da malha 2D. Para o cálculo da transmissividade da radiação direta são verificadas as condições I e II. Com os valores de I_b e I_d , para cada posição solar ao longo do dia, calcula-se a distribuição da radiação da componente direta e difusa em cada célula da malha, obtendo-se o perfil diário desta distribuição. A malha de volumes finitos 2D gerada para simulação, tem dimensão caracterizada pelo número de volume de controle $n_x=45$ e $n_y=25$ e comprimento do domínio $L_x=35\text{m}$ e $L_y=35\text{m}$.

4. Resultados e discussões

4.1. Floresta Tropical primária

As medidas de radiação (Marques filho, 1994) utilizadas para validação do modelo proposto, foram realizadas na Reserva Florestal Ducke (Manaus-Am) no período de 1º de janeiro a 13 de abril de 1994, através de sensores que foram distribuídos em diferentes alturas no interior da vegetação. A aquisição de dados foi realizada no período diurno de 6 às 18hs, com valores médios para intervalos de 20 minutos. Para estas condições foram realizadas as simulações que constam dos resultados.

A Fig. (4) ilustra a variação horária da radiação acima e no interior da vegetação em relação ao modelo proposto, para o dia 12/02/94, com céu claro e a Fig. (5) exemplifica as condições de radiação para o dia 27/02/94, com céu encoberto. Nota-se a consistência do modelo quando se faz a avaliação da similaridade qualitativa das curvas traçadas nas duas figuras, tanto para medidas no interior do dossel (24.69m) quanto para a mais próxima do solo (8.23m).

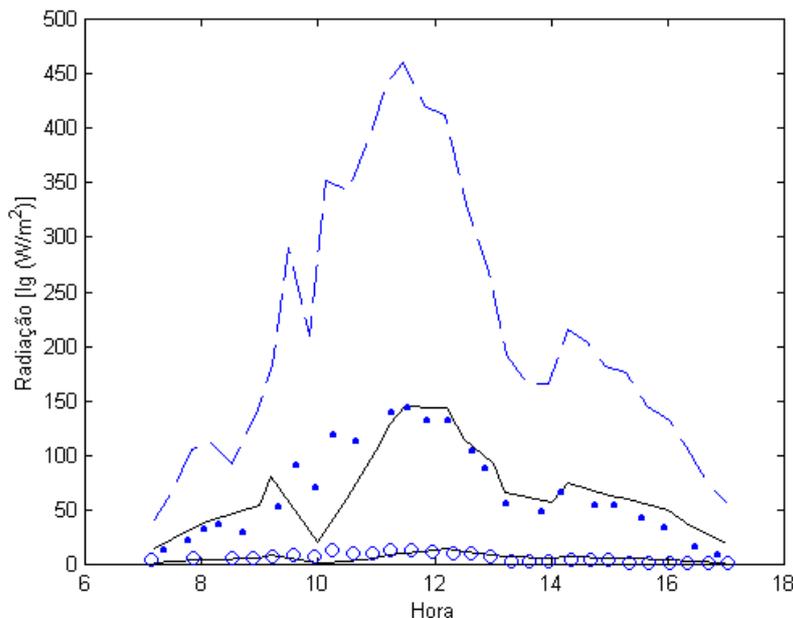


Figura 4. Variação horária de radiação acima e no interior da cobertura vegetal – (12/02/94).

(—) modelo; (---) topo do dossel, 38m; (•••) interior do dossel, 24.69m; (○○○) mais próximo do solo, 8.23m.

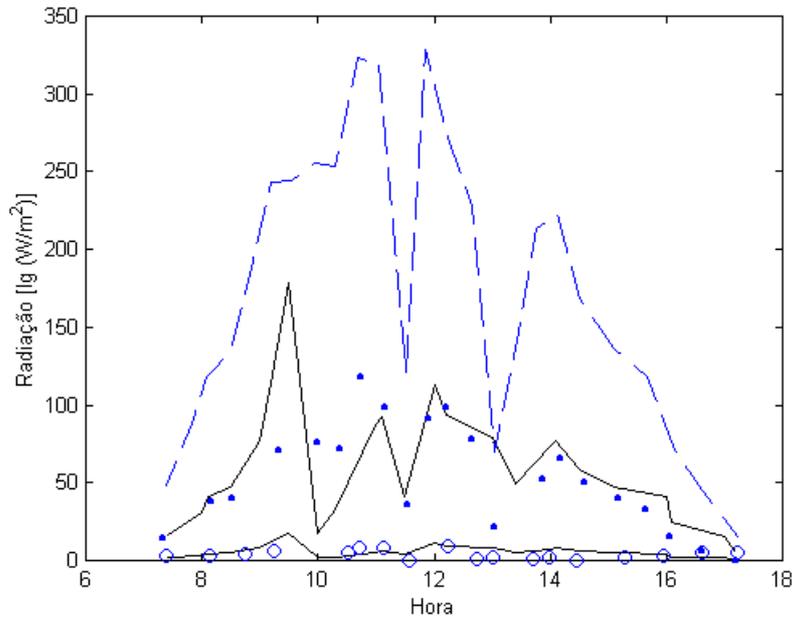


Figura 5. Variação horária de radiação acima e no interior da cobertura vegetal – (27/02/94).
 (—) modelo; (---) topo do dossel, 38m; (•••) interior do dossel, 24.69m; (○○○) mais próximo do solo, 8.23m.

Os gráficos das Figuras (6) e (7) ilustram o perfil do decaimento da radiação para os dias 12 e 27/02/94, respectivamente, no horário de 11h20min. A linha cheia representa a solução do modelo para o cálculo da distribuição de radiação em florestas primárias e os pontos plotados representam os dados experimentais (Marques Filho, 1994).

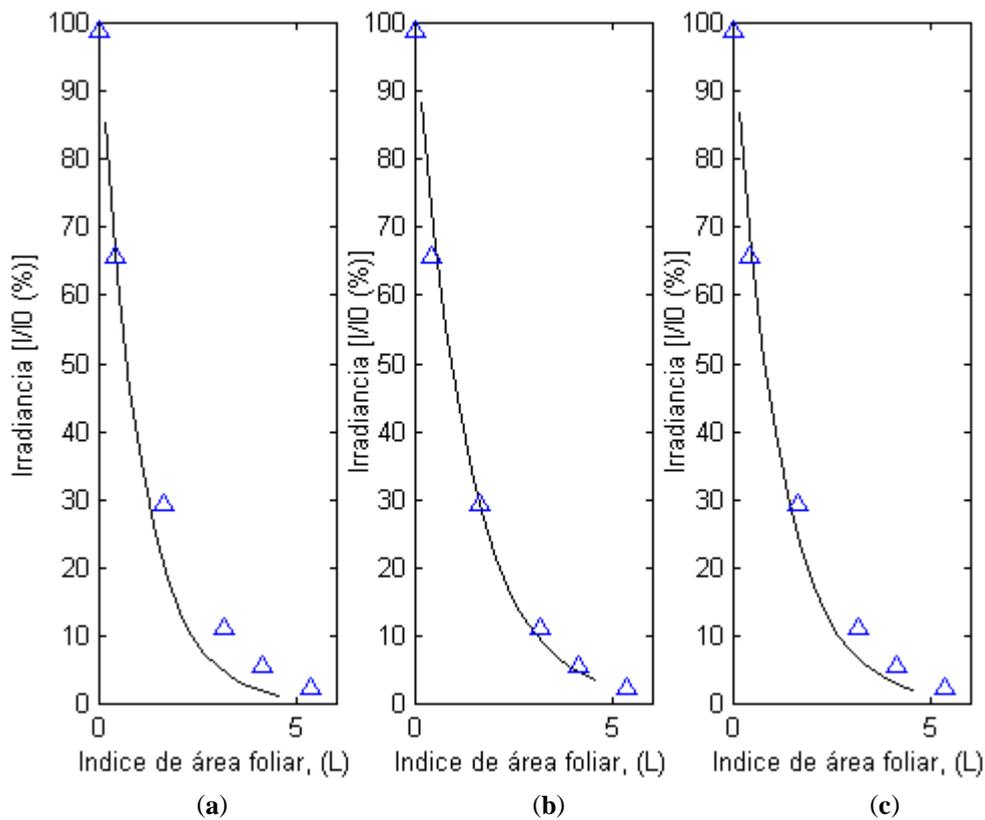


Figura 6. Perfil de decaimento da radiação em uma hora do dia (11h20min) com dados experimentais de Marques Filho (1994): (Δ) céu claro (12/02/94). A irradiância em cada banda é expressa como uma porcentagem da radiação incidente no topo do dossel. O modelo proposto (—), é apresentado em (a) radiação PAR, (b) radiação NIR e (c) radiação Total.

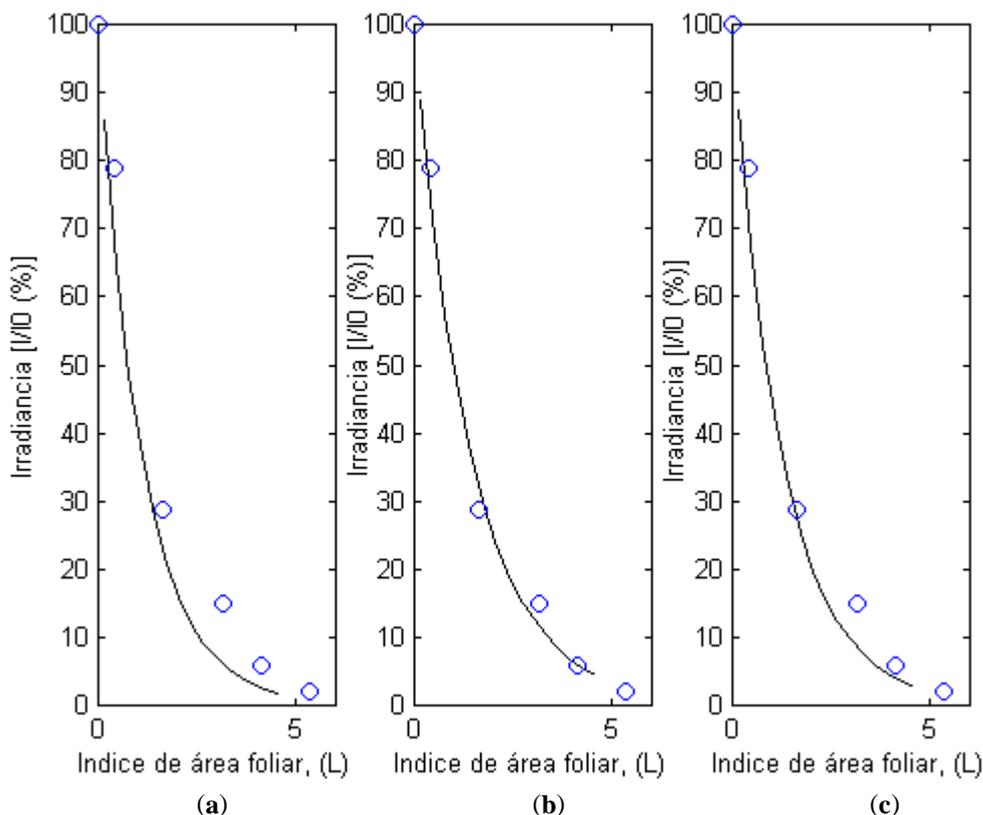


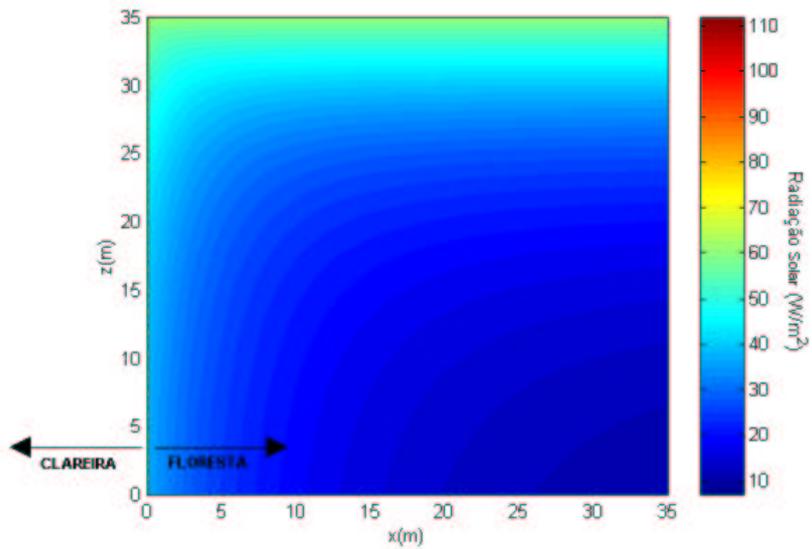
Figura 6. Perfil de decaimento da radiação em uma hora do dia (11h20min) com dados experimentais de Marques Filho (1994): (○) céu encoberto (27/02/94). A irradiância em cada banda é expressa como uma porcentagem da radiação incidente no topo do dossel. O modelo proposto (—), é apresentado em (a) radiação PAR, (b) radiação NIR e (c) radiação Total.

Os resultados apresentados nos gráficos mostram que o valor da irradiância referente às regiões PAR e NIR variam em relação ao valor do LAI, ou seja, quanto maior for este índice, menor será a irradiância. Portanto, a radiação integrada que chega abaixo do dossel apresenta valores extremamente baixos. Em razão do espalhamento da radiação no interior do dossel entre os elementos de vegetação, é esperado que ocorra na região do NIR, um aumento nos valores de irradiância quando os valores do LAI forem maiores.

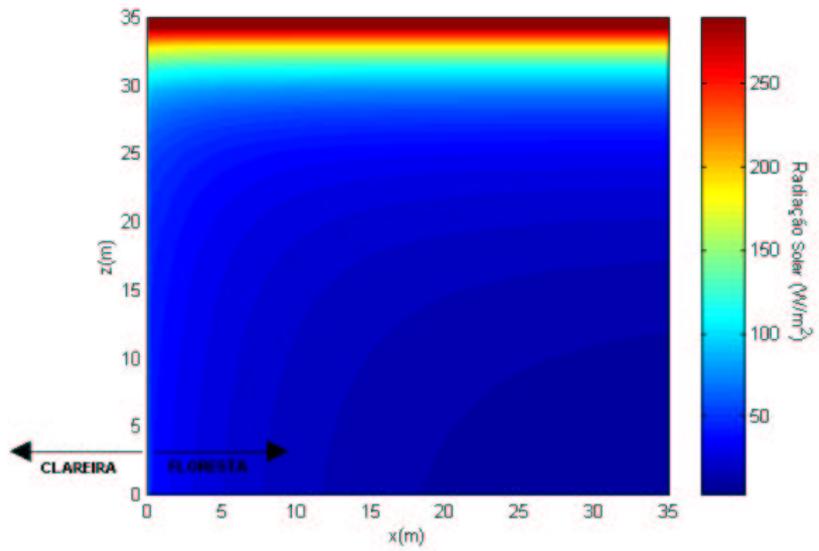
4.2. Floresta Tropical primária com proximidade de clareira

As variáveis da malha de volumes finitos 2D, gerada na simulação do modelo para uma floresta tropical primária com proximidade de clareira, são caracterizadas pelo comprimento do domínio em x e y , correspondendo a $L_x=35\text{m}$ e $L_y=35\text{m}$, respectivamente. Onde, L_x está relacionado à distância medida a partir da interface floresta-clareira até 35 metros dentro da floresta e L_y está relacionado à altura desta floresta. Os dados de entrada para fisionomia da floresta e micrometeorologia representam as características de uma floresta tropical primária localizada na Reserva Florestal Ducke (Manaus-Am). O cálculo da distribuição da radiação solar no interior desta floresta, considerando a interface floresta-clareira, é baseado nas condições em que o raio penetra a partir do topo da floresta e da área lateral (clareira), com a distribuição de folhagem em camadas em função da variação da densidade de área foliar $a(z)$. Os cálculos foram efetuados para todas as horas do dia, mas, a Fig. (8) exemplifica apenas alguns horários significativos.

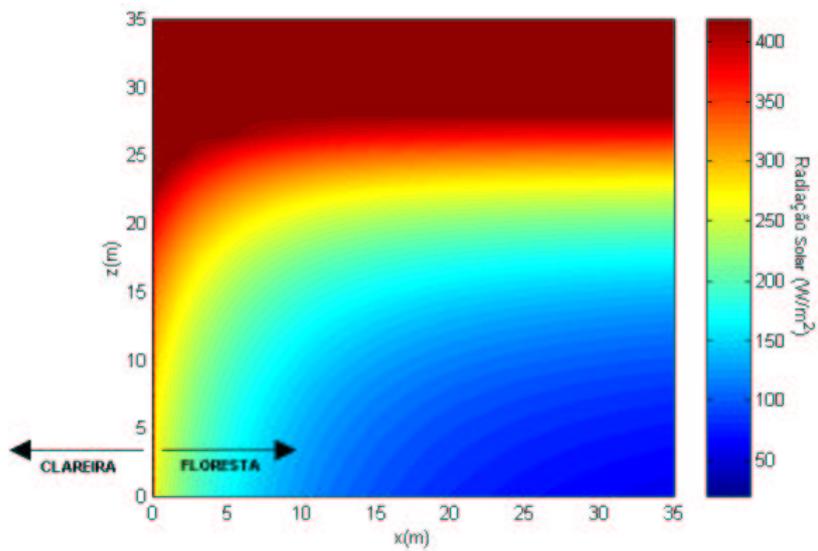
Os gráficos da Figura (8) apresentam a distribuição da radiação solar no interior de uma floresta tropical com proximidade de clareiras. A simulação foi obtida para 5 diferentes horas do dia. Os resultados estão apresentados para as seguintes horas, em (a) 8 horas, (b) 10 horas, (c) 12 horas, (d) 14 horas, e (e) 16 horas. Os dados utilizados nesta simulação foram obtidos do experimento de Marques Filho (1994), para o dia 12/02/94 apresentado céu claro.



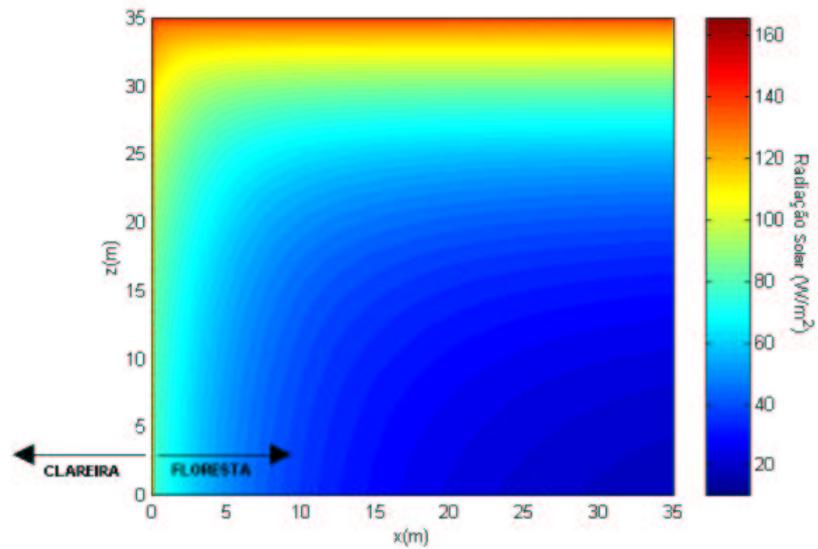
(a) 8 horas



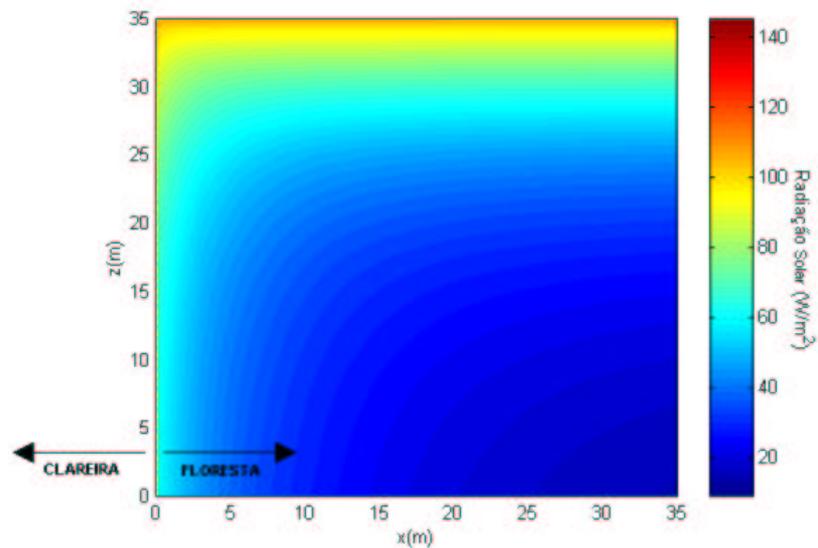
(b) 10 horas



(c) 12 horas



(d) 14 horas



(e) 16 horas

Figura 8. Distribuição da radiação solar no interior de uma floresta tropical com proximidade de clareira, em diferentes horas do dia.

A Fig. (8c) apresenta valores de radiação mais elevados no topo da floresta. No início da tarde Fig. (8d), o topo da floresta e a área de interface floresta-clareira recebem uma forte influência da radiação solar. Já na Fig. (8e) a radiação penetra com maior intensidade por esta área de interface, permitindo que a partir deste ponto onde começa a vegetação, a área receba maior quantidade de energia.

O perfil do comportamento da radiação no horário das 16hs está representado no gráfico da Fig. (9). Nota-se que a parcela da radiação atenuada que chega no solo é muito elevada nos primeiros 10 metros da floresta, iniciados a partir da interface floresta-clareira em relação ao restante da floresta, até alcançar os 35 metros. Fazendo a integração dessa radiação, obteve-se como resultados o valor de 477 W/m^2 chegando nesta área inicial, representada pelos 10 metros.

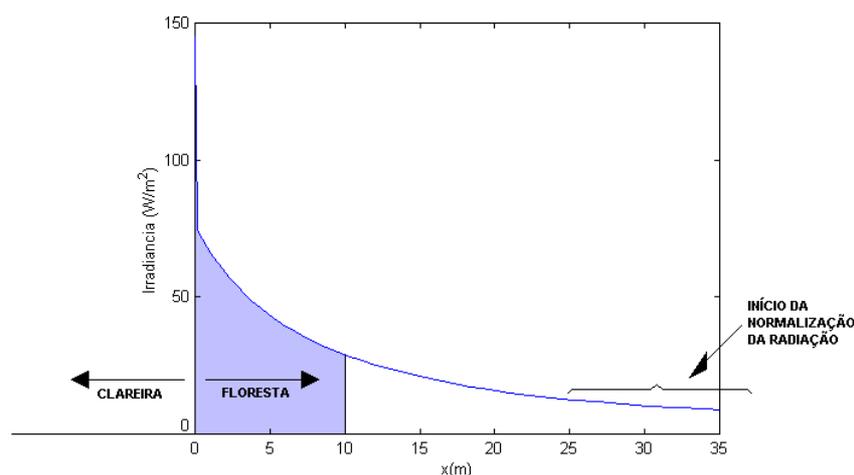


Figura 9. Perfil do comportamento da radiação no interior da floresta para o horário de 16hs.

Verifica-se neste perfil que a radiação solar no interior da floresta em função da interferência da interface floresta-clareira, começa a ser normalizada a partir dos 25 metros em diante.

5. Conclusões

Foi apresentado um modelo de atenuação de radiação solar em florestas tropicais próximo de áreas desmatadas, que é capaz de simular resultados experimentais. Os dados experimentais utilizados a fim de validar o modelo, foram obtidos por Marques Filho (1994), nos dias com céu claro e encoberto. Cabe observar que para dias encobertos há uma forte dominância de radiação difusa, pois a predominância dessa radiação está associada à cobertura de nuvens. A contribuição da radiação direta medida no topo e no interior diminui com o aumento da cobertura de nuvens.

As respostas obtidas na simulação mostraram que a intensidade da radiação varia com a hora do dia e com a elevação e posicionamento do Sol. No período da manhã, nas primeiras horas, verifica-se que a área de interface floresta-clareira e o topo da floresta recebem iluminação com intensidade baixa, que vão sendo alteradas conforme a variação solar, ou seja, a intensidade da radiação começa a aumentar na superfície superior da floresta a medida em que se aproxima das 12hs (Sol na posição do zênite).

O modelo apresentado conseguiu exemplificar através de uma simulação 2D, o efeito de atenuação da luz em uma floresta, considerando as interferências da área de clareira na lateral e as condições de penetração dos raios solares, tanto no topo do dossel, quanto na interface floresta-clareira.

6. Lista de referências

- Bonnan, G.B., 1996. "A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological and atmospheric studies: Technical Description and User's guide." NCAR Tech. Note, TN-417+STR.
- Campbell, G.S., Norman, J.M., 1998. "An introduction to Environmental Biophysics", Springer-Verlag, New York.
- de Castro, F., Fetcher, N., 1998. "Three dimensional model of interception of light by a canopy". *Agric. For. Meteorol.* 90, 215-233.
- Dickson, R.E., 1983, "Land surface processes and climate-surface albedos and energy balance", *Adv. Geophys.* 25, 305-353.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1980. "Solar Engineering of Thermal Processes", J. Wiley, New York.
- Marques Filho, A. de O., 1997. "Regime de Radiação Solar e Características da Vegetação - Modelos de Inversão". *Acta Amazonica* 27(2): 119-134.
- Michalsky, J.J., 1988. "The Astronomical Almanac's Algorithm for Approximate Solar Position (1950-2050)". *Solar Energy*, 40, 3, 277-235.
- Modest, M.F., 1993. "Radiative Heat Transfer", Ed. McGraw-Hill, New York.
- Nobre, C.A., et al., 1999. "Projeto Balanço de Energia, Vapor D'Água e CO₂ em áreas de floresta tropical na Amazônia Central" (Projeto 0966/95) realizado pelo INPE e INPA, durante o período de 1996 à 1999.
- Norman, J.M., Jarvis, P.G., 1975 "Photosynthesis in Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). V. Radiation penetration theory and test case". *J. of Appl. Ecol.* 9, 747-766.
- Orgill, J.F., Hollands, K.G.T., 1977. "Correlation equation for hourly diffuse radiation on horizontal surface". *Solar Energy*, 19, 357-
- Sellers, P.J., 1985. "Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration". *Int. J. Remote Sensing* 6, 1335-1372.
- Sellers, P.J., Randall, D.A., Collatz, G.A., Berry, J.A., Field, C.B., Dazlich, D.A., Zhang, C., Colletto, G.D., Bounoua, L., 1996. "A revised land surface parametrization (SiB2) for Atmospheric GCMs. Part I: Model formulation". *J. of Climate* 9, 676-705.

- Sellers, P.J., 1992. "Biophysical models of land surface processes". In Climate System Modeling Ed. K.E. Trenberth. Cambridge University Press, New York, 451-490.
- Shuttleworth, W.J., et al. 1984. "Observations of radiation exchange above and below Amazonian forest". Quart. J. R. Met. Soc., 110, 1163-1169.
- Stadt, K.J., Lieffers, V.J., 2000. "MIXLIGHT: a flexible light transmission model for mixed-species forest stands". Agric. For. Meteorol. 102, 235-252.
- Szeicz, G., 1974. "Solar radiation in plant canopies". Journal of Applied Ecology, 11, 1117-56.
- Wandelli, E. V., Marques Filho A.O., 1999. "Medidas de Radiação Solar e Índice de Área Foliar em Coberturas Vegetais". Acta Amazonica 29(1): 57-78.

ATTENUATION OF SOLAR RADIATION NEAR DEFORESTED AREAS IN TROPICAL FORESTS

Edileuza C. de Melo

Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro - Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica, Asa Norte - 70910-900 - Brasília. DF.

edileuza@unb.br

Antonio C. P. Brasil Junior

Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro - Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica, Asa Norte - 70910-900 - Brasília. DF.

brasiljr@unb.br

Abstract. *This work presents an attenuation model (2D) capable of quantifying radiative heat through vegetative layers. In the model, an heterogeneous distribution of vegetative cover is considered allowing predictions for regions near deforested areas. The amount of direct and diffused radiation, attenuated by the plant coverage, is calculated with a plot of rays methodology. Predictions from the model are in good agreement with experimental data obtained in Reserva Florestal Ducke, near Manaus-AM.*

Keywords. *Solar Radiation in Forest, Heat Transfer in Tropical Forests.*