

ESTIMATIVA DE BIOMASSA E CARBONO EM FLORESTA COM ARAUCARIA UTILIZANDO IMAGENS DO SATÉLITE IKONOS II

CARBON AND BIOMASS ESTIMATE IN ARAUCARIAN FOREST USING SATELLITE IMAGES FROM IKONOS II

Luciano Farinha Watzlawick¹ Flávio Felipe Kirchner² Carlos Roberto Sanquetta³

RESUMO

A implicação da redução das florestas no ciclo do carbono vem criando uma demanda de desenvolvimento de métodos não destrutivos para a determinação de biomassa, elemento importante na modelagem dos ciclos biogeoquímicos. Apresenta-se resultados de teste de metodologia utilizando-se imagens do satélite IKONOS II para estimar biomassa e carbono orgânico em Floresta com Araucária. O desenvolvimento metodológico englobou análise estatística (matriz de correlação) das bandas e índices de vegetação com os dados de biomassa e carbono orgânico, o ajuste e seleção de equações para estimar a biomassa e o carbono orgânico (variáveis dependentes) em função de variáveis provenientes das imagens de satélite, sendo a refletância das bandas MS-1, MS-2, MS-3, MS-4, Razão de Bandas (MS-4/MS-3), NDVI e SAVI (variáveis independentes), e a quantificação das variáveis dependentes para toda a área de estudo. A utilização de imagens provenientes do satélite IKONOS II apresentou resultados bastante satisfatório, necessitando, no entanto, que modelos matemáticos sejam ajustados de modo a obterem-se melhores resultados.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; imagens de alta resolução espacial; Floresta Ombrófila Mista; Floresta Subtropical.

ABSTRACT

The implications of forest reduction in the carbon cycle have created a demand for development of non-destructive methods to biomass estimates, a key component for modeling biogeochemical. Results from the application of a new methodology using satellite images from IKONOS II to estimate biomass and organic carbon in Araucarian Forest are present. The methodology included statistical analysis (correlation analysis) of the bands and vegetation indices with the biomass and organic carbon data as well as adjustments and selections of equations to estimate the biomass and organic carbon (dependent variables) in function of data from the satellite images. The reflectance of the MS-1, MS-2, MS-3, MS-4 bands, the ratio among bands (MS-4/MS-3), NDVI and SAVI were used as independent variables. The use of satellites images from IKONOS II presented satisfactory results, although it still needs adjustment from mathematical models for better results.

Keywords: remote sensing; high resolution images; Mixed Ombrophilous Forest; Sub-Tropical Forest.

INTRODUÇÃO

Estudos realizados em 1988 pela Sociedade Americana para o Progresso da Ciência fazem uma previsão sobre as mudanças ocasionadas pelo aumento dos gases como o CO₂, CH₄, NO₂ e os clorofluorcarbonos (CFCs), chamados gases do efeito estufa, os quais podem provocar um aquecimento global, com as temperaturas aumentando dentro de 30 a 90 anos de até 5°C, provocando profundas mudanças não somente climáticas, mas também ecológicas, econômicas e sociais.

Para Renner (2004), a partir da década de 70, o aumento crescente da queima de combustíveis fósseis e as mudanças de uso da terra em razão das queimadas realizadas como práticas convencionais na agricultura ou pelo corte de florestas têm provocado a liberação de grande quantidade de carbono da biosfera para a atmosfera. O acúmulo de carbono oriundo da queima de combustíveis ou de queimadas da vegetação é um dos principais responsáveis pelo aumento da temperatura da terra, e tem por consequência um aumento do

1. Engenheiro Florestal, Dr., Professor Adjunto Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Centro-Oeste, BR 153, Km 7, Bairro Riozinho, CEP 84500-000, Irati (PR). farinha@irati.unicentro.br
2. Engenheiro Florestal, Dr., Professor Adjunto do Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal do Paraná, Av. Lothário Meissner, 3400, CEP 80230-091, Curitiba (PR). kirchner@floresta.ufpr.br
3. Engenheiro Florestal, Dr., Professor Adjunto do Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal do Paraná, Av. Lothário Meissner, 3400, CEP 80230-091, Curitiba (PR). sanqueta@floresta.ufpr.br

Recebido para publicação em 10/11/2005 e aceito em 15/05/2009.

nível dos mares e uma variação dos eventos climáticos.

Na natureza os ciclos do carbono e oxigênio são fundamentais na transformação das substâncias orgânicas que constituem a biosfera. Na primeira etapa, ocorre a fotossíntese em que as partes verdes das plantas absorvem o dióxido de carbono atmosférico e o fazem reagir com a água, servindo-se da luz solar e da presença da clorofila. Formam-se assim os compostos de carbono, os quais vão constituir a estrutura vegetal, ocorrendo conseqüentemente a liberação do oxigênio. O gás que é liberado para o ar é utilizado na respiração, registrando-se assim um processo inverso, ou seja, o oxigênio é captado e o dióxido de carbono liberado, encerrando-se assim o ciclo (TAIZ e ZEIGER, 2004)

Segundo Renner (2004), pesquisas têm demonstrado que as florestas são verdadeiros sumidouros de carbono, pois, por meio do processo fotossintético acoplado à produção de celulose durante o crescimento e manutenção das plantas, as florestas acumulam carbono.

Para Watzlawick *et al.* (2006), na biomassa da floresta, os compostos de carbono constituem grande parte desta, sendo necessário desenvolver estudos quanto a métodos de quantificação nos diversos componentes da planta, possibilitando assim entender melhor o “sequestro” e o “armazenamento” de carbono da atmosfera pelas florestas.

Os estudos de quantificação de biomassa são trabalhosos, demorados e muito onerosos, podendo serem realizados por meio de métodos diretos e indiretos. Pelo método direto, as árvores são cortadas e seus componentes separados e pesados, e pelo método indireto são utilizadas equações alométricas ou utilização de técnicas de sensoriamento remoto para realizar as estimativas.

Com os atuais avanços tecnológicos com relação às imagens provenientes de sensores remotos nos últimos anos, e também com os desenvolvimentos relacionados aos avanços no processamento das imagens, têm-se obtido uma melhor caracterização da estrutura das florestas e, conseqüentemente de sua biomassa e carbono estocado. O fundamento é associar o conteúdo de biomassa e carbono aos dados de radiância/reflectância provenientes de imagens de satélite para obter melhor estimativas.

Podem-se relacionar estudos realizados recentemente na linha de pesquisas integrando métodos destrutivos e não destrutivos para a estimativa de biomassa desenvolvidos por Watzlawick (2003), utilizando imagens do satélite IKONOS II para estimativas de biomassa e carbono em plantações de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda*, bem como em Floresta com Araucária; Schoeninger (2006), desenvolveu estudo com imagens do satélite IKONOS II e o uso de redes neurais artificiais para o mapeamento de biomassa e carbono orgânico no componente arbóreo de uma floresta Ombrófila densa; Dalla Corte e Sanquetta (2007) estudo relacionado a quantificação do estoque de carbono fixado em reflorestamentos de *Pinus* utilizando imagens dos satélites CBERS e LANDSAT 5; Bitencourt *et al.* (2007) trabalharam com imagens do JERS-1 para realizar análises de biomassa no cerrado; Santos *et al.* (2003) realizaram estudo de quantificação de biomassa em floresta tropical utilizando Radar aerotransportado; Santos *et al.* (2006) com estudos da biomassa de floresta tropical e sua relação com dados de Radar de abertura sintética (SAR) em banda P; Quinones e Hoekman (2004) realizam estudo dos fatores limitantes para as estimativas de biomassa utilizando Radar polarimétrico. Além desses estudos, outros pesquisadores vêm dedicando-se em pesquisas para estimar biomassa e carbono por métodos indiretos, sobretudo correlacionando dados de campo com imagens orbitais.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo realizar teste de metodologia utilizando imagens do satélite IKONOS II no sentido de otimizar a estimativa de biomassa e carbono orgânico na Floresta com Araucária.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

A área de estudo, corresponde à remanescente de Floresta com Araucária ou Floresta Ombrófila Mista Montana (IBGE, 1992). Montana em razão do patamar altitudinal em que a área de estudo se encontra. Localiza-se no município de General Carneiro, Paraná, conforme Figura 1, com altitude média de 1055 m. A fazenda possui uma área total de 4.210,75 ha, sendo que destes 1.790,60 ha de Floresta Ombrófila Mista com plano de manejo em regime sustentado e 890,35 ha em áreas de preservação permanente ou reserva legal, as quais totalizam 2.680,95 ha. No presente estudo, foram utilizadas as áreas da Floresta Ombrófila Mista que

se encontram com plano de manejo, as quais estão nos estágios de sucessão intermediário e avançado, classificadas na Figura 1 como capoeirão e floresta secundária avançada.

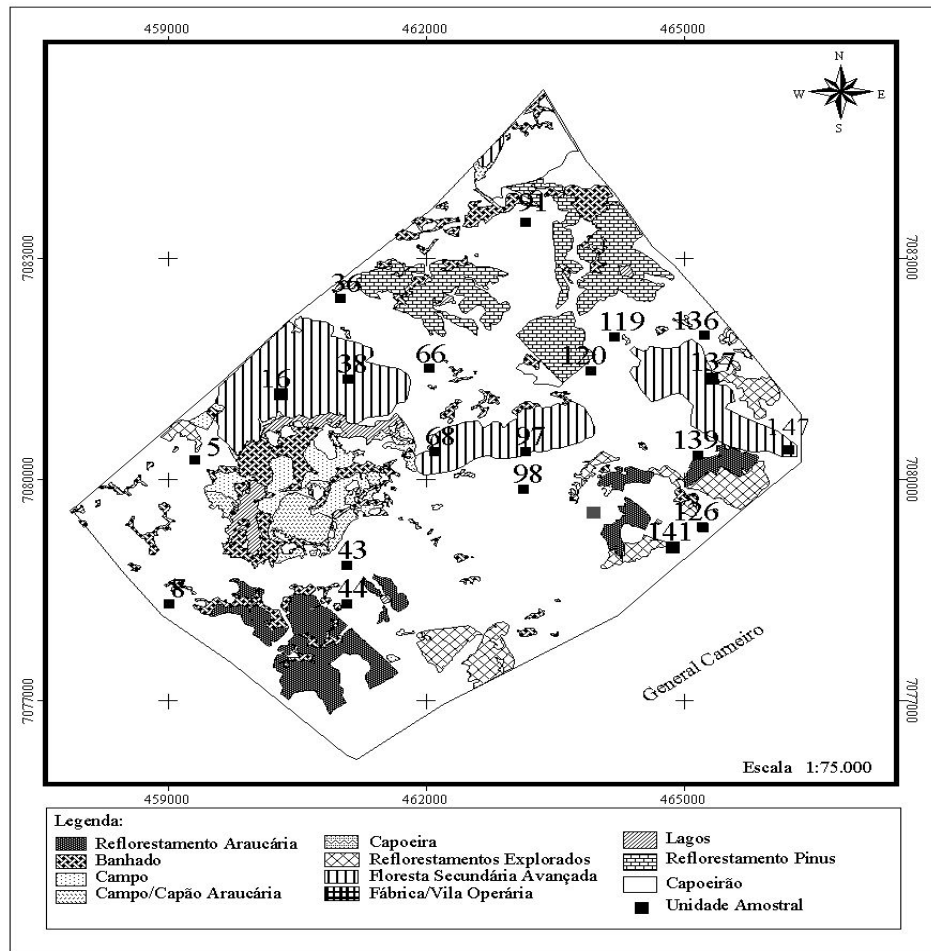


FIGURA 1: Área de estudo e localização das unidades amostrais, General Carneiro, Paraná.

FIGURE 1: Study area and sampling units location, General Carneiro, Paraná.

O clima da região de estudo, conforme classificação de Köppen é caracterizado como Subtropical Úmido Mesotérmico (Cfb), tendo os verões frescos e os invernos com a ocorrência de severas geadas, não possui estações secas. As médias das temperaturas dos meses mais quentes é inferior a 22°C e a dos meses mais frios superiores a 18°C (PARANÁ, 1987).

Conforme BOLETIM DE PESQUISA (1984), o substrato geológico da região de estudo é formado pelo derrame de Trapp da formação da Serra Geral. Os solos são orgânicos e hidromórficos, com o predomínio de Neossolos Litólicos, Cambissolos e Argissolos (PARANÁ, 1987). As características topográficas dividem-se em plano, ondulada e montanhosa, sendo a última de maior predominância (EMBRAPA, 1999).

Metodologia

Antes da realização dos trabalhos utilizando a imagem, foi realizada a quantificação da biomassa arbórea e o carbono orgânico arbóreo utilizando-se o método destrutivo. A quantificação utilizando o método destrutivo foi realizada por Watzlawick (2003), com a instalação de 20 unidades amostrais com as dimensões de 12 x 12 m. Nessas unidades amostrais todas as árvores foram abatidas, medidos os parâmetros dendrométricos, pesada a sua biomassa e amostrada. No laboratório, estes foram secos em estufa de renovação e circulação de ar a uma temperatura constante de 75°C até atingir o peso constante, para posterior determinação de peso seco e preparação para análise química do teor de carbono orgânico.

Informações do sensor e da imagem

No contexto deste trabalho, foi utilizada imagem com resolução espacial de 4 metros, adquirida em 10 de dezembro de 2000 (13:22 horas) nas bandas MS-1 (Blue), MS-2 (Green), MS-3 (Red) e MS-4 (VNIR). A resolução espectral do IKONOS II pode ser visualizada na Tabela 1, conforme informações descritas no documento n. SE-REF-016 (IKONOS Relative Spectral Response and Radiometric Calibration Coefficients) (PETERSON *et al.*, 2000).

TABELA 1: Características espectrais das bandas do satélite IKONOS II.

TABLE 1: Spectral characteristics of bands of IKONOS II satellite's.

Banda Espectral	Mínimo 50% (nm)	Máximo 50% (nm)	Amplitude (nm)	Média (nm)
MS-1 (Blue)	444,7	516,0	71,3	480,3
MS-2 (Green)	506,4	595,0	88,6	550,7
MS-3 (Red)	631,9	697,7	65,8	664,8
MS-4 (VNIR)	757,3	852,7	95,4	805,0

Fonte: Peterson *et al.* (2000).

Correção geométrica da imagem

Foram coletados no campo 15 pontos de apoio com GPS Leica – topográfico SR-510, com precisão de aproximadamente 50 cm. Para a aquisição dos pontos de apoio, observou-se para que estes estivessem bem distribuídos por toda a imagem, levando-se também em consideração para que os pontos fossem de fácil reconhecimento no campo e na imagem.

A correção propriamente dita foi realizada utilizando-se 11 pontos de apoio e o método do vizinho mais próximo, com polinômio de transformação de 1º grau, nas bandas MS-1, MS-2, MS-3 e MS-4. Utilizou-se esse método para melhor preservar o valor original do DN (número digital), em razão de não envolver médias no processo. Os quatro pontos de apoio restantes foram utilizados para efeito de verificação da correção da imagem.

Conversão dos números digitais para radiância/reflectância

Para a correção atmosférica nas imagens, utilizou-se de metodologia idealizada por Chavez (1988;1989) *apud* Chuvieco (1990), denominada de correção do histograma por seus valores mínimos (Histogram Minimum Method, HMM).

A técnica assume que as áreas (alvos) com forte absortividade (água, sombras), deveriam apresentar uma radiância espectral muito próxima de zero, mas, na prática, o histograma dos DN's da imagem sempre apresentam um valor mínimo superior a zero, atribuiu-se esse valor ao efeito da dispersão da atmosfera. Foi estabelecido como banda de referência a azul (MS-1) em razão de ela ser a mais afetada pela dispersão, possuindo valor mínimo. Calculou-se um fator de correção atmosférica para as demais bandas utilizando-se a seguinte formulação:

$$ND_{i,j,k}' = ND_{i,j,k} - ND_{\min,k}$$

Em que o ND do pixel (i,j) na banda k se ajusta ao ND mínimo dessa mesma banda.

A conversão dos DN 's para radiância, foi realizada levando-se em consideração os parâmetros de calibração do IKONOS II (Tabela 2) e utilizando-se a seguinte equação:

$$L_{i,j,k} = DN_{i,j,k} \times [CalCoef_k]^{-1}$$

Em que: i,j,k = pixel i,j na banda k da imagem; $L_{i,j,k}$ = valor da radiância $mW/cm^2 \times sr^{-1}$; $CalCoef_k$ = coeficiente de calibração da radiância na banda em $mW/cm^2 \times sr^{-1}$; $DN_{i,j,k}$ = valor do número digital (DN).

TABELA 2: Coeficientes de calibração radiométrica do satélite IKONOS II.
 TABLE 2: Radiometric calibration coefficients of IKONOS II satellite's.

Banda Espectral	Coefficiente de Calibração
MS-1 (Blue)	637
MS-2 (Green)	573
MS-3 (Red)	663
MS-4 (VNIR)	503

Fonte: Peterson *et al.* (2000).

Para a realização da conversão dos valores de radiância para valores de reflectância, consideram-se parâmetros relacionados ao momento da aquisição da imagem. A equação utilizada para realizar as conversões foi obtida em comunicações pessoais com Rodrigues (2001), a qual se encontra abaixo:

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

Em que: R = reflectância, adimensional; $PI = 3,14159265$; L = radiância, em $\text{mW}/\text{cm}^2 \times \text{sr}^{-1}$; r = distância normalizada terra-sol, em unidades astronômicas; θ = ângulo zenital solar no centro da imagem, em graus; E = constante solar, em mW/cm^2 .

Geração das imagens índice de vegetação

No presente estudo, foram utilizados três índices de vegetação conforme descritos a seguir. Um dos primeiros índices de vegetação foi realizado por Pearson e Miller (1972) partindo de medidas radiométricas realizadas em algumas espécies no laboratório e no campo, gerando o índice da "Razão Simples", definido como:

$$R = \frac{NIR}{R}$$

Em função da sua extensa aplicabilidade nos estudos de monitoramento da vegetação, o NDVI "Normalized Difference Vegetation Index", Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, foi proposto por Rouse *et al.* (1973), sendo obtido pela seguinte equação:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Huete (1988) visando a amenizar o efeito de solo, criou o Índice de Vegetação Ajustado para o Solo, SAVI "Soil Adjusted Vegetation Index", conforme apresentado abaixo:

$$SAVI = \left(\frac{NIR - R}{NIR + R + L} \right) \cdot (1 + L)$$

Em que: NIR = reflectância na banda referente ao infravermelho próximo, adimensional; R = reflectância na banda referente ao vermelho, adimensional; L = fator de correção para o solo, adimensional.

O valor da constante L foi introduzida no sentido de diminuir a influência do brilho do solo e produzir isolinhas de vegetação mais independentes do solo, o valor varia de 0 a 1, dependendo do grau de cobertura no solo. No presente estudo, utilizou-se o valor da constante $L = 0,50$, em razão desta ser ideal, pelo conhecimento da área em questão, a qual possui uma vegetação intermediária.

Obtenção dos valores de reflectância nas imagens

Em cada uma das unidades amostrais realizadas, foi obtida coordenada do centro desta com o auxílio do GPS topográfico SR-510. Utilizando as coordenadas das unidades amostrais, procedeu-se à realização de corte na imagem em função do tamanho da unidade amostral (12 x 12 m). Dessas imagens foram retirados os valores médios de reflectância dos 9 pixels (Figura 2), os quais foram utilizados para estabelecer a relação entre os dados provenientes de biomassa e carbono com os da imagem. O procedimento descrito foi realizado para as imagens nas bandas MS-1, MS-2, MS-3 e MS-4, bem como para os índices: Razão, NDVI e SAVI.

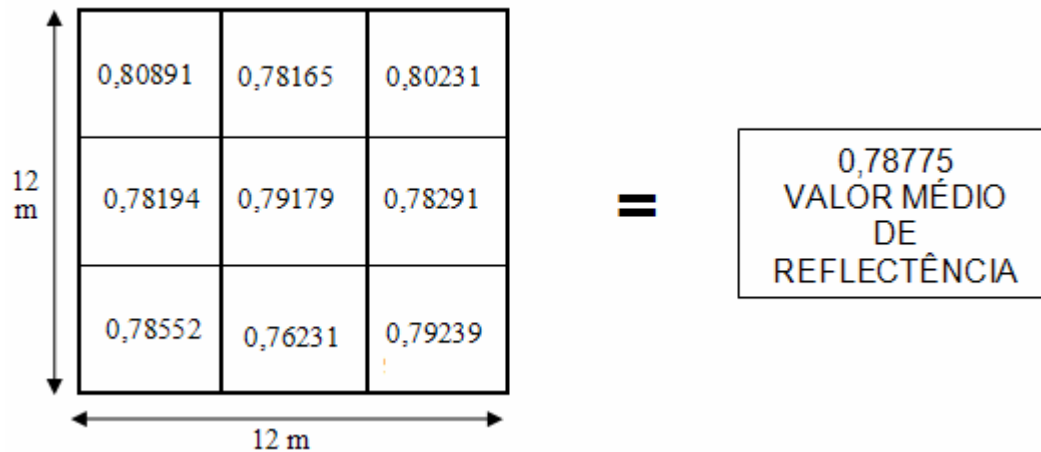


FIGURA 2: Representação de uma unidade amostral com os respectivos valores de refletância para o índice NDVI.

FIGURE 2: Representing a sampling unit with the respective values of the reflectance index NDVI.

Tratamento estatístico dos dados

O tratamento estatístico dos dados foi realizado inicialmente com a análise da correlação entre as variáveis consideradas, sendo as variáveis biométricas a biomassa arbórea e carbono orgânico arbóreo, as variáveis digitais as refletâncias nas bandas: MS-1, MS-2, MS-3 e MS-4, e refletâncias das imagens geradas pelos índices: Razão, NDVI e SAVI.

Para determinar quais os dados provenientes das imagens de sensoriamento remoto que melhor estimam a biomassa arbórea e o carbono orgânico arbóreo fixado, utilizou-se análise de regressão.

Os dados de biomassa arbórea e o carbono orgânico arbóreo foram considerados variáveis dependentes e os valores provenientes das imagens de sensoriamento remoto, considerados variáveis independentes. Para a análise envolvendo todos dados provenientes das imagens que melhor estimem os valores das variáveis dependentes, utilizou-se o procedimento de análise de regressão múltipla, empregando-se, para tanto, o modelo de regressão *Stepwise*. Em todas as análises de regressão realizadas, visando a julgar qual a melhor equação que estima adequadamente as variáveis em campo, foram realizadas análises do coeficiente de determinação ajustado, erro-padrão da estimativa e distribuição de resíduos.

Quantificação dos resultados

As equações ajustadas e selecionadas com seus respectivos coeficientes foram aplicadas as variáveis selecionadas (imagens ou imagens índice), obtendo-se como resultados as quantidades de biomassa e carbono orgânico. Procedeu-se também à realização de intervalos de classe fixos tanto para a biomassa como para o carbono, levando em consideração a quantificação obtida diretamente no campo (método destrutivo).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Correção geométrica da imagem

A correção geométrica foi realizada com o método do vizinho mais próximo, com polinômio de transformação de 1º grau (Transformação Afim no Plano), utilizando 11 pontos de controle os quais geraram um RMS (erro médio quadrático) de 0,99 m. Ao utilizar os quatro pontos para verificar a correção da imagem, todos os pontos apresentaram erros inferiores a 1 pixel (4 metros). Com os resultados obtidos tanto na correção geométrica como na verificação desta podem ser considerados como satisfatórios para a realização do trabalho.

Análise estatística

As variáveis dependentes apresentam as maiores correlações negativas com as variáveis espectrais MS-4, RAZÃO de bandas, NDVI e SAVI. A variável espectral MS-3 possui um grau de correlação médio tanto para a biomassa como para o carbono, já as variáveis MS-1 e MS-2 apresentaram baixas correlações (Tabela 3). As maiores correlações estão associadas a faixas que registram no comprimento de onda do

infravermelho (MS-4) e vermelho (MS-3), bem como aos índices que utilizam esta relação.

Na região que compreende os comprimentos de onda do infravermelho próximo (0,7 μm a 1,3 μm), existe uma pequena absorção da radiação, conseqüentemente temos uma região de alta reflectância da vegetação, resultado da interação da energia incidente com a estrutura do mesófilo (estrutura celular). Isso ocorre, pois a infiltração de água diminui os espaços vazios, diminuindo o espalhamento da energia incidente e aumentando a transmitância. A absorção pela água geralmente é baixa. Já na região do vermelho (0,6 a 0,7 μm) corresponde a máxima absorção (0,67 a 0,68 μm), em que apenas a clorofila absorve a radiação eletromagnética.

As baixas correlações com as variáveis MS-1 (azul) e MS-2 (verde), podem ser explicadas por causa do comportamento espectral da vegetação na região ao azul (0,4 a 0,5 μm), ocorre a absorção por todos os pigmentos, tendo-se assim valores muito baixos de reflectância nesta faixa espectral. Absorção menor ainda ocorre na região do verde (0,5 a 0,6 μm) ocasionando um pico de reflectância em 0,55 μm , em consequência da coloração esverdeada da maioria das folhas.

TABELA 3: Matriz de correlação entre variáveis dendrométricas e variáveis digitais na floresta ombrófila mista.

TABLE 3: Correlation matrix between dendrometrics and digital changeable in mixed ombrophilous forest.

	BIO	CARB	MS-1	MS-2	MS-3	MS-4	RAZÃO	NDVI
MS-1	- 0,27	- 0,31						
MS-2	- 0,36	- 0,31	0,03					
MS-3	- 0,58	- 0,60	0,18	0,47				
MS-4	- 0,80	- 0,79	0,38	0,46	0,56			
RAZÃO	- 0,71	- 0,69	0,05	0,39	0,47	0,76		
NDVI	- 0,74	- 0,73	0,37	0,53	0,56	0,75	0,84	
SAVI	- 0,77	- 0,77	0,35	0,33	0,45	0,82	0,57	0,65

Os resultados obtidos para a variável biomassa arbórea (BIO) são semelhantes aos encontrados para o carbono orgânico arbóreo (CARB) o que era de se esperar em razão das duas variáveis apresentarem uma alta relação, como pode ser demonstrado em alguns trabalhos de quantificação do carbono orgânico na biomassa, é adotado o fator 0,45 (BUTKIN, SIMPSON e NISBET, 1993) ou 0,5 (DEWAR e CANNELL, 1992), para converter massa seca em carbono.

Os índices de vegetação testados (RAZÃO, NDVI e SAVI) apresentaram alta correlação a qual é justificada em função de sua composição às bandas espectrais na região do espectro eletromagnético referente ao vermelho (MS-3) e a região do infravermelho (MS-4), sendo respectivamente uma região de forte absorção e de máxima reflectância. É importante ressaltar que a região espectral referente ao verde (MS-2) também é uma região de reflectância, porém baixa.

As respostas espectrais da vegetação tanto na região referente ao vermelho, quanto do infravermelho, são variáveis. Na região do vermelho a resposta espectral depende da quantidade e do tipo de pigmentos (clorofila 65%, carotenos 6% e xantoninas 29%), já na região do infravermelho depende de interação da energia incidente com a estrutura celular (mesófilo) e a quantidade de água na folha. Moraes (1996) afirma que fatores externos à folha podem causar alterações na relação água-ar no mesófilo, podendo alterar a reflectância nessa região. Conforme Lillesand e Kiefer (1994), florestas com espécies folhosas possuem maior reflectância tanto na região do infravermelho como do vermelho, do que florestas com espécies de coníferas, em função das folhosas apresentarem uma maior variabilidade de pigmentos e estruturas celulares.

Pode-se verificar que a maior correlação é verificada com relação à variável MS-4 (infravermelho próximo no espectro eletromagnético), possuindo valores de correlação de -0,80 com relação à variável biomassa arbórea, já a variável correspondente ao carbono orgânico arbóreo apresenta uma correlação de -0,79. Resultados encontrados no presente estudo são muito similares aos encontrados por Bernardes (1998), o qual encontrou correlações altas e negativas do índice de vegetação SAVI com biomassa (-0,82); Maciel (2002) observou altas correlações negativas do índice com a biomassa (-0,83), porém deve-se ressaltar que os trabalhos dos pesquisadores foram realizados em floresta primária na Amazônia e com imagens do satélite Landsat. Matos (2006) realizou trabalho de estimativa de biomassa e carbono em Floresta Ombrófila Densa

de terra firme na Amazônia Central utilizando o satélite IKONOS II, sendo que a autora encontrou as maiores correlações com a banda 4 e com o índice NDVI, ressalta-se que as correlações foram negativas.

Analisando-se que a banda 4 do satélite IKONOS II tem amplitude similar à do ao sensor TM, era de se esperar que os parâmetros biofísicos da vegetação também apresentassem comportamento espectral inverso em suas quantificações.

Ajuste e seleção de equações de biomassa e carbono orgânico arbóreo

Os modelos n. 1 e 2 mostraram melhores ajustes, com coeficientes de determinação superiores a 0,70 e menores valores do erro-padrão da estimativa (Tabelas 4 e 5). Sem mostrar uma diferença significativa entre os modelos, pode-se considerar que as equações n. 2 (utilizando o método *stepwise*), foram as melhores. A escolha levou em consideração estatística usualmente empregada: como o coeficiente de determinação superior e erro-padrão da estimativa inferior ser levemente melhores nos ajustes dos dados, bem como apresentaram uma melhor distribuição dos resíduos.

TABELA 4: Modelos de regressão testados e ajustados para estimar a variável biomassa arbórea ($BIO = \beta_0 + \beta_1(MS-1) + \beta_2(MS-2) + \beta_3(MS-3) + \beta_4(MS-4) + \beta_5(RAZÃO) + \beta_6(NDVI) + \beta_7(SAVI)$) na floresta ombrófila mista.

TABLE 4: Adjusted and tested regression models to estimate the contemplating trees biomass ($BIO = \beta_0 + \beta_1(MS-1) + \beta_2(MS-2) + \beta_3(MS-3) + \beta_4(MS-4) + \beta_5(RAZÃO) + \beta_6(NDVI) + \beta_7(SAVI)$) in mixed ombrophilous forest.

N	Modelo de Regressão	F	R ² _{Ajust}	Syx	Syx (%)
1	3301,7568 + 6284,8662.(MS-1) + 7755,8697.(MS-2) - 10547,9589.(MS-3) - 2005,2401.(MS-4) - 7,5451.(RAZÃO) - 2097,5826.(NDVI) - 1669,5917.(SAVI)	5,19**	0,71	113,96	30,87
2	3433,3835 - 2286,5529.(MS-4) - 2174,4045.(NDVI) - 1627,3167.(SAVI)	13,71**	0,73	98,43	22,59
3	728,4601 - 19404,6326.(MS-1)	1,40	0,02	227,25	61,55
4	1024,0111 - 21123,9864.(MS-2)	2,64	0,08	220,31	59,68
5	1231,9013 - 34972,4901.(MS-3)	9,20**	0,30	191,90	51,98
6	1835,6299 - 5881,4361.(MS-4)	32,01**	0,67	141,54	38,34
7	1606,1715 - 117,3002.(RAZÃO)	18,28**	0,47	166,17	45,01
8	4737,0448 - 5329,7874.(NDVI)	22,35**	0,53	157,58	42,69
9	2085,2693 - 3921,5884.(SAVI)	25,98**	0,57	150,94	40,89

Em que: ** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

TABELA 5: Modelos de regressão testados e ajustados para estimar a variável carbono orgânico arbóreo ($CARB = \beta_0 + \beta_1(MS-1) + \beta_2(MS-2) + \beta_3(MS-3) + \beta_4(MS-4) + \beta_5(RAZÃO) + \beta_6(NDVI) + \beta_7(SAVI)$) na floresta ombrófila mista.

TABLE 5: Adjusted and tested regression models to estimate the contemplating trees organic carbon ($CARB = \beta_0 + \beta_1(MS-1) + \beta_2(MS-2) + \beta_3(MS-3) + \beta_4(MS-4) + \beta_5(RAZÃO) + \beta_6(NDVI) + \beta_7(SAVI)$) in mixed ombrophilous forest.

N	Modelo de Regressão	F	R ² _{Ajust}	Syx	Syx (%)
1	1368,2739 + 1390,2258.(MS-1) + 4782,1924.(MS-2) - 5688,4445.(MS-3) - 807,5335.(MS-4) - 2,4135.(RAZÃO) - 865,1181.(NDVI) - 720,7273.(SAVI)	5,33**	0,71	48,32	32,05
2	1413,7854 - 937,7168.(MS-4) - 732,6434.(SAVI) - 864,6647.(NDVI)	13,10**	0,75	33,21	22,13
3	326,9066 - 9513,4005.(MS-1)	1,93	0,04	94,75	62,85
4	390,3755 - 7729,6014.(MS-2)	1,92	0,05	94,81	62,89
5	524,3028 - 15142,3195.(MS-3)	9,92**	0,31	80,09	53,12
6	766,0470 - 2467,6959.(MS-4)	30,75**	0,68	60,59	40,19
7	657,6408 - 48,0656.(RAZÃO)	16,19**	0,44	72,35	47,99
8	1968,3458 - 2217,8638.(NDVI)	20,87**	0,52	67,86	45,01
9	877,6503 - 1661,0740.(SAVI)	26,25**	0,57	63,60	42,18

Em que: ** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Percebe-se, à primeira vista, que os modelos nos quais a variável independente é formada por MS-4

bem como utilização do método *stepwise*, o qual selecionou, como variáveis independentes, o MS-4, SAVI e NDVI, permitem bons ajustes dos modelos, fato esse facilmente explicado em razão da variável MS-4 (infravermelho próximo) estar estreitamente relacionada com a vegetação (interação da energia incidente com a estrutura celular e a quantidade de água na folha).

Realizando-se uma comparação aos resultados dos ajustes de biomassa realizados por Matos (2006) para a Floresta Ombrófila Densa de Terra Firme com o satélite IKONOS II pode-se observar que possuem uma similaridade estrutural, resgatadas as diferenças de espécies e ambientais entre ambas as tipologias florestais, a melhor equação no estudo teve resultados similares ao presente estudo, porém, no trabalho da autora, leva em consideração a Razão entre Bandas (4/3), com $R^2_{\text{Ajust}} = 2,51\%$; $Sy_x = 11,08\%$. As diferenças podem estar relacionadas a questão da estratificação da floresta, diferenças estas que implicam em coibir a contribuição da reflectância do solo, em razão de um *pixel* menor implica maior resolução espacial, conseqüentemente, as plantas, nos estratos inferiores, possuem importante papel na composição do valor de reflectância do *pixel*.

Em trabalhos realizados por Thenkabail (2004) e Thenkabail *et al.* (2004) para modelar e quantificar biomassa de árvores e arbustos, no Sul de Camarões, África, em Floresta Tropical úmida utilizando satélites de banda larga, entre eles o IKONOS II, ele conclui que os sensores comparados possuem séria limitação na modelagem da biomassa, conseguindo explica somente 13-60% da variabilidade da biomassa das florestas primárias e observou que os melhores resultados foram obtidos com o satélite *Hyperion* (hiperespectral), o qual explicou a variabilidade da biomassa de 36-83% maiores que os outros satélites (IKONOS II, ETM+, ALI).

Já em vegetação herbácea na várzea da ilha da Marchantaria, Am, Barbosa (2006) quantificou a biomassa de *Echinocloa polystachya* e modelou com os dados de reflectância de superfície do satélite IKONOS II, concluindo que as variáveis independentes que melhor serviram os modelos foram o índice $NDVI_{\text{green}}$ e $RCap\ 2$ transformada ao quadrado, ao cubo e em logaritmo natural.

As análises gráficas da distribuição dos resíduos, conforme se pode visualizar nas Figuras 3 e 4, utilizando-se todas as variáveis para o ajuste dos modelos, e nas Figuras 5 e 6 utilizando-se o método *stepwise*.

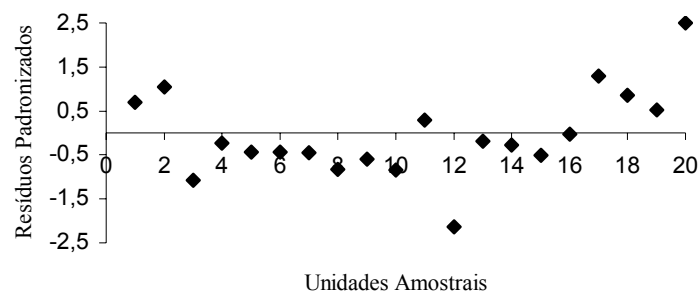


FIGURA 3: Distribuição dos resíduos do modelo utilizando todas as variáveis para estimar a biomassa arbórea na floresta ombrófila mista.

FIGURA 3: Distribution of the rest of the model using variable things to estimate the arboreal biomass in mixed ombrophilous forest.

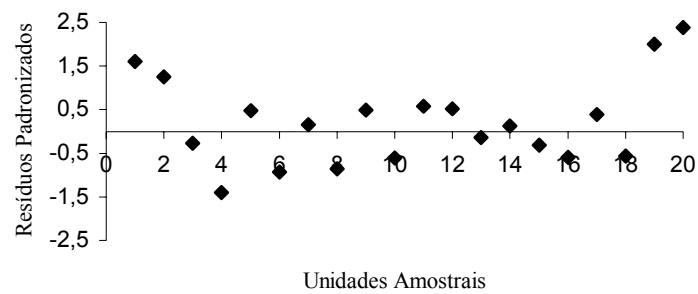


FIGURA 4: Distribuição dos resíduos do modelo *stepwise* (n. 2) para estimar a biomassa arbórea na floresta ombrófila mista.

FIGURA 4: Distribution of the rest of the model *stepwise* to estimate the arboreal biomass in the ombrophilous forest.

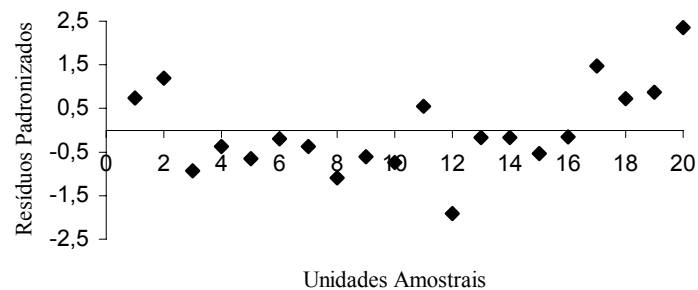


FIGURA 5: Distribuição dos resíduos do modelo utilizando todas as variáveis para estimar o carbono orgânico arbóreo na floresta ombrófila mista.

FIGURA 5: Distribution of the rest of the model using the whole variables to estimate the organic carbon in mixed ombrophilous forest.

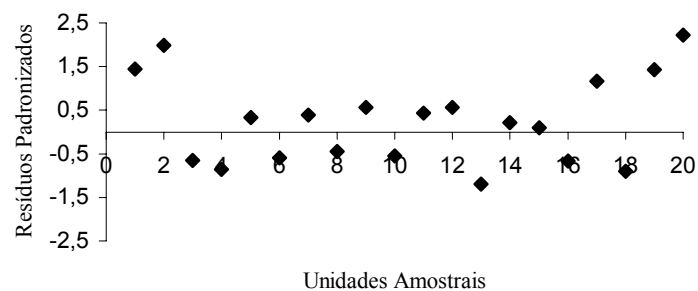


FIGURA 6: Distribuição dos resíduos do modelo *stepwise* (n. 2) para estimar o carbono orgânico arbóreo na floresta ombrófila mista.

FIGURA 6: Distribution of the rest of the model *stepwise* to estimate the organic carbon in the ombrophilous forest.

Pode-se perceber que os modelos utilizando-se o método *stepwise* apresentam uma distribuição do resíduo mais uniforme, sem tendenciosidade, justificando-se assim a escolha destes para gerar as estimativas de biomassa arbórea e carbono orgânico arbóreo.

Os resultados apresentados nas equações possuem a validade para a Floresta Ombrófila Mista, nas condições aqui estudadas e consideradas, pois os pode variar para outros tipos de vegetação, estrutura, bem

como composição de espécies e para outros métodos de determinação das variáveis (biomassa e carbono orgânico). Para Lu *et al.* (2004) acrescenta que a relação entre os parâmetros florestais e as respostas espectrais do satélite é ainda pouco entendida, e sabendo-se que os elementos na comunidade vegetal influenciam a resposta espectral e, portanto, afetam diretamente os modelos ajustados para a obtenção de dados biofísicos estimados por meio de satélites óticos.

Quantificação da biomassa e o acúmulo de carbono orgânico arbóreo

Utilizando as equações ajustadas e selecionadas foram geradas novas imagens, em cada pixel passou a representar a quantidade estimada da variável biomassa arbórea ou carbono orgânico arbóreo. A Tabela 6 apresenta a comparação dos resultados de biomassa arbórea e carbono orgânico arbóreo para a Floresta Ombrófila Mista. Os resultados obtidos foram comparados aos informados no relatório de execução planos de manejo florestal (PIZZATO, 1998).

As estimativas foram obtidas após a aplicação dos modelos selecionados, classificados dentro de cada intervalo de classe considerada, realizando-se a quantificação em área, conforme consta na Tabela 6.

Os resultados referentes à Floresta Ombrófila Mista Montana, os quais apresentaram tanto para a biomassa arbórea como para o carbono orgânico arbóreo subestimativas de 2,81 e 3,91% respectivamente.

TABELA 6: Biomassa e carbono orgânico arbóreo estimados em hectare (ha) na floresta ombrófila mista.

TABLE 6: Biomass and arboreal organic carbon in hectare (ha) in mixed ombrophilous forest.

Classe (Mg ha ⁻¹)	Biomassa Arbórea (ha)	Classe (Mg ha ⁻¹)	Carbono Orgânico Arbóreo (ha)
50 – 220	1.263,90	20 – 70	1.264,14
220 – 390	520,43	70 – 120	506,43
390 – 560	405,70	120 - 180	403,54
> 560	415,52	> 180	401,91
Total	2.605,55	Total	2.576,02

Pode-se supor que essas diferenças relacionadas para a área total sejam decorrentes de áreas que não tenham sido amostradas ou englobadas no presente trabalho, tais como: áreas de vegetação natural em estágio sucessional inicial, áreas com clareiras existentes no interior da floresta, áreas com sombras na imagem ou que apresentavam cobertura de nuvens, as quais foram desconsideradas.

As comparações relacionadas às classes estimadas com as classes previstas ficam prejudicadas em função de não existirem dados, ou mapas com informação dos diferentes estágios de sucessão encontrados, para que se possa realizar comparações mais individualizadas. Optou-se então por realizar comparações com as unidades amostrais realizadas no campo, englobando-as nas mesmas classes utilizadas nas estimativas.

Ao realizar a classificação das vinte unidades amostrais inventariadas em campo, obtiveram-se, tanto para biomassa como para o carbono orgânico, os seguintes resultados: 60% das unidades estão na 1ª classe, 10% na 2ª, 15% na 3ª e 15% na 4ª classe. Ao realizar-se a comparação com aos valores estimados, constata-se que para a biomassa arbórea 48,51% está na 1ª classe, 19,97% na 2ª, 15,57% na 3ª e 15,94% na 4ª, e para o carbono orgânico arbóreo 49,07% na 1ª classe, 19,65% na 2ª, 15,66% na 3ª e 15,60% na 4ª. Observa-se que as diferenças ocorrem somente na 1ª e 2ª classes, resultados estes decorrentes talvez em função de diferenças entre os estágios sucessionais serem muito próximos.

CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos, pode-se concluir que o presente trabalho atendeu aos objetivos propostos de quantificação de biomassa e carbono arbóreo partindo dos modelos matemáticos selecionados e aplicados às imagens do satélite IKONOS II, demonstrando o potencial da utilização dessas ferramentas.

A análise estatística mostrou existir uma alta relação entre as variáveis, biomassa arbórea e carbono arbóreo, as quais apresentam uma média correlação com as variáveis digitais, sendo que, as que apresentam as melhores correlações, foram o MS-4, RAZÃO, NDVI e SAVI;

A metodologia aplicada viabilizou realizar as estimativas em menor tempo, conseqüentemente com menores custos, porém se deve dispor de informações prévias (levantamentos de biomassa, carbono e equações) do ecossistema considerado. Viabilizou também reforçar ainda mais a utilização das técnicas de sensoriamento remoto em levantamentos florestais, considerando-se sobretudo que o estudo foi realizado

com imagens provenientes de um sensor de alta resolução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBOSA, K. M. N. **Monitoramento espacial de biomassa e carbono orgânico da vegetação herbácea de várzea na Amazônia Central**. 2006. 125 f.. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- BERNARDES, S. **Índices de vegetação e valores de proporção na caracterização de floresta tropical primária e estádios sucessionais na área de influência da Floresta Nacional de Tapajós – Estado do Pará**. 1998. 86 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional e Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- BITENCOURT, M. D. *et al.* Cerrado vegetation study using optical and radar remote sensing: two Brazilian case studies. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Toronto, v. 33, n. 6, p. 468-480, Nov./Dec. 2007.
- BOLETIM DE PESQUISA, **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná**. Londrina: n. 27, t. 1 e 2, 1984.
- BUTKIN, D. B.; SIMPSON, L. G.; NISBET, R. A. Biomass and carbon storage of the North American deciduous Forest. **Biogeochemistry**, v. 20, n. 1, p.1-7, Jan./Feb. 1993.
- CHUVIECO, E. Fundamentos de teledetección espacial. **Madrid: Ediciones Rialp, 1990. 453 p.**
- DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, C. R. Quantificação do estoque de carbono fixado em reflorestamentos de *Pinus* na área de domínio da Floresta Ombrófila Mista no Paraná. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 1, p. 32-39, jan./mar. 2007.
- DEWAR, R. C.; CANNEL, M. G. R. Carbon sequestration in the trees, products and soils of forest plantations: an analysis using UK examples. **Tree Physiology**, Victoria, v. 11, n. 1, p. 49-71, Jan. 1992.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.
- HUETE, A.R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 25, n. 3, p. 295-309, May/June 1988.
- IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro: 1992. 92 p.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R.W. **Remote sensing and interpretation**. 3rd ed. New York: John Wiley, 1994. 750 p.
- LU, D. *et al.* Relationship between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses em the Brazilian Amazon Basin. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 198, n.1-3, p. 149-167, Jan./Mar. 2004.
- MACIEL, M. N. M. **Estimativa de parâmetros estruturais de uma floresta primária na Amazônia Oriental através de dados orbitais**. 2002. 144 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- MATOS, F. D. A. **Estimativa de biomassa e carbono em Floresta Ombrófila Densa de Terra Firme na Amazônia Central, Manaus – Am, Brasil, por meio de dados de satélites de média e alta resolução espacial**. 2006. 146 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- MORAES, E. C. Radiometria óptica espectral – comportamento espectral. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 1996, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996. 1CD ROOM
- PARANÁ. Secretária de Estado de Agricultura e Abastecimento, Instituto de Terras, Cartografia e Florestas. **Atlas do Estado do Paraná**. Curitiba: 1987. 73 p.
- PEARSON, P.L.; MILLER, L.D. Remote sensing of standing crop biomass for estimating of the productivity of the shortgrass prairie. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIROMENT, 8., 1972, Ann Arbor. **Proceedings...** Ann Arbor: ERIM, 1972. p. 1357-1381.
- PETERSON, B.; GERLACH, F.; HUTCHINS, K. **IKONOS relative spectral response and radiometric calibration coefficients**. SPACE IMAGING, 2000. 5 p. (Document Number: SE-REF-016)
- PIZZATTO, L. **Relatório de execução de planos de manejo florestal – informações até dez/97**.Indústrias Pedro N. Pizzato, 1998. (Relatório técnico).
- QUINONES, M. J.; HOEKMAN, D. H. Exploration of factors limiting biomass estimation by polarimetric Radar in Tropical forests. **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**. v. 42, n.1, p. 86-104, Jan. 2004.
- RENNER, R. **Seqüestro de carbono e a viabilização de novos reflorestamentos no Brasil**. 2004. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- ROUSE, J. W. *et al.* Monitoring vegetation system in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., Washington: 1973. **Proceeding...** Washington, 1973, v.1, Sec.A.

p. 309-317.

SANTOS, J. R.dos S. *et al.* Tropical forest biomass and its relationship with P-band SAR data. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 58, n. 1, p. 37-42, jan./abr. 2006.

SANTOS, J. R.dos S. *et al.* Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n.4, p. 482-493, Nov. 2003.

SCHOENINGER, E. R. **Uso de redes neurais artificiais para mapeamento de biomassa e carbono orgânico no componente arbóreo de uma Floresta Ombrófila Densa**. 2006. 146 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed. 2004, p.184-188.

THENKABAIL, P. S. Inter-sensor relationships between IKONOS and Landsat-7 ETM+ NDVI data in three ecoregions of Africa. **International Journal Remote Sensing**, v. 25, n. 2, p.389-408, 2004.

THENKABAIL, P. S. *et al.* Hyperion, IKONOS, ALI, and ETM+ sensors in the study of African rainforests. **Remote Sensing of Environment**. v. 90, n. 1, p. 23-43, Mar. 2004.

WATZLAWICK, L.F. **Estimativa de biomassa e carbono em floresta ombrófila mista e plantações florestais a partir de dados de imagens do satélite IKONOS II**. 2003. 120 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

WATZLAWICK, L. F.; KOEHLER, H. S.; KIRCHNER, F. F. Estimativa de biomassa e carbono em plantios de *Pinus taeda* L. utilizando imagens do satélite IKONOS II. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 45-69, jan./jun. 2006.