

MAPEAMENTO DE CARBONO UTILIZANDO IMAGENS SATELITÁRIAS

MAPPING CARBON STOCK THROUGH SATELLITE IMAGERY

Juliana da Luz¹, Yeda Maria Malheiros de Oliveira², Maria Augusta Doetzer Rosot³,
Rosana C. V. Higa⁴, Edilson B. de Oliveira⁵

¹ UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. Rua: Lothário Meissner, 632, Bairro: Jardim Botânico, 80210-170 – Curitiba, Paraná, Brasil. ^{2,3,4,5} EMBRAPA FLORESTAS. Estrada da Ribeira, Km 111, caixa postal 319, 83411-000 – Colombo, Paraná, Brasil.

e-mail: ¹ julianaflorestal@gmail.com, ² yeda@cnpf.embrapa.br, ³ augusta@cnpf.embrapa.br,
⁴ rhiga@cnpf.embrapa.br, ⁵ edilson@cnpf.embrapa.br

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar o uso de técnicas de sensoriamento remoto para a estimativa da biomassa em florestas plantadas, visando avaliar seu estoque de carbono. A pesquisa foi desenvolvida em áreas com plantios de *Pinus taeda* com idade variando de 22 a 25 anos, localizados no município de Caçador-SC. Foram utilizadas imagens dos sensores Ikonos e CBERS, com datas compatíveis com a coleta dos dados de campo. O talhão 21 foi analisado diferentemente dos demais em função da espécie (*Pinus elliottii*) e idade (aproximadamente 8 anos). No software ENVI foram geradas imagens “volume” a partir de modelos que utilizavam em sua composição variáveis provenientes de bandas espectrais, índices de vegetação e componentes principais. Com as imagens “volume” calculadas foi possível gerar imagens biomassa e carbono. Efetuou-se a comparação de médias entre a biomassa estimada a partir das imagens de satélite com a biomassa calculada pelo método destrutivo (talhão 21) ou utilizando os volumes do inventário (demais talhões). Os resultados obtidos pelo teste T mostraram que hipótese H_0 foi rejeitada, ou seja, existe diferença estatística entre as médias obtidas a partir das imagens biomassa e as obtidas com base nos dados do inventário. Isso significa que os sensores orbitais CBERS e Ikonos não se mostraram apropriados para a obtenção de valores de biomassa e carbono, nas condições observadas na área de estudo.

Palavras-chaves: biomassa, Ikonos, CBERS.

ABSTRACT

This study focused on the efficiency of using remote sensing techniques to estimate forest plantations biomass aiming the assessment of carbon stock. The research was developed in 22 to 25 years old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations, located in Caçador, Santa Catarina State, Brazil. Ikonos and CBERS sensors images were acquired at the same time the forest inventory was carried on. One of the areas (stand 21) was analyzed separately from the others as it consisted of an 8-year-old slash pine (*Pinus elliottii*) plantation. Volume images were generated from models that included spectral bands reflectance, vegetation indexes and principal components as independent variables. Biomass and carbon images were derived from the volume images. A t-test was performed to compare biomass averages obtained from satellite imagery and those calculated by destructive methods or estimated through forest inventory data. Results showed that the null hypothesis should be rejected, i.e., there is a significant statistical difference between the two methods. Therefore CBERS and Ikonos imagery can not be considered appropriate to estimate biomass and carbon for the prevailing conditions in the study area.

Key words: biomass, Ikonos, CBERS.

INTRODUÇÃO

O uso do geoprocessamento tem se intensificado nas últimas décadas, fruto do desenvolvimento de tecnologias vinculadas ao Sensoriamento Remoto (SR), ferramentas auxiliares como o GPS e tecnologias associadas, como os Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Adicionalmente, a possibilidade de acesso às diferentes zonas do espectro eletromagnético quando se utilizam dados satelitários, pode permitir a correlação entre variáveis mensuráveis no solo e sua resposta espectral nas imagens. Dessa forma, o uso de algumas técnicas aliadas ao sensoriamento remoto vem se tornando uma alternativa importante para

obtenção de estimativas precisas e confiáveis da atividade fotossintética em larga escala (BRANDÃO et al., 2007).

A região do espectro eletromagnético, entre 0,4 e 0,7 μm , é a que corresponde à radiação fotossinteticamente ativa, utilizada pelas plantas nos processos fisiológicos de acúmulo de biomassa (SALISBURY e ROSS, 1992). O uso de imagens-índices tem sido muito utilizado para obter valores de biomassa, uma vez que para seu cálculo se utilizam bandas espectrais que se encontram na faixa espectral citada.

No entanto, nem sempre os resultados têm se mostrado satisfatórios. Souza (1997), em seu estudo em florestas implantadas com *Pinus sp.*, avaliou o uso de imagens Landsat 5 TM, através de índices de vegetação (NDVI e SAVI) e imagens proporção (vegetação, sombra e solo) para detecção de alterações no volume de madeira depois de realizado um desbaste. Considerando a série temporal das imagens utilizadas (antes e depois do desbaste) os valores não permitiram a identificação de alterações de volume.

Watzlawick (2003), trabalhando com imagens Ikonos II para estimar biomassa e carbono em plantações de *Pinus taeda*, constatou que existe apenas uma média correlação desses parâmetros com as variáveis digitais MS-4, imagem Razão, e índices de vegetação NDVI e SAVI.

Matos e Kirchner (2008) também utilizaram imagens Ikonos II para estimar biomassa de Floresta Ombrófila Densa de terra firme da Amazônia central e os resultados do estudo mostraram que as variáveis RVI, NDVI, TCap₃ (Tasseled Cap₃) e TCap₄ (Tasseled Cap₄) foram as que melhor se correlacionaram com a biomassa.

A resposta espectral da vegetação em outras bandas do espectro eletromagnético, como as captadas por sensores radares, pode apresentar alta correlação com a biomassa florestal. Estudos realizados por Beaudoin et al (1994) citado por Gama et al (2007) em florestas de *Pinus sp.* utilizando o radar JPL/NASA nas bandas P, L e C, permitiram constatar que a resposta radiométrica do radar na banda P em todas as polarizações foi a que apresentou os melhores coeficientes de correlação, para a biomassa dos galhos, troncos, acículas e total. Gama et al. (2007) obtiveram resultado semelhante para um estudo realizado em reflorestamento *Eucalyptus grandis*, concluindo que a associação da radiometria na banda P e da interferometria nas bandas P e X foi eficaz para a estimativa da biomassa dos povoamentos.

Considerando que as imagens de nível orbital do satélite sino-brasileiro CBERS 2 (*China-Brazil Earth Resources Satellite 2*), constituem um novo ferramental para as aplicações do sensoriamento remoto, é oportuno avaliar tais produtos em relação à estimativa remota de parâmetros da vegetação arbórea, além de compará-los com outros sensores disponíveis no mercado. Assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o uso de técnicas de sensoriamento remoto para estimativa de biomassa de florestas plantadas através de imagens CBERS2 e Ikonos II, visando avaliar estoque de carbono.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo localiza-se entre os municípios de Caçador e Rio das Antas, que estão inseridos no Planalto Ocidental Catarinense entre os paralelos 26° e 27° Sul e os meridianos 50° e 52° Oeste. A área pertence à empresa Juliana Florestal Ltda, coligada à Frame Madeiras Especiais Ltda tem aproximadamente 1.011 ha. A maioria dos plantios é de *Pinus taeda*, com idade variando de 22 a 25 anos. Porém existe um talhão (talhão 21), onde foi plantado *Pinus elliottii*, que possui aproximadamente 8 anos de idade.

Foram utilizados como material de apoio os dados do inventário florestal da fazenda, realizado no ano de 2004. Esse inventário envolveu 161 parcelas, sendo que as variáveis estimadas por parcela foram: diâmetro à altura do peito (DAP) médio, altura total média, altura dominante, além do número de árvores, área basal, volume com e sem casca por parcela e por hectare. Foram utilizadas duas imagens, sendo a primeira do satélite Ikonos II, multiespectral, com as bandas MS-1, MS-2, MS-3, MS-4 de resolução espacial 4 metros, captada no dia 17/02/2004. A segunda imagem é do satélite CBERS, multiespectral com as bandas CCD-1s, CCD-2s, CCD-3s, CCD-4s, com resolução espacial de 20 metros, captada dia 28/04/2004. As imagens foram georreferenciadas a partir da técnica “mestre- escravo” e processadas utilizando os *software* Arc Map 9.1 e ENVI 4.3

Primeiramente foram coletados em campo pontos com GPS diferencial de dois vértices de cada parcela para poder efetuar sua correta alocação nas imagens. As parcelas são retangulares com 40m de comprimento e 16m de largura, perfazendo 640 m² de área.

Para a realização de estudos relacionados ao conteúdo de umidade na vegetação ou biomassa, é necessário estabelecer uma relação quantitativa entre números digitais (DN) da imagem e parâmetros do alvo. Deve-se realizar a conversão dos DN para reflectância, com a finalidade de minimizar a variabilidade de condições de iluminação no comportamento espectral do alvo, ou no caso deste trabalho, na vegetação (CHUVIECO *apud* WATZLAWICK, 2003). Sendo assim, foi necessário primeiramente realizar a operação de geração de imagens reflectância.

Foram calculados três índices de vegetação, o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) e RVI (*Ratio Vegetation Index*). As imagens resultantes desses procedimentos possuem como principal função realçar a contribuição espectral da vegetação, enquanto minimizam a contribuição espectral do solo, ângulo solar, vegetação senescente e da atmosfera (WATZLAWICK, 2003). Adicionalmente foi realizada uma Análise de Componentes Principais (ACP), cuja finalidade foi analisar as *N* imagens brutas e suas correlações entre si e produzir um novo conjunto de *N* novas imagens, com nenhuma correlação entre si (CROSTA, 1993).

Para cada parcela foi criada uma ROI (*Region of Interest*), que consiste em um polígono vetorizado que inclui a região de interesse, de onde foi possível obter os valores médios dos pixels para cada banda espectral, índice de vegetação e componentes principais.

Segundo Conese et al. (1993) citado por Canavesi & Ponzoni (2007) e Gu e Gillespie (1998), a topografia pode exercer influência na radiação captada pelo sensor, pois vertentes voltadas para o sol no momento da aquisição da imagem tendem a apresentar pixels com valores mais elevados em relação às vertentes que ficam do lado oposto da exposição solar. Além do mais, terrenos inclinados podem produzir sombras dentro de um dossel florestal pelo posicionamento relativo das árvores. Por esse motivo, para a imagem do sensor Ikonos, foi realizado o cálculo do fator de iluminação, baseado nos parâmetros: imagem “orientação das vertentes”, imagem “declividade”, azimute solar e zênite solar, que dividiu as parcelas da área de estudo em duas classes, “iluminado” e “escuro”. A imagem obtida pelo cálculo do fator de iluminação contém valores variando de 0,0060 a 1,4142. Essa imagem foi fatiada em duas classes: escuro (0,0060 a 0,9448) e muito iluminado (0,9448 a 1,4142). Em seguida as parcelas foram classificadas de acordo com seu fator de iluminação. As que estavam inseridas nas duas classes ao mesmo tempo foram eliminadas. No total, 40 parcelas pertenciam à classe “iluminado” e 47 à classe “escuro”.

O objetivo deste trabalho foi o de investigar a correlação entre resposta espectral e variáveis dendrométricas para verificar se é possível estimar as segundas a partir de dados espectrais, usando modelos teóricos. O primeiro passo foi analisar a existência de correlação linear entre as variáveis dendrométricas volume com casca e as bandas espectrais, índices de vegetação e componentes principais. Dessa foram, analisando a matriz de correlação foi possível definir as variáveis que poderiam vir a compor o modelo. Para o ajuste dos modelos com uma variável independente foram utilizadas variáveis cuja correlação linear com a variável dependente fosse maior ou igual a 0,3. Também foram ajustados modelos por regressão linear múltipla utilizando o procedimento *stepwise*, além do ajuste do modelo completo. Para a escolha do melhor modelo foram analisados o erro padrão da estimativa, o coeficiente de determinação múltipla, o p-valor e a análise gráfica de resíduos.

Após a escolha do melhor modelo para estimar volume, utilizou-se a equação correspondente para calcular a imagem “volume” no *software* ENVI. Em seguida, calculou-se a imagem biomassa (através da opção matemática de bandas, presente no *software*) a partir da seguinte equação (1):

$$B = \left[a * \left(40000 * \frac{V}{N} * \frac{1}{\pi * ff} \right)^b \right] * \frac{N}{1000} \quad (1)$$

Onde:

B = Biomassa por hectare (em ton/ha)

a, b = coeficientes (Tabela 1)

N = número de árvores por hectare

V = volume por hectare (valor do pixel na imagem “volume” (em m³/ha))

ff = fator de forma (0,46 para *Pinus taeda* com 20 anos)

h = altura em metros

Tabela 1. Coeficientes utilizados no cálculo das componentes fuste, folhas e galhos vivos.

Table 1. Coefficients used to calculate biomass for different compartments in the tree (stem, leaves and live branches).

Peso verde de	Coeficientes	
	a	b
Fuste	0,0595	0,9279
Folhas	0,0012	1,048
Galhos vivos	0,0001	1,3922

Fonte: UFPR; ECOPLAN, 2003

Foram calculadas três imagens, uma para cada componente (fuste, folhas, e galhos vivos) e a imagem “biomassa total” foi o somatório dessas três imagens.

Para o talhão 21 foi utilizada uma fórmula diferente, por se tratar de um plantio de *Pinus elliottii* com 8 anos de idade. A equação utilizada foi a seguinte (2):

$$B = \left[e^{0,906464} * \left(\frac{V}{N} * \frac{1}{ff * h} \right)^{0,95791} \right] * e^{0,125612} \quad (2)$$

Onde:

B = biomassa individual (em ton)

V = volume por hectare (valor do pixel na imagem volume (em m³/ha))

N = número de árvores por hectare

ff = fator de forma (0,43 para *Pinus elliottii* com 7 anos)

h = altura total média da parcela em metros

Para fazer a conversão da biomassa seca para carbono multiplicou-se a imagem biomassa pelo fator de conversão 0,45 (UFPR; ECOPLAN, 2003), obtendo-se assim, uma nova imagem, referente ao conteúdo de carbono, em toneladas por hectare.

A biomassa estimada a partir das imagens foi comparada com a biomassa total calculada utilizando os volumes do inventário florestal da área. Para o talhão 21 foi calculada a biomassa arbórea pelo método destrutivo, o que possibilitou a comparação dos valores obtidos na imagem com os valores obtidos pela biomassa calculada em laboratório. Em seguida efetuou-se um teste T de amostras emparelhadas para verificar se havia diferenças significativas entre a biomassa calculada e a estimada por imagens de satélite.

RESULTADOS

Após o processamento das imagens e análise estatística dos dados foi possível obter dentre os modelos testados (*Stepwise*, Modelo Completo e modelos de regressão linear simples) o que melhor estimou o volume da floresta.

Na tabela 2 são mostrados os modelos volumétricos selecionados para a imagem CBERS, e a tabela 3 apresenta os modelos volumétricos selecionados para a imagem Ikonos.

Tabela 2. Modelos volumétricos selecionados para as imagens CBERS.

Table 2. Selected volume models selected for CBERS images.

Imagem CBERS				
Classe	Modelo	p-valor	R ² aj.	Syx%
Pinus 22 – 25 anos	$V_{cc}/ha = 445,301244 - 71,292817 \times PC2$	4,49E-07	0,15	14,41
Talhão 21	$V_{cc}/ha = 630,437653 - 43,295032 \times CCD_3s + 35,505377 \times PC4$	4,73E-05	0,93	4,392

V_{cc}/ha: Volume com casca por hectare
 CCD_3s: Banda 3 do satélite CBERS
 PC2: Segunda componente principal
 PC4: Quarta componente principal
 R² aj: Coeficiente de determinação ajustado
 Syx%: Erro padrão da estimativa em porcentagem

Tabela 3. Modelos volumétricos selecionados para as imagens Ikonos.

Table 3. Selected volume models selected for Ikonos images.

Imagem Ikonos				
Classe	Modelo	p-valor	R ² aj.	Syx%
Iluminado	$V_{cc}/ha = 470,305814 + 3,524917 \times RVI - 9,501555 \times PC4$	1,76E-03	0,25	12,127
Escuro	$V_{cc}/ha = 756,461546 - 3,812648 \times PC2$	2,78E-03	0,16	12,839
Talhão 21	$V_{cc}/ha = 63690,034138 - 48,135515 \times MS1 + 56,076309 \times MS2 + 233,890244 \times MS3 - 67,357339 \times MS4 - 221,530676 \times NDVI + 528,093606 \times SAVI - 20,185270 \times RVI - 1,841080 \times PC2$	1,58E-01	0,57	10,577

V_{cc}/ha: Volume com casca por hectare
 MS1: Banda 1 do satélite Ikonos
 MS2: Banda 2 do satélite Ikonos
 MS3: Banda 3 do satélite Ikonos
 MS4: Banda 4 do satélite Ikonos
 NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index*
 SAVI: *Soil Adjusted Vegetation Index*
 RVI: *Ratio Vegetation Index*
 PC2: Segunda componente principal
 PC4: Quarta componente principal
 R² aj: Coeficiente de determinação ajustado
 Syx%: Erro padrão da estimativa em porcentagem

Pode-se observar que os valores do coeficiente de determinação (R²) para os talhões da classe 20 anos foram extremamente baixos, variando de 0,15 a 0,25, ou seja, as variáveis independentes utilizadas explicam muito pouco da variabilidade da variável dependente. Tal fato pode ser explicado pela variabilidade da resposta espectral desses talhões, que já sofreram desbastes e cujos pixels não representam pixels puros, mas, sim, uma mistura de resposta do dossel, do solo e de sub-bosque.

Já para o talhão 21 esperava-se uma menor variabilidade por se tratar de talhão não-desbastado, mais denso e com maior probabilidade de pixels puros representando a resposta espectral do dossel. Efetivamente, os valores do R² aj. foram de 0,93 e 0,57, para a imagem CBERS e Ikonos respectivamente.

A partir desses modelos foram geradas imagens “volume” no *software* ENVI. As imagens “biomassa” também foram calculadas no mesmo *software* através das fórmulas citadas anteriormente e utilizando como variável a imagem “volume” calculada. As imagens “biomassa” e “carbono”, uma vez obtidas, foram fatiadas em classes para facilitar sua representação no mapa, e estão mostradas nas figuras de 1 a 8.

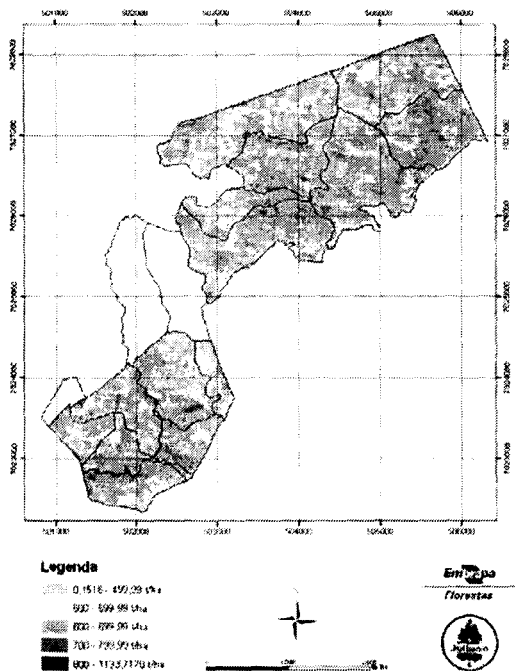


Figura 1. Biomassa estimada a partir de uma imagem CBERS Classe 20 anos.
 Figure 1. Biomass estimated from CBERS images – Age class 20.

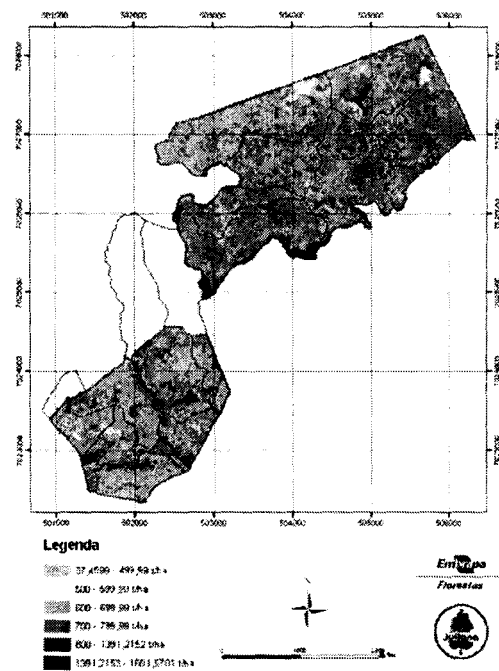


Figura 2. Biomassa estimada a partir de uma imagem Ikonos Classe Escuro e Iluminado
 Figure 2. Biomass estimated from Ikonos images – Classes “dark” and “illuminated”

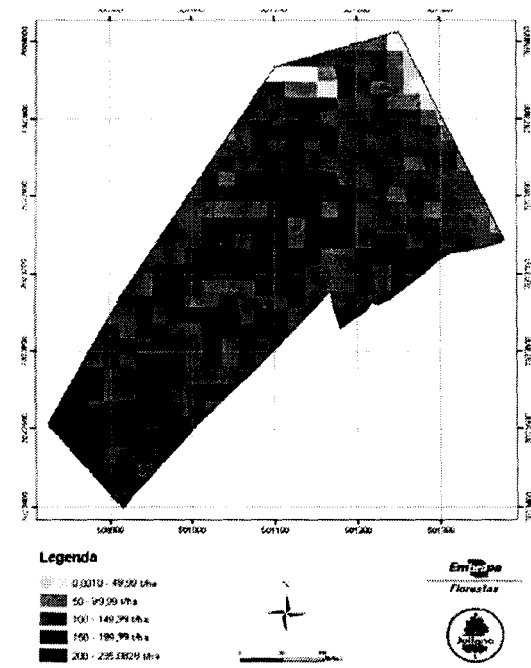


Figura 3. Biomassa estimada a partir de uma imagem CBERS Talhão 21.
 Figure 3. Biomass estimated from CBERS images – Stand 21.

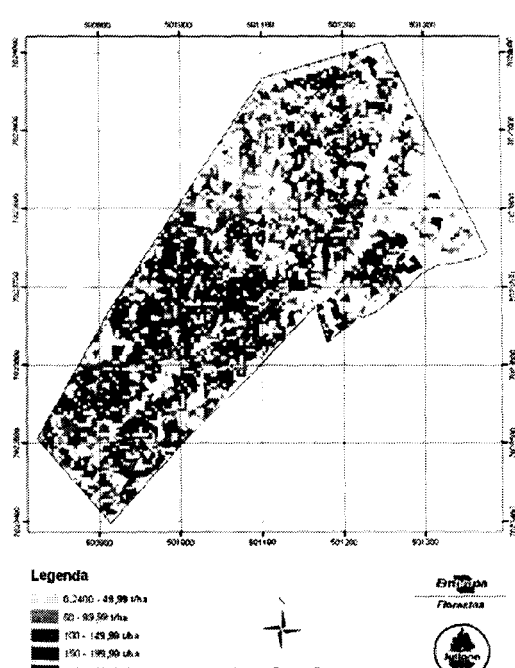


Figura 4. Biomassa estimada a partir de uma imagem Ikonos Talhão 21.
 Figure 4. Biomass estimated from Ikonos images – Stand 21.

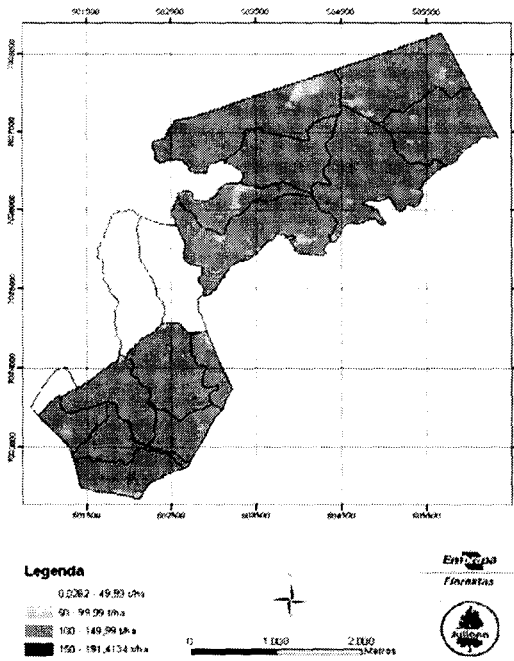


Figura 5. Teor de carbono estimado a partir de uma imagem CBERS - Classe 20 anos.
Figure 5. Carbon stock estimated from CBERS images – Age class 20.

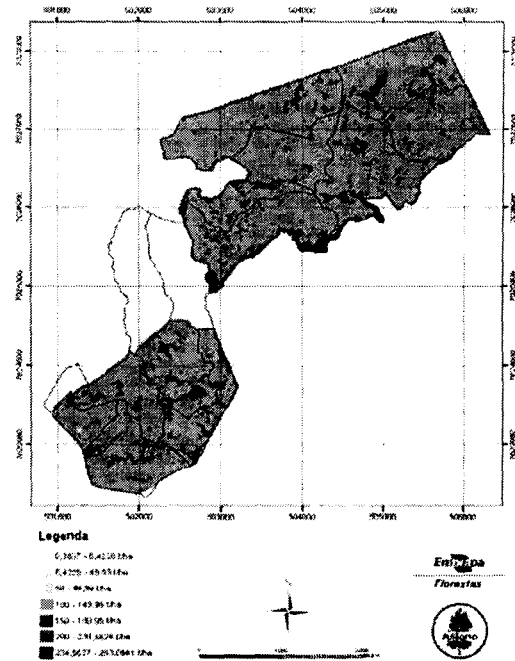


Figura 6. Teor de carbono estimado a partir de uma imagem Ikonos - Classe escuro e iluminado.
Figure 6. Carbon stock estimated from Ikonos images – Classes “dark” and “illuminated”.

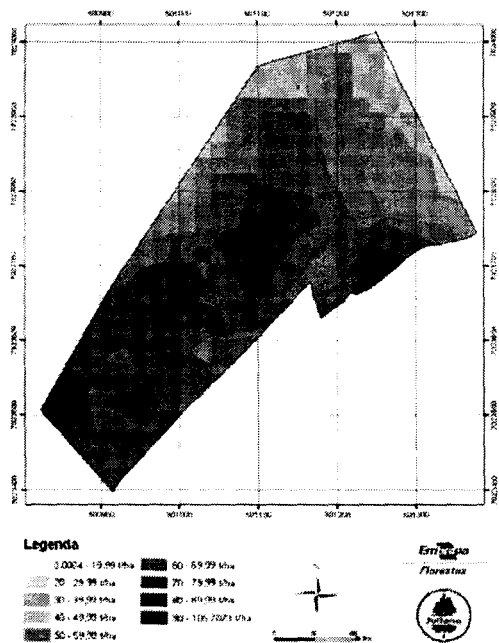


Figura 7. Teor de carbono estimado a partir de uma imagem CBERS- Talhão 21.
Figure 7. Carbon stock estimated from CBERS images – Stand 21.

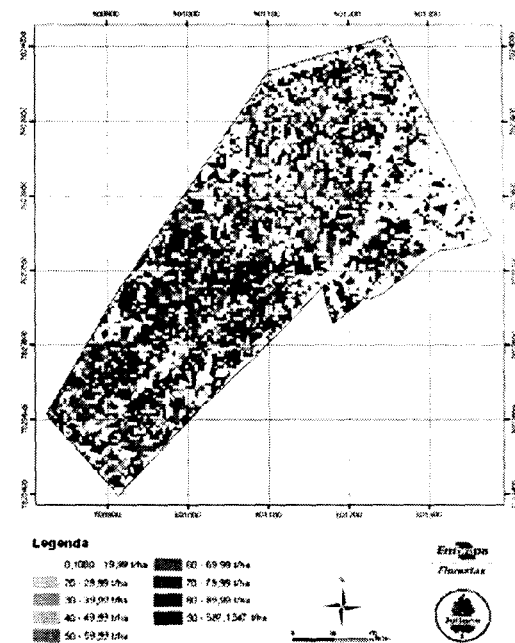


Figura 8. Teor de carbono estimado a partir de uma imagem Ikonos - Talhão 21.
Figure 8. Carbon stock estimated from Ikonos images – Stand 21.

Na figura 1 a biomassa variou de 0,15 a 1133,72 t/ha, com a maior parte da área concentrada na classe de 600 a 699,99 t/ha. Já na figura 2, a biomassa variou de 37,46 a 1681,57 t/ha, com grande concentração em duas classes, de 600 a 699,99 t/ha e 700 a 799,99 t/ha. As figuras 3 e 4, referentes ao talhão 21 apresentaram valores de biomassa mais baixos, variando de 0,001 a 235,08 t/ha e 0,24 a 1304,74 t/ha respectivamente. Essa diferença se deve principalmente à idade do talhão, 8 anos, comparados com os outros que variam de 22 a 25 anos. Nas figuras 5, 6, 7 e 8 referentes ao carbono os valores obtidos foram: 0,026 a 191,41 e 0,38 a 283,09 t/ha respectivamente para os talhões da classe 20 anos e 0,0004 a 105,79 t/ha e 0,11 a 587,13 t/ha respectivamente para o talhão 21.

Efetuiu-se a comparação de médias entre a biomassa estimada a partir das imagens de satélite com a biomassa calculada utilizando os volumes do inventário ou a calculada em laboratório pelo método destrutivo para o talhão 21. Os resultados obtidos pelo teste T de amostras emparelhadas podem ser observados nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4. Resultado estatístico do teste t para dados oriundos de imagens CBERS, para as classes de idade 20 anos e 7 anos.

Table 4. T-test results for CBERS data, age classes 20 and 7.

	P(T<=t) bi-caudal	t crítico bi-caudal	Hipóteses
20 anos	1,171E-15	1,9759	Rejeita H_0
7 anos	8,62077E-08	2,4469	Rejeita H_0

* H_0 : a média dos desvios é igual a zero, ou seja, não existe diferença entre as médias.

Tabela 5. Resultado estatístico do teste t para dados oriundos de imagens Ikonos, para as classes escuro, iluminado e 7 anos.

Table 5. T-test results for Ikonos data, classes "dark" and "illuminated".

	P(T<=t) bi-caudal	t crítico bi-caudal	Hipóteses
Escuro	1,46326E-06	2,0129	Rejeita H_0
Iluminado	2,33902E-06	2,0227	Rejeita H_0
7 anos	6,5436E-08	2,4469	Rejeita H_0

* H_0 : a média dos desvios é igual a zero, ou seja, não existe diferença entre as médias.

Como se pode observar nos resultados mostrados nas tabelas 4 e 5 a hipótese H_0 foi rejeitada, ou seja, existe diferença estatística entre as médias obtidas a partir das imagens biomassa e as obtidas a partir de cálculos com base nos dados do inventário e pelo método destrutivo.

Estudo semelhante foi apresentado por Watzlawick (2003), que trabalhou com imagens Ikonos II para estimar biomassa e carbono em plantações de *Pinus taeda*. Os resultados apresentados mostraram que as variáveis digitais que apresentaram melhores correlações com a biomassa e carbono foram a banda MS-4 do sensor, referente ao infra-vermelho próximo e os índices de vegetação RVI, NDVI e SAVI com os respectivos valores de -0,72; -0,75; -0,80 e -0,70 para biomassa e -0,72; -0,74; -0,79 e -0,70 para carbono.

CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Os sensores orbitais presentes nos satélites CBERS e Ikonos não se mostraram apropriados para se obter valores de biomassa e carbono para a área de estudo. As imagens provenientes desses sensores não possuem bandas localizadas na faixa espectral referente ao infra-vermelho médio e infra-vermelho distante, que captariam melhor as informações de biomassa. Por se tratar de uma área que sofreu desbastes na maioria dos seus talhões o ideal seria acompanhar esse processo ao longo do tempo com imagens orbitais.

Os índices de vegetação usados nesse trabalho são os mais citados na literatura estudos de biomassa, porém recomenda-se testar novos índices que explorem mais o espectro eletromagnético, considerando-se o uso de outros sensores.

Acredita-se que imagens provenientes de radar, especialmente na banda P poder-se-iam mostrar mais adequadas, pois as ondas eletromagnéticas desse sensor possuem um poder maior de penetração no dossel da floresta, captando de forma mais efetiva a informação de biomassa, principalmente a proveniente dos fustes.

REFERÊNCIAS

- BEAUDOIN, A., T. LE TOAN, S., GOZE, E., NEZRY, A., LOPEZ, E., MOUGIN, C.C., HSU, H.C. HAN, J., KONG, & R.T. SHIN. Retrieval of Forest Biomass from SAR Data. *International Journal of Remote Sensing*, v.15, n.14, p.2777-2796, Sept. 1994.
- BRANDÃO, Z. N. et al. Uso do NDVI pra determinação da biomassa na chapada do Araripe. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2007. *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Florianópolis, 2007. p. 75-81.
- CANAVESI, V.; PONZONI, F. G. Relações entre variáveis dendrométricas de plantios de *Eucalyptus* sp. e valores de FRB de superfície de imagens do sensor TM/Landsat 5. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2007. *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Florianópolis, 2007. p. 1619-1625.
- CROSTA, A. P. *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto*. Campinas: IG/UNICAMP, 1993. 170 p.
- FONSECA, E. L. Sensoriamento remoto como ferramenta auxiliar em um sistema de previsão de safras. In: I SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 2002. *Anais Aracaju/SE*.
- GAMA, F. F. et al. Utilização de dados polarimétricos e interferométricos SAR para estimativa de biomassa de povoamentos de *Eucalyptus*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2007. *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Florianópolis, 2007. p. 4857-4864.
- GU, D.; GILLESPIE, A. Topographic normalization of Landsat TM images of forest based on subpixel sun-canopy- sensor geometry. *Remote Sensing of Environment*, v. 64, p. 166-175, 1998.
- MATOS, F. D. A.; KIRCHNER, F. F. Estimativa de Biomassa da Floresta Ombrófila Densa de Terra Firme na Amazônia Central com o Satélite Ikonos II. *Floresta*, Curitiba, PR, v. 38, n. 1, jan./mar. 2008.
- SALISBURY, F.B.; ROSS, C.W. Plant physiology. [s.l.], *Wadsworth Pub.*, 1992. 682 p.
- SOUZA, C. L. *Avaliação de imagens-índice e de imagens-proporção para detecção de alteração no volume de madeira em florestas implantadas*. 1997. 102 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos/SP. Orientadores: Dr. Flávio Jorge Ponzoni e Dr. Yosio Edemir Shimabukuro.
- UFPR; ECOPLAN. Universidade Federal do Paraná e Instituto Ecoplan. *Estudo de viabilidade para implantação de florestas fixadoras de carbono: estudo de caso no sul do Estado do Paraná*. Curitiba: 2003, 93p.
- 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. 119 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Orientador: Flávio Felipe Kirchner.