

## Estimativa de macronutrientes em floresta Ombrófila Mista Montana utilizando dados de campo e dados obtidos a partir de imagens do satélite IKONOS II

Vanessa Canavesi<sup>1</sup>  
Flávio Felipe Kirchner<sup>2</sup>

<sup>1</sup> INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Caixa Postal 515 – CEP 12201-970 - São José dos Campos – SP, Brasil  
vanessa@ltd.inpe.br

<sup>2</sup> UFPR – Universidade Federal do Paraná  
Av. Lothário Meissner , 3400, Jd. Botânico– CEP 80210-170 – Curitiba – PR, Brasil  
kirchner@floresta.ufpr.br

**Abstract.** The main objective was to develop a methodology to estimate nutrient (N, P, K, S Ca and Mg) content in the pristine forest using spectral data from high resolution Ikonos II satellite and field data. Samples for biomass estimates were collected in 20 plots distributed over several growth stages of secondary forest. Nutrient contents in each species were obtained from analysis in a laboratory and total amount in the plots was calculated by multiplying nutrient concentration by dry biomass. Statistical analysis provided the nutrient content and satellite data relation. The reflectance of MS-1, MS-2, MS-3, MS-4 bands and NDVI, SAVI e band ratio were input in the model as independent variables. Nutrients content were the dependent variables. Allometric equations were developed for estimates to entire area. The final results were nutrient mapping.

**Palavras-chave:** remote sensing, predict models, *Araucaria angustifolia*, sensoriamento remoto, modelos de predição, *Araucária angustifolia*.

### 1. Introdução

Os estudos envolvendo quantificação de biomassa de maneira indireta, ou seja, não destrutiva, está em um processo inicial. Em florestas plantadas, o entendimento do ciclo do carbono, nitrogênio e outros nutrientes têm feito com que a exploração florestal inove seus princípios.

Já é sabido que grande parte dos nutrientes presentes em uma árvore se concentra nas folhas, galhos e casca. A quantificação dos nutrientes nestes componentes tem contribuído para que a exploração florestal seja feita de uma maneira mais racional, onde restos de culturas, que antes eram descartados, sejam incorporados ao solo, diminuindo assim a degradação deste e a demanda por fertilizantes. Nas florestas nativas é importante saber quanto dos nutrientes é fixado pelas plantas e qual o ganho que o meio ambiente está tendo com a preservação destes ecossistemas.

Cerri *et.al.* (2001) afirma que os macronutrientes estão presentes principalmente nas partes sólidas do solo. Entre os primários temos o nitrogênio ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ), o fósforo ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) e o potássio ( $\text{K}^+$ ). Já os secundários são o cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), o magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e o enxofre ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). A planta retira nutrientes do ar, da água e do solo. O carbono vem do ar, o hidrogênio vem da água e o oxigênio vem da água e do ar. Os demais elementos vêm do solo, o que o torna de importância vital para as plantas. Ele é o meio em que o homem mais consegue interferir, com adubações e correções de pH (Malavolta, 1979). Estes nutrientes representam mais de 0,1 % da matéria seca das plantas. Estão presentes, em maior ou menor proporção no solo, dependendo da composição e estrutura da rocha em que o solo foi originado, dos resíduos orgânicos presentes no solo, bem como do clima e topografia do terreno.

Esses nutrientes são quantificados a partir de amostras destrutivas no campo. Os dados provenientes dessas amostras são utilizados para determinar equações alométricas que estimam a biomassa para a área como um todo. Parâmetros como diâmetro a altura do peito, altura da árvore, altura da base da copa, entre outros, podem ser utilizados como variáveis do modelo (Miller, 1984; Santos, 1989; Nilsson E Wiklund, 1995).

Modelagens de alguns ciclos, como do carbono e nitrogênio, já são realizadas a partir de medições no campo comparado com dados de imagens de satélite (Lacruz *et al.*, 2001). Técnicas de sensoriamento remoto têm sido utilizadas na área florestal, incluindo trabalhos de quantificação de biomassa e carbono, possibilitando estimar a quantidade de carbono que as florestas estão fixando.

Essas técnicas ainda são pouco empregadas, seja pela heterogeneidade das florestas ou pela dificuldade de aquisição de imagens em certas áreas.

## 2. Sensoriamento Remoto na Estimativa de Biomassa

Zerbini (1992) desenvolveu, na floresta amazônica, uma metodologia para quantificação de fitomassa aérea de floresta tropical a partir de dados espectrais obtidos de imagens TM Landast 5 e HRV-SPOT 1. Foram determinadas as correlações entre variáveis dendrométricas, espectrais, de cota e fitomassa aérea, e, por meio de análise de regressão, as equações de quantificação de biomassa foram geradas.

Um estudo feito em três regiões diferentes (Amazônia-Brasil, Tailândia e Malásia) para estimar biomassa utilizando imagens de satélite foi realizado por Foddy, Boyd E Cutler (2003). A biomassa ( $\text{Ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) em cada amostra foi tomada somando-se a biomassa total acima do solo para os componentes das árvores estimados ( $\text{Kg}$ ) utilizando equações alométricas. Os pixels contendo a unidade amostral foram identificados e a refletância nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do satélite Landsat TM foram extraídas para análise. Por meio de métodos estatísticos e redes neurais chegaram-se aos resultados.

Dong *et al.* (2003) fizeram estimativas de carbono em floresta boreal e temperada utilizando o sensoriamento remoto. A biomassa de carbono foi estimada estatisticamente por modelos de regressão, onde foram estudadas as relações entre a imagem de satélite contendo o índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e conteúdo de carbono na biomassa florestal estimado por meio de inventário. Foram então avaliados a capacidade de modelos de regressão representar a relação entre a biomassa e o NDVI utilizando escalas espacial, temporal e ecológica.

Gaveau, Balzter E Plummer (2003) realizaram um trabalho na Sibéria Central onde classificaram a biomassa de uma floresta com base em imagens de radar. Inventários florestais foram realizados e para cada parcela obtiveram-se dados sobre: categoria de cobertura do solo, estoque relativo de madeira, volume de estoque crescente, idade, composição de espécies, altura média e diâmetro a altura do peito. Estes dados foram extrapolados para a área total. Foram então atribuídas classes de volume para a área e, por meio de um Sistema de Informações Geográficas, foi gerado um mapa de volume por hectare.

Watzlawick (2003) realizou um estudo em reflorestamento de Pinus, Araucária e floresta nativa. Ele desenvolveu uma metodologia para estimar biomassa e carbono utilizando amostras de campo (destrutivas) e dados do satélite IKONOS II. Nas parcelas foram amostrados dados da vegetação arbórea, arbustiva, serapilheira e raízes. Estes dados foram relacionados com as imagens de satélite e foram geradas equações que permitiram estimar biomassa e carbono nas parcelas e extrapolar os dados para a área toda. O produto final foi o mapeamento do carbono para as diversas tipologias florestais estudadas.

## 3. Materiais e Método

A área está localizada na Região Centro Sul do Paraná, entre as coordenadas  $26^{\circ} 20' 35''$  e  $26^{\circ} 26' 13''$  Latitude Sul, e  $51^{\circ} 19' 49''$  e  $51^{\circ} 25' 29''$  Longitude Oeste, com uma altitude média de 1000 m s.n.m. (Paraná, 1987) e a 280 Km de Curitiba, no município de General Carneiro (**Figura 1**), onde está sendo desenvolvido um Projeto Ecológico de Longa Duração (PELD Site 9) “Bioma Floresta de Araucária e suas Transições”, com a implementação de vários trabalhos.



**Figura 1.** Mapa de localização da área de estudo.

### 3.1 Determinação da Biomassa no Campo

Foram locadas 20 parcelas (12 x 12 m) na área de Floresta Ombrófila Mista em diversos estágios sucessionais e nestas parcelas foram abatidos todos os indivíduos com DAP (Diâmetro a Altura do Peito) maior ou igual a 10 cm. Foram separados os componentes: folhas, galhos, fuste, casca e miscelânea, a qual continha frutos, flores, lianas, bromélias, musgos, líquens e orquídeas. Todo o material foi pesado e quantificado e foram determinadas a biomassa verde e a seca (Watzlawick, 2003).

Foram selecionados três exemplares de cada espécie para aquelas com DAP acima de 10 cm (DAP maior, médio e menor) e para aquelas que não tinham mais de três exemplares todas foram utilizadas para a determinação do teor dos nutrientes. Para a casca e o fuste fez-se uma média das duas amostras. Amostras de material separadas por espécie e por componente da árvore foram submetidas a testes de laboratório para a determinação dos teores dos macronutrientes (N, P, K, S, Ca e Mg).

Para cada parcela havia a relação de árvores amostradas e a quantidade de biomassa em cada componente. Os conteúdos de nutrientes foram determinados multiplicando-se a quantidade de matéria seca, por espécie, pelo teor de nutriente. Como havia dados das espécies presentes em cada parcela, foram calculados dos nutrientes médios na parcela. As parcelas foram localizadas na imagem de satélite por meio de coordenadas coletadas por GPS (Global Positioning System) Leica-Topográfico SR-510.

### 3.2 Processamento das Imagens

As principais características técnicas do satélite IKONOS II e de seus produtos estão resumidos no **Quadro 1**. O satélite IKONOS II foi lançado no dia 24 de Setembro de 1999, e está operacional desde o início de janeiro de 2000. Ele gera imagens com 4 m de resolução nas bandas multiespectrais e 1 m na banda Pancromática. A resolução radiométrica das imagens é 11 bits (2048 níveis de cinza), o que possibilita um aumento no poder de contraste e de discriminação das imagens.

**Quadro 1**- Especificações do satélite IKONOS II

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| Altitude                           | 680 km  |
| Inclinação                         | 98,1°   |
| Velocidade                         | 7 km / s  |
| Sentido da Órbita                  | descendente   |
| Duração da Órbita                  | 98 minutos  |
| Tipo de Órbita                     | Sol-síncrona  |
| Resolução Espacial                 | Pancromática: 1m / Multiespectral: 4m   |
| Bandas espectrais                  | Pan 0.45 - 0.90 $\mu$ m<br>(MS-1) Azul 0.45 - 0.52 $\mu$ m<br>(MS-2) Verde 0.52 - 0.60 $\mu$ m<br>(MS-3) Vermelho 0.63 - 0.69 $\mu$ m<br>(MS-4) Infravermelho próximo 0.76 - 0.90 $\mu$ m                                 |
| Imageamento                        | 13km na vertical (cenas de 13km x 13km)   |
| Capacidade de Aquisição de imagens | Faixas de 11km x 100km até 11km x 1000km<br>Mosaicos de até 12.000km <sup>2</sup><br>20.000km <sup>2</sup> de área imageada numa passagem   |
| Frequência de Revisita             | 2.9 dias no modo Pancromático<br>1.5 dias no modo Multiespectral<br>Esses valores valem para latitude de +/- 40°. A frequência de revisita para latitudes maiores será menor, e maior para as latitudes perto do Equador. |

Fonte: <http://www.engesat.com.br/satelites/ikonos.htm>

Para a correção geométrica foram coletados quinze pontos de apoio com o GPS, com uma precisão de aproximadamente 50 cm. A localização de cada ponto é um fator que deve ser considerado, pois o

êxito na correção geométrica da imagem depende da fácil identificação do ponto na imagem e da distribuição destes pontos, que deve ser a mais uniforme possível. Os pontos foram então identificados na imagem de satélite em uma composição colorida utilizando as bandas MS-3, MS-2 e MS-1. O método utilizado para fazer a reamostragem dos pixels foi o vizinho mais próximo. Este método foi escolhido, pois preserva os DN's (*Digital Numbers*) da imagem, não envolvendo médias na reamostragem dos pixels.

Para realizar a correção atmosférica utilizou-se de metodologia denominada de “correção do histograma por seus valores mínimos” (Histogram Minimum Method, HMM). A metodologia assume que as áreas (alvos) com forte absortividade (água e sombras), deveriam apresentar uma radiância espectral muito próxima de zero, mas na prática o histograma dos DN's da imagem sempre apresenta um mínimo superior a zero. Atribuiu-se este valor ao efeito da dispersão da atmosfera. Pela metodologia, deve se estabelecer uma banda de referência, preferencialmente a mais afetada pela dispersão, como a banda na região do azul. (Watzlawick, 2003).

O fator de correção atmosférico para as outras bandas foi calculado utilizando-se a seguinte fórmula:

$$DN_{i,j,k} = DN_{i,j,k} - DN_{min,k}$$

Onde DN (número digital) no pixel (I,j) na banda k ajusta o DN mínimo dessa mesma banda. A conversão dos DN's para radiância leva em consideração os parâmetros de calibração do sensor IKONOS.

$$L_{i,j,k} = DN_{i,j,k} \times [CalCoef_k]$$

Onde:

$L_{i,j,k}$  = valor da radiância do pixel I,j na banda k, em  $mW/cm^2.sr^{-1}$ ;

$CalCoef_k$  = coeficiente de calibração da radiância em  $mW/cm^2.sr^{-1}$ ;

Os coeficientes utilizados para as bandas MS-1, MS-2, MS-3 e MS-4 foram 637, 573, 663 e 503, respectivamente.

A conversão dos valores de radiância para refletância considera parâmetros relacionados com o momento de aquisição da imagem e o posicionamento do sensor (ângulo zenital e horário da coleta da cena) e a distância normalizada terra-sol. Para isso utilizou-se a equação a seguir:

$$R = \frac{\pi \times L \times r^2}{E \times \cos\theta}$$

Onde:

R = refletância (adimensional);

$\pi$  = 3,14159265;

L = radiância em  $mW/cm^2.sr^{-1}$ ;

r = radiância normalizada terra-sol, em unidades astronômicas;

$\theta$  = ângulo zenital solar no centro da imagem, em graus;

E = constante solar, em  $mW/cm^2.sr^{-1}$ .

Após o cálculo dos valores de refletância para as bandas MS-1, MS-2, MS-3 e MS-4 foram determinadas as refletâncias médias nas parcelas cortadas da imagem, ou seja, foi feita uma média dos valores digitais dos 9 pixels (4x4 m) presentes dentro da parcela (12x12 m).

### 3.4 Índices de Vegetação

Foram calculados índices de vegetação a partir das imagens refletância. A fórmula de cada um é apresentada na **Tabela 1**.

**Tabela 1** – Índices de vegetação utilizados

| ÍNDICE | REFERÊNCIA   | FÓRMULA                           |
|--------|--------------|-----------------------------------|
| RVI    | ROUSE (1974) | IVP / V                           |
| NDVI   | ROUSE (1974) | (IVP-V) / (IVP+V)                 |
| SAVI   | HUETE (1988) | (IVP-V) / (IVP + V + L) * (1 + L) |

Onde: V=Refletância no vermelho; IVP=Refletância no Infravermelho Próximo e L=Constante para minimizar a influência do solo.

No SAVI o valor de L faz com que os valores de brilho do solo exerçam uma influência menor na resposta espectral da vegetação e varia de 0 a 1, dependendo da densidade da vegetação. Portanto, locais com vegetação mais densa L=0,25 e mais rala ou mais aberta L=1. O valor L=0,5 cabe a maioria dos tipos vegetacionais associadas a uma grande variedade de solos.

### 3.5 Análises Estatísticas

Foram gerados modelos para que se pudesse fazer a estimativa dos nutrientes para a área toda. Os dados provenientes das imagens de satélite, ou seja, os valores de reflectância médio nas parcelas nas bandas do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, e nos índices de vegetação, entraram no modelo como variáveis independentes. Os dados obtidos em campo, conteúdo de macronutriente médio por parcela, foram estipulados como variáveis dependentes. A equação proposta para ajustar o modelo é uma equação linear do tipo:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5 + b_5X_5 + b_6X_6 + b_7X_7$$

A partir da matriz de correlação foram verificadas quais variáveis tinham a maior correlação com a variável dependente, no caso o nutriente. Utilizou-se o método de eliminação de variáveis *Stepwise* (passo a passo), onde foram selecionadas somente as variáveis que mais contribuíam para o modelo proposto.

Com a utilização destes modelos foi possível o mapeamento de cada macronutriente para a Floresta Ombrófila Mista na área de estudo.

## 4. Resultados e Discussão

Os cálculos dos conteúdos de macronutrientes na biomassa são apresentados na **Tabela 2**. Nota-se que os maiores valores de nutrientes estão presentes nas folhas, com exceção do cálcio que, pela sua imobilidade na planta, se acumula na casca das árvores

**Tabela 2.** Conteúdos médios dos macronutrientes (Ton.ha<sup>-1</sup>) na biomassa das espécies com DAP ≥ 10 cm da floresta ombrófila mista

|            | Madeira | Casca   | Galhos | Folhas  | Miscelânea |
|------------|---------|---------|--------|---------|------------|
| Nitrogênio | 3,2023  | 8,0786  | 6,4640 | 21,8977 | 14,6530    |
| Enxofre    | 0,8503  | 1,3252  | 1,0253 | 2,0124  | 2,0835     |
| Fósforo    | 0,3457  | 0,3992  | 0,5262 | 1,3758  | 1,0847     |
| Potássio   | 6,0895  | 6,7137  | 7,1478 | 10,2991 | 7,9044     |
| Cálcio     | 2,4104  | 19,0858 | 7,1391 | 9,2631  | 7,4575     |
| Magnésio   | 1,0209  | 1,5039  | 1,1860 | 3,2835  | 1,7815     |

Após as variáveis dependentes e independentes terem sido correlacionadas, constataram-se os baixos valores quando foram utilizados os conteúdos de nutrientes em todos os componentes das árvores somados. Fez-se um teste utilizando somente o conteúdo dos nutrientes nas folhas, resultando em um aumento nas correlações entre as variáveis. Este fato pode estar relacionado às limitações do sensor IKONOS, o qual recebe informações (reflectância) do dossel florestal, havendo baixíssima

contribuição dos demais componentes, como casca e fuste. As equações geradas com as respectivas variáveis de maiores contribuições são apresentadas na **Tabela 3**.

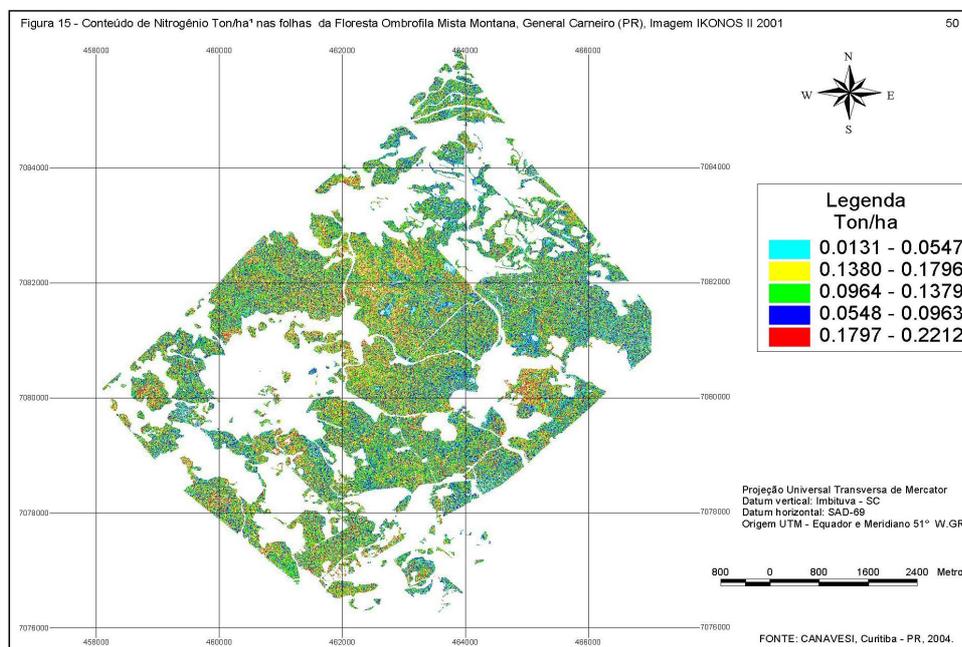
**Tabela 3.** Equações ajustadas para cada nutriente.

| Nutriente | Equação Ajustada                                     | R <sup>2</sup><br>Ajustado | Erro<br>Padrão % | F      | Probabilidade% |
|-----------|--|----------------------------|------------------|--------|----------------|
| N         | $N = 0,986890 - 27,721770 * BLUE - 0,029637 * RAZÃO$ | 0,5256                     | 6,4718           | 11,5** | 0,068%         |
| S         | $S = 0,093182 - 1,84144 * BLUE - 0,09988 * SAVI$     | 0,4559                     | 0,6886           | 8,96** | 0,2189         |
| P         | $P = 0,156168 - 2,137157 * BLUE - 0,128161 * NDVI$   | 0,3996                     | 0,6031           | 7,32** | 0,5082         |
| K         | $K = 1,143371 - 16,2131 * BLUE - 0,92311 * NDVI$     | 0,4162                     | 4,4902           | 7,77** | 0,4001         |
| Ca        | $Ca = 1,915491 - 24,1921 * BLUE - 1,66845 * NDVI$    | 0,3133                     | 7,800            | 5,33** | 1,5911         |
| Mg        | $Mg = 0,081677 - 3,02089 * BLUE$                     | 0,2302                     | 1,7971           | 6,68** | 1,8663         |

\*\* F significativo

Onde: Blue = reflectância na banda do azul, RAZÃO, SAVI e NDVI = índices de vegetação em valores de reflectância.

Estas equações foram aplicadas nas imagens de satélite por meio do software ENVI 3.2 e foram geradas imagens para cada macronutriente, onde cada pixel armazenava o conteúdo de nutriente. Para uma melhor visualização da distribuição dos macronutrientes foram atribuídas classes para os diferentes conteúdos de nutrientes (**Figura 2**).



**Figura 2.** Conteúdo de Nitrogênio, Toneladas/ha, nas folhas da Floresta Ombrófila Mista em General Carneiro – PR.

## 5. Conclusões

Este trabalho mostra a possibilidade de se trabalhar com estimativa de nutrientes utilizando dados de campo (parcelas destrutivas) e dados provenientes de imagem de satélite de alta resolução. Os maiores coeficientes de correlação para os modelos gerados foram: N (0,52) seguido pelo S (0,45), P (0,39), K (0,41), Ca (0,31) e Mg (0,23).

A Floresta Ombrófila Mista, assim como a maioria das florestas nativas, apresenta uma alta diversidade. Como a área trabalhada contemplava vários estágios sucessionais, um aumento do número de parcelas em cada estágio possibilitaria que os dados de biomassa, e conseqüentemente os conteúdos de nutrientes, fossem agrupados em classes, diminuindo assim a discrepância entre eles.

Para que se possa fazer o mapeamento de nutrientes utilizando todos os componentes das árvores necessita-se desenvolver uma metodologia de amostragem, onde as copas das árvores são dimensionadas e relacionadas com os demais componentes, como fuste, casca e galhos.

Salienta-se a importância de tais quantificações para florestas nativas, das quais se têm poucas informações, visto a quantidade de ecossistemas existentes bem como a alta diversidade dentro de cada um;

## 5. Referências

- Cerri, C.C., Chaplot, V., Cerri, C.E.P. **Ciclagem de nutrientes e sustentabilidade agrícola**. Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA). Universidade de São Paulo. 2001.
- Foddy, G.M., Boyd, D.S. E Cutler, M.E.J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. **Remote Sensing of Environment**. n. 85, p. 463-474, 2003.
- Dong, J., Kaufmann, R.K., Myneni, R.B., Tucker, C.J., Kauppi, P.E., Liski, J., Buermann, W., Alexeyev, V. E Hughes, M.K. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest wood biomass: carbon pools, sources, and sinks. **Remote Sensing of Environment**. n. 84, p 393-410, 2003.
- Gaveau, D.L.A., Balzter, H. E Plummer, S. Forest wood biomass classification with satellite-based radar coherence over 900.000 Km<sup>2</sup> in Central Siberia. **Forest Ecology and Management**. n. 174, p 65-75. 2003.
- Lacruz, P.M.S.; Shimabukuro, Y.E.; Williams, M.; Renó, C.D.; Herbert, D.; Rastetter, E.B. Utilização do sensoriamento remoto e dados de campo para modelagem das atividades biogeoquímicas na Floresta Nacional de Tapajós. In: Simposio brasileiro de sensoriamento remoto, 10, 2001. Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos:INPE, 2001. Sessão Pôster. p. 1699-1701.
- Malavolta, E. Absorção e transporte de íons. In: Ferri, M.G. (Coord.). **Fisiologia Vegetal**, São Paulo: EPU: Ed. da Universidade de São Paulo. v. 1, p. 77-98. 1979. 350 p.
- Miller, H.G. Dynamics of Nutrient Cycling in Plantation Ecosystems. In: BOWEN, G.D., NAMBIAR, E.K.S. **Nutrition of Plantation Forests**. Academic Press. London. p. 53-78. 1984. 516 p.
- Nilsson, L. E Wiklund, K. Nutrient balance and P, K, Ca, Mg, S and B accumulation in a Norway spruce stand following ammonium sulphate application, irrigation, drought an N-free-fertilization. In: Nilsson, L.O., Hüttl, R.F. E Johansson, U.T. (Ed.) **Nutrient uptake and cycling in forest ecosystems**. USA: Kluwer academic publishers, 1995, 685 p.
- PARANÁ, Secretaria do Estado de Agricultura e Abastecimento, Instituto de Terras, Cartografia e Florestas. **Atlas do Estado do Paraná**. Curitiba, 1987. 73 p.
- Santos, V.D. Ciclagem de nutrientes minerais em mata tropical subcaducifólia dos planaltos do Paraná (Parque Estadual Vila Rica do Espírito Santo – Fênix/PR). 1989. 387 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos. 1989.
- Watzlawick, L.F. Análise e estimativa de biomassa e carbono em floresta ombrófila mista e plantações florestais a partir de dados do satélite IKONOS II. 2003. 119 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) \_ Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2003.
- Zerbini, N.J. Estimativa de fitomassa aérea em região de floresta tropical com uso de dados de TM-Landsat 5 e HRV-SPOT 1. 1992. 127 p. (INPE-5500-TDI/515). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 1992.