

Modelos de Simulação da Refletância e do IVDN em Gradiente de Fisionomias do Cerrado

Humberto N. de Mesquita Jr.¹
Marisa Dantas Bitencourt²

¹ Núcleo de Geoprocessamento da Diretoria de Florestas do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais, SCEN Trecho 2, Ed. Sede IBAMA, Bloco “E”, 70818-900, Brasília - DF, Brasil
humberto.mesquita-junior@ibama.gov.br

² Departamento de Ecologia da Universidade de São Paulo
Rua do Matão 321, Trav. 14, 05508-900 - São Paulo - SP, Brasil
tencourt@ib.usp.br

Abstract. An area that interests the ecologists as much as specialists in remote sensoramento is the study of the interaction between the light and the vegetation by means of physical models. These models are based on basic physical principles to simulate scenes of the environment in three dimensions. In this work a model was used to study of the structural variations of the physiognomic gradient of the vegetal coverage of Cerrado. The SPRINT physical model that simulate the three-dimensional structure of the vegetation. The parameterization of the model was the task most difficult in the implementation process. The results gotten with the models had been compared with temporal series of IVDN data from satellite images. These models had revealed useful in the inquiry of the relations between the structure vegetation and the interaction of the electromagnetic energy. The results still indicate that these models can be particularly interesting in the integration with other related models of the dynamic processes of the vegetation.

Palavras-chave: SPRINT, simulation models, Cerrado, Vegetation structure.

1. Introdução

Os modelos podem ser entendidos como simplificações de realidade. Várias tentativas têm sido feitas para representar a complexa realidade da interação da energia com a vegetação. A pesquisa sobre os modelos da interação da radiação eletromagnética com a vegetação é uma componente de interesse para pesquisas em sensoriamento remoto.

Várias estratégias foram desenvolvidas sendo uma delas a estratégia baseada em modelos físicos, cuja concepção é fundamentalmente teórica (caráter abstrato e especulativo do ponto de vista hipotético) e uma extensão desta pode incluir simulações estatísticas.

Os modelos físicos podem ser divididos em túrbidos, geométricos, híbridos, discretos, de transferência de radiação e baseados em simulação estatística em computadores.

Os modelos de transferência de radiação da vegetação representam a interação da radiação eletromagnética com as folhas das plantas (reflexão, transmissão e absorção). No modelo *PROSPECT* (Jacquemoud & Baret, 1990), a dispersão da radiação dentro da folha é descrita pelo índice de refração, parâmetro que descreve a estrutura do mesófilo foliar. A absorção é modelada usando-se a concentração de pigmentos e o conteúdo de água na folha, assim como os correspondentes coeficientes (definidos a partir de dados experimentais). Outros exemplos de modelos da interação entre a radiação e as folhas são o modelo *LIBERTY*

(Dawson *et al.* 1999) e o *SLOP - Stochastic model for Leaf Optical Properties* (Maier *et al.* 1999).

Nos modelos de meios túrbidos, assume-se que o dossel florestal ou a cobertura vegetal é uma camada contínua, homogênea e horizontalmente uniforme, possui camadas planas, paralelas e distintas sobre a superfície do terreno. Os elementos da vegetação são distribuídos aleatoriamente. Nestes modelos a estrutura da cobertura vegetal é representada pelo índice de área foliar (IAF) e pela distribuição dos ângulos de inclinação foliar (DAIF).

O modelo SAIL *Scattering-from-Arbitrarily-Inclined-Leaves* (Verhoef, 1984) é um exemplo de modelo de meio túrbido. Este modelo serviu para a representação de coberturas vegetais homogêneas (com poucos elementos), sendo bem sucedido na representação de culturas agrícolas em estágio maduro, como por exemplo milho, soja e trigo (Goel & Thompson, 2000).

Nos modelos geométricos os objetos da superfície são representados com formas geométricas, distribuídas regularmente ou aleatoriamente, com propriedades ópticas e dimensionais. Estes constituem-se em uma modificação dos modelos túrbidos, com o objetivo de incluir a heterogeneidade da reflexão especular e do sombreamento, causado pela cobertura vegetal irregular. A refletância da cobertura vegetal é calculada pela soma ponderada da refletância direta e sombreada, da copas das árvores, e direta e sombreada, da superfície do terreno. As frações da refletância de cada elemento da cobertura vegetal são calculadas usando óptica geométrica. Um exemplo deste modelo é o de representação geométrica proposto por Li & Strahler (1986). Este modelo, para coberturas vegetais esparsas com alta densidade foliar, mostrou-se adequado na representação de ângulos de visada e solares restritos. Existem modelos mais recentes que também utilizam esta concepção de modelos óptico-geométricos (Gerard & North, 1997).

Os modelos discretos podem ser considerados como uma derivação dos modelos de meio túrbido, pois podem utilizar uma composição de modelos de meio túrbido discretizados no espaço. Neste caso, utilizam intervalos discretos, no espaço tridimensional da cobertura vegetal, para aplicar diferentes equações. Em outros casos, a definição pode ser horizontal à cobertura, definindo diferentes equações para diferentes elementos da cobertura vegetal, elementos representados por polígonos bidimensionalmente na superfície do terreno. Gastellu-Etchegorry *et al.* (1996) apresentaram o modelo DART (*Discrete Anisotropic Radiative Transfer*), no qual a cobertura vegetal é composta de cubos, ao invés de polígonos. Cada cubo representa elementos da cobertura vegetal, com propriedades de transferência de radiação distintas, como folhas verdes, troncos e elementos não fotossintetizantes e solo.

Os modelos híbridos são compostos de modelos geométricos e de meio túrbido. Geralmente os modelos definem os elementos da cobertura vegetal como formas geométricas e estes são constituídos internamente de um meio túrbido com elementos da vegetação aleatoriamente distribuídos. Kuusk (1994) integrou o modelo PROSPECT, de transferência radiativa na folha, com a representação do espectro de refletância do solo e espectro da radiação solar, resultando na refletância da cobertura vegetal. Baret *et al.* (1995) realizaram estimativa de fração de espaços da cobertura da vegetação por meio de índices de vegetação conjugando o modelo PROSPECT e SAIL para a simulação. Um modelo baseado neste tipo de estrutura foi apresentado por Chen e LeBlanc (1997) no qual foram consideradas a disposição dos indivíduos e a disposição dos ramos no interior da copa. Dawson *et al.* (1999) integraram os modelos LIBERTY de transferência de radiação e o modelo FLIGHT (North, 1996) da função de distribuição da refletância bidirecional da cobertura vegetal. Kuusk & Nilson (2000) integraram o modelo PROSPECT2 e o modelo de transferência de radiação na atmosfera 6S (Vermote *et al.* 1997), resultando na estimativa da refletância da cobertura

vegetal. Demarez & Gastellu-Etchegorry (2000) representaram a cobertura vegetal em três dimensões, combinando um modelo híbrido: o DART e o PROSPECT.

Os modelos de simulação computacional são uma extensão dos modelos mencionados incluindo uma componente estocástica. Estes podem usar a concepção dos modelos geométricos, mas a definição das posições das árvores pode ser dada por uma distribuição probabilística. Os elementos do modelo são determinados, aleatoriamente, segundo certas funções de distribuição. Outros simulam a radiação eletromagnética que atinge uma cobertura vegetal, utilizando distribuições aleatórias ou probabilísticas. Um tipo de modelo que pode ser incluído nesta categoria é o modelo de simulação de trajetória do fóton através da cobertura vegetal. Neste modelo, o fóton pode ser absorvido pela vegetação ou pelo solo, ou pode escapar da cobertura vegetal e ser detectado pelo sensor. Geralmente, estes modelos aplicam o método de Monte Carlo para realizar as simulações das trajetórias (Ross & Marshak, 1988; Lewis, 1999; North, 1996).

Recentemente, Goel & Thompson (2000) apresentaram o modelo SPRINT para calcular a refletância de uma cena composta de vários elementos, vegetais ou não. Este modelo pode ser incluído na categoria daqueles utilizados na simulação computacional, são chamados de modelos rápidos por reduzir o tempo de computação. Várias alterações e algumas simplificações foram adotadas para reduzir o tempo de computação sem afetar o grau de acerto do modelo. Este modelo foi apresentado pelos autores como sendo universal, pois pode emular os de meio túrbido, os geométricos, os híbridos e os baseados em simulação por computadores.

Uma utilização dos modelos de refletância é a simulação do IVDN com o objetivo de inverter o modelo e obter os parâmetros da estrutura complexa da cobertura vegetal florestal.

O objetivo deste trabalho é obter e parametrizar alguns tipos de modelos de simulação do IVDN das fisionomias do Cerrado que permitam criar cenários relativos à variação na proporção dos componentes herbáceo e arbóreo sazonalmente.

2. Área de Estudo

A área de estudo escolhida é a gleba Pé-de-Gigante, situada no Município de Santa Rita do Passa Quatro, no estado de São Paulo, Brasil (21°37'30" Sul, 47°37'30" Oeste), por ser uma unidade de conservação constituída por um gradiente de fisionomias de Cerrado, partindo das campestres até as florestais.

Foram utilizados dados obtidos em levantamento fitossociológico (Mesquita Jr. 1998, Batalha *et al.* 2001) em toda a gleba e dados coletados em parcelas contíguas no gradiente fisionômico. Nas 39 parcelas contíguas de 30x30m, foram amostrados parâmetros da estrutura que permitiram representar, espacialmente e tridimensionalmente, as copas das árvores.

3. Metodologia

O modelo de variação da cobertura da vegetação foi construído considerando que a variação total da cobertura vegetal depende da proporção das formas de vida que compõem as fisionomias do cerrado. Para a modelagem da variação do IVDN das fisionomias de Cerrado foi utilizado o modelo tridimensional por simulação do traçado dos fótons (Goel & Thompson, 2000) que é parametrizado por índice de área foliar, forma, tamanho, disposição espacial e tipo de copa das árvores.

Para a construção da cena, são necessárias informações sobre todos os indivíduos vegetais que a compõe. Para cada indivíduo arbóreo, deve ser fornecido o tipo, o X, o Y, a

altura da base ao topo da copa e o raio da copa. Estas informações ainda não são suficientes para espacializar às árvores na cena. O tipo de árvore é dado pela forma da copa, densidade de folhas, tamanho das folhas, densidade de galhos e distribuição angular das folhas. A forma da copa pode ser definida como cônica, cilíndrica, elipsóide, cúbica e cilíndrica com um cone no topo.

O tamanho das folhas foi obtido por meio de literatura para as espécies que foram amostradas no levantamento fitossociológico. Quanto à distribuição angular das folhas, o modelo possui as seguintes opções: planófila, erectófila, plagiófila, extremófila, uniforme e esférica. Existe a possibilidade de definir as características ópticas das folhas, galhos e solo (não foram alteradas na parametrização). O modelo permite definir as faixas espectrais e os ângulos de visada do sensor.

As coordenadas X e Y dos indivíduos foram ajustadas em relação a pontos obtidos com o GPS no campo e com a imagem *Ikonos* de resolução de um metro (Multispectral + Pancromática). Estas coordenadas foram usadas no processo de construção da cena do modelo tridimensional.

Todos os 4.534 indivíduos amostrados, com diâmetro basal maior que 10cm, foram reunidos em 8 grupos com características semelhantes, relacionadas aos parâmetros utilizados no modelo. O número de grupos é uma limitação operacional do modelo. Por esta razão, foi dada maior importância às características dos indivíduos mais abundantes e dominantes, usando a copa como parâmetro para dominância. As demais espécies foram incluídas nestes grupos principais por semelhança, principalmente pela arquitetura da copa, tipo e tamanho das folhas.

Na **figura 1**, está ilustrada a posição das parcelas fixas, onde foram amostrados os parâmetros, e a representação tridimensional das árvores nas parcelas, dada pelo modelo SPRINT.

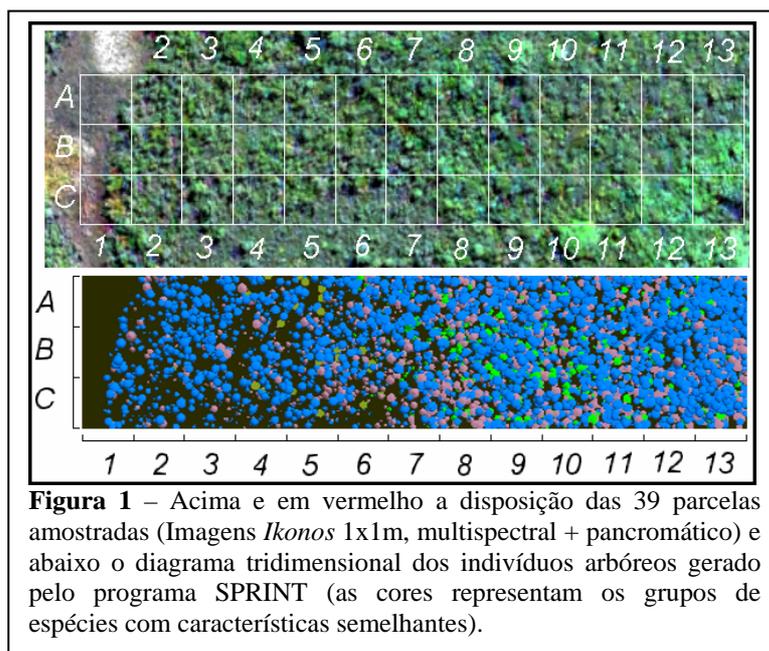


Figura 1 – Acima e em vermelho a disposição das 39 parcelas amostradas (Imagens *Ikonos* 1x1m, multispectral + pancromático) e abaixo o diagrama tridimensional dos indivíduos arbóreos gerado pelo programa SPRINT (as cores representam os grupos de espécies com características semelhantes).

Além dos oito grupos principais, um último grupo foi utilizado para representar a contribuição do componente herbáceo. Neste caso, não foram obtidos dados deste parâmetro em campo. Para estimar a participação deste componente, foram utilizadas as proporções de cobertura das copas projetadas e fotografias aéreas para a proporção de cobertura. A proporção de cobertura do componente herbáceo serviu como fator que, aplicado a uma cobertura máxima, dada por uma distribuição regular de esferóides de 1 metro de altura e 2,5 metros de raio, representou as touceiras do herbáceo.

4. Resultados

Foram realizadas algumas simulações do traçado dos fótons para testar o uso do modelo. No modelo, é possível representar estrutura geométrica da arquitetura das copas das

árvores, revelando o traçado de um fóton. Para cada cena criada, é possível determinar o índice de área foliar da cena. Assim, depois de construída a cena, esta pode ser comparada com os valores obtidos em campo ou por outro método.

O modelo foi implementado para cada uma das 39 parcelas amostradas em campo. Uma forma de estimar a anisotropia do alvo pode ser quantificada pela variância dos valores de IVDN obtidos em diferentes ângulos de visada, igualmente em todas as direções da abóbada. Na **figura 2**, estão representadas graficamente as variâncias dos IVDN obtidos pelo modelo, para 59 ângulos de visada, em cada uma das 39 parcelas fixas.

Os resultados permitem estimar os efeitos da anisotropia no gradiente de fisionomias e indicam que estes efeitos são maiores nas fisionomias que apresentaram maior heterogeneidade de

alturas e distribuição das copas. Assim, as fisionomias campestres e florestais, com estrutura de altura do dossel mais regular, apresentaram menor efeito de anisotropia. A fisionomia de cerrado *stricto sensu* apresentou a maior irregularidade do dossel e o maior efeito de anisotropia.

Na **tabela 1**, estão listados os valores de IVDN e IAF previstos pelo modelo SPRINT para as 39 parcelas. Estes valores foram comparados com os valores de IAF medidos em campo com o sensor óptico LAI-2000/LiCor e os correspondentes valores na imagem IVDN. Foram utilizadas 9 imagens *Landsat-TM* em diferentes datas (com condições sazonais conhecidas), uma imagem *Terra-ASTER* e uma imagem *Ikonos-Multispectral*. O IAF previsto pelo modelo apresentou baixa correlação ($r = -0,04$) com os valores medidos em campo. Os valores de IAF previstos foram sempre inferiores aos valores medidos em campo.

O IVDN apresentou melhor correlação com os valores derivados da imagem *Ikonos-Multispectral* ($r = 0,84$). As imagens *Landsat-TM* sazonais dos períodos de estiagem ou pré-estiagem (quando ocorre a maior variação do IVDN entre as fisionomias campestres e florestais do gradiente) apresentaram os maiores coeficientes de correlação. As imagens de Setembro de 2000 ($r = 0,83$), Julho de 1996 ($r = 0,81$) e Setembro de 1994 ($r = 0,71$) são imagens de anos em que ocorreram temperaturas baixas extremas, que afetaram principalmente as fisionomias campestres, causando a diminuição do IVDN nestas datas. As imagens de Janeiro de 1996 ($r = 0,31$) e novembro de 1995 ($r = 0,50$) apresentam as menores variações de IVDN entre as fisionomias de Cerrado.

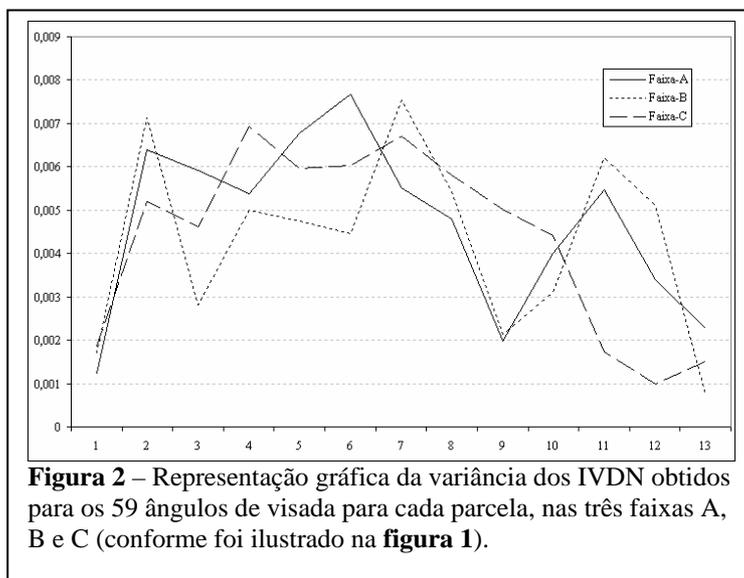


Tabela 1 – Valores de IAF e IVDN previstos pelo modelo SPRINT utilizando como parâmetros dados coletados em campo nas parcelas fixas, sendo A, B e C as faixas e 1 a 13 as parcelas (conforme foi ilustrado na **figura 1**).

	IAF				IVDN		
	A	B	C		A	B	C
1	0,954	1,015	0,950	1	0,197	0,223	0,213
2	1,261	1,170	1,132	2	0,356	0,384	0,353
3	1,988	2,253	1,657	3	0,642	0,757	0,514
4	2,026	1,876	1,825	4	0,641	0,586	0,569
5	1,913	2,149	1,726	5	0,659	0,671	0,589
6	1,330	1,803	1,210	6	0,567	0,700	0,382
7	1,230	1,012	1,007	7	0,722	0,538	0,483
8	1,217	1,383	1,310	8	0,700	0,702	0,684
9	1,645	1,771	1,422	9	0,812	0,821	0,720
10	1,334	1,411	1,085	10	0,735	0,779	0,624
11	1,178	0,746	1,860	11	0,710	0,606	0,806
12	1,353	1,425	2,075	12	0,795	0,713	0,858
13	1,240	2,325	2,942	13	0,770	0,881	0,873

5. Discussões

Os intervalos de variação do IAF obtidos pelo modelo são similares aos obtidos por medidas indiretas com o LAI-2000/LiCor, em campo. No entanto, a correlação dos valores das parcelas no gradiente foi baixo.

Os resultados obtidos neste trabalho foram adequados aos objetivos propostos. Foram desenvolvidos três modelos para representação da cobertura vegetal e fisionomias de cerrado. A primeira aproximação foi feita utilizando como parâmetro o IVDN, obtido por sensores orbitais, para chegar a um modelo de previsão. Na segunda e terceira aproximações, foram utilizados parâmetros da vegetação em modelos semi-empírico e físico que simularam o IVDN.

O modelo empírico apresentado foi baseado no volume cilíndrico para caracterizar os componentes da estrutura das fisionomias. Os resultados indicam que a maior dificuldade de ajuste é devida à alta variabilidade da estrutura da floresta estacional semidecidual.

Os resultados obtidos para o efeito de anisotropia das fisionomias é similar ao obtido por outros autores. Muller (1993) comparou imagem Landsat-TM e SPOT e observou que os efeitos de anisotropia são maiores na faixa do infravermelho próximo e menores na faixa do vermelho.

Os IVDN obtidos com o modelo SAIL foram aproximados aos IVDN derivados das imagens de sensores orbitais. Neste modelo foram utilizadas duas variáveis para a parametrização, o IAF e a concentração de clorofila.

As melhores correlações entre os valores previstos pelo modelo SPRINT e a partir das imagens IVDN foram os dos períodos após temperatura baixa extrema, em que os valores de IVDN para as fisionomias campestres foram os mais baixos. Esta relação indica que os valores para a parametrização do componente herbáceo podem ter sido subestimados. A baixa correlação dos valores de IAF previstos pelo modelo sempre foi inferior aos obtidos em campo, também pode ser indicativa da subestimativa do componente herbáceo na parametrização do modelo.

Os resultados da comparação com o IVDN também apresentaram intervalos de variação similares aos obtidos em campo, mas as melhores correlações ocorreram com as datas que apresentavam maior variação de IVDN (após condição de temperatura extrema). Estes resultados indicam que seriam necessárias parametrizações das condições sazonais de variação da quantidade e estrutura das folhas no interior das copas. Este tipo de

parametrização não é fácil, pois seriam necessários estudos sobre esta dinâmica no interior das copas.

Os resultados obtidos foram similares àqueles obtidos por sensores remotos orbitais. No entanto, há que se considerar que os sensores orbitais estão sujeitos a efeitos atmosféricos que podem reduzir seus valores.

6. Conclusões

Em todos os casos, os resultados obtidos foram suficientes para permitir inferências sobre o IVDN do gradiente de fisionomias do Cerrado e a projeção de cenários sazonais. O aprimoramento destes modelos depende do constante ajuste por retro-alimentação com os resultados produzidos por sucessivos testes.

No modelo empírico, a atividade mais importante no processo de modelagem é a escolha das variáveis para o teste de ajuste do modelo.

No caso dos modelos SAIL e SPRINT, a parametrização e a análise de sensibilidade dos modelos propiciam os seus desenvolvimentos aplicados à cobertura vegetal do Cerrado. Estas atividades são limitantes no desenvolvimento dos modelos, pois existe uma relação inversa entre a complexidade destes e a capacidade de parametrizar e realizar análise de sensibilidade. Modelos muito complexos consomem muito tempo para gerar poucos cenários, resultados das simulações.

A forma como foram conjugados os modelos SAIL e PROSPECT não gerou um modelo complexo. Assim, poucas variáveis foram utilizadas na parametrização nesta etapa. A possibilidade de repetir a análise alterando os parâmetros de entrada, repetidas vezes, possibilitou a análise de sensibilidade deste modelo.

No caso do modelo SPRINT, a análise de sensibilidade é mais laboriosa dada à complexidade do modelo e maior quantidade de parâmetros.

Nos três modelos testados, foram obtidos bons resultados, que permitem o estudo de simulação de cenários com as fisionomias de Cerrado. Estes modelos podem ser aprimorados com a adição de novos parâmetros da vegetação e aumento de sua complexidade.

Os modelos parametrizados com variáveis da vegetação podem ser testados em diferentes cenários. Modelos parametrizados podem ser utilizados em relação a outros parâmetros de interesse ecológico como: orientação de vertentes, declividade, solo de fundo, serapilheira e outros componentes não fotossintetizantes.

A conjugação destes modelos de refletância com modelos de folhas, incorporando informações fisiológicas, pode contribuir para a compreensão da atividade fotossintética da cobertura vegetal.

Referências

- Baret, F.; Clevers, J.G.P.; Steven, M.D. The Robustness of Canopy Fraction Estimates from Red and Near-infrared Reflectances: A Comparison of Approaches. **Remote Sensing of Environment**, New York, 54:141-151. 1995.
- Batalha, M.A.; Mantovani, W.; Mesquita Jr, H.N. Vegetation Structure in Cerrado physiognomies in Southern Brazil, **Revista Brasileira de Biologia**, São Paulo, 2001.
- Chen, J.M.; Leblanc, S.G. A Four –Scale Bi-directional Reflectance Model Based on Canopy Architecture. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, 35(5): 1316-1337. 1997.
- Dawson, T.P.; Curran, P.J.; North, P.R.J.; Plummer, S.E. The propagation of Foliar Biochemical Absorption Features in Forest Canopy Reflectance: Theoretical Analysis. **Remote Sensing of Environment**, New York, 67:147-159. 1999.

- Demarez, V.; Gastellu-Etchegorry, J.P. A Modelling Approach for Studying Forest Chlorophyll Content. **Remote Sensing of Environment**, New York, 71:226-238. 2000.
- Gastellu-Etchegorry, J.P.; Demarez, V.; Pinel, V.; Zagolski, F. Modeling Radiative Transfer in Heterogeneous 3-D Vegetation Canopies. **Remote Sensing of Environment**, New York, 58:131-156. 1996.
- Gerard, F.F.; North, P.R. J. Analyzing the Effect of Structural Variability and Canopy Gaps on Forest BRDF Using a Geometric-Optical Model. **Remote Sensing of Environment**, New York, 62:46-62. 1997.
- Goel, N.S.; Thompson, R.L. A Snapshot of Canopy Reflectance Models and a Universal Model for the Radiation Regime. **Remote Sensing Reviews**, New York, 18: 197-225. 2000.
- Jacquemoud, S.; Baret, F. PROSPECT: A Model of Leaf Optical Properties Spectra. **Remote Sensing of Environment**, New York, 34:75-91. 1990.
- Kuusk, A. A Multispectral Canopy Reflectance Model. **Remote Sensing of Environment**, New York, 50:75-82. 1994.
- _____; Nilson, T. A Directional Multispectral Forest Reflectance Model. **Remote Sensing of Environment**, New York, 72:244-252. 2000.
- Lewis, P. Tree-dimensional plant modelling for remote sensing simulation studies using the Botanical Plant Modelling System, **Agronomie**, 19(3-4), 185-210. 1999.
- Li, X.; Strahler, A.H. Geometric-Optical Modeling of a Conifer Forest Canopy. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, GE23(5)705-720. 1986.
- Maier, S. W.; Ludeker, W.; Gunther K. P. SLOP: A Revised Version of the Stochastic Model for Leaf Optical Properties. **Remote Sensing of Environment**, New York, 68:273-280. 1999.
- Mesquita Jr, H.N. **Análise temporal com sensor orbital de unidades fisionômicas de cerrado na Gleba Pé-de-Gigante (Parque Estadual de Vassununga - SP)**, Dissertação de mestrado defendida no departamento de ecologia do Instituto de Biociências. São Paulo: Universidade de São Paulo. 1998. 127 p.
- Muller, E. Evaluation and Correction of Angular Anisotropic Effects in Multidate SPOT and Thematic Mapper Data. **Remote Sensing of Environment**, New York, 45:295-309. 1993.
- North, P.R.J. Three-Dimensional Forest Light Interaction Model Using a Monte Carlo Method. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, 34(4): 946-956. 1996.
- Ross, J.K.; Marshak, A.L. Calculation of Canopy Bidirectional Reflectance Using a Monte Carlo Method. **Remote Sensing of Environment**, New York, 24:213-225. 1988.
- Verhoef, W. Light Scattering by Leaf Layers with Application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. **Remote Sensing of Environment**, New York, 16:125-141. 1984.