

USO DE IMAGENS ORBITAIS NA ESTIMATIVA DE PARÂMETROS ESTRUTURAIS DE UMA FLORESTA PRIMÁRIA NO MUNICÍPIO DE PARAGOMINAS, ESTADO DO PARÁ¹

Maria de Nazaré Martins MACIEL²

Patrícia Cunha de Oliveira BASTOS³

João Olegário Pereira de CARVALHO⁴

Orlando dos Santos WATRIN⁴

RESUMO: Esta pesquisa objetivou estimar parâmetros estruturais de uma floresta tropical primária localizada no município de Paragominas, Estado do Pará, através do estudo relacionando dados de campo e orbitais obtidos pelo satélite ETM+/LANDSAT-7. Procedeu-se à caracterização florística-estrutural da floresta, através das variáveis biométricas: densidade das árvores, área basal, biomassa, volume e diversidade de espécies arbóreas, considerando indivíduos com DAP ≥ 10 cm. A partir da integração da imagem ETM+/Landsat-7 e dos dados de campo, foram feitos procedimentos estatísticos correlacionando o grau de dependência linear entre as variáveis biométricas e digitais, obtidas pelo Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e reflectância das bandas ETM+ 3, ETM+ 4 e ETM+ 5. Foram realizadas análises de regressão *Stepwise* determinando, dentre as variáveis digitais estudadas, as que melhor explicassem cada variável biométrica. As imagens sintéticas resultantes da aplicação dos modelos de regressão ajustados para as variáveis biométricas foram classificadas pelo método de fatiamento, a partir das quais se geraram mapas temáticos do volume, da biomassa e da área basal da floresta. Os resultados mostraram a existência de correlação negativa entre as variáveis área basal, biomassa e volume e a digital NDVI. A estimativa de parâmetros biométricos com emprego de dados orbitais associados aos de campo apresentou-se eficiente.

TERMOS PARA INDEXAÇÃO: Estrutura da Floresta, Dados Orbitais, Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.

¹ Aprovado em 29.09.09 para publicação.

² Engenheira Florestal, D.Sc., Professora da Universidade Federal Rural da Amazônia. E-mail: nazaré.maciel@ufra.edu.br.

³ Engenheira Florestal, M.Sc., Técnica da Secretaria de Urbanismo do Estado do Pará. E-mail: pcobastos@bol.com.br.

⁴ Engenheiro Florestal, D.Sc., Pesquisador da Embrapa Amazônia Oriental. E-mail: olegário.carvalho@gmail.com; watrin@cpatu.embrapa.br.

USE OF SATELLITE IMAGES IN THE ESTIMATE OF STRUCTURAL PARAMETERS OF A PRIMARY FOREST IN THE MUNICIPALITY OF PARAGOMINAS, PARÁ STATE

ABSTRACT: The objective of this work was to analyze structural parameters of a primary tropical forest in the municipality of Paragominas, Pará State, correlating field data to satellite data obtained from the ETM+/Landsat-7. Floristic composition and primary forest structure were characterized using the biometric variables: tree density, basal area, wood biomass, stem volume and tree species diversity, considering individuals > 10 cm dbh. Considering the integration of the ETM+/Landsat-7 image and the field data, statistical analyses were performed to correlate the degree of linear dependency between biometric and digital variables obtained from the Normalized Difference of Vegetation Index (NDVI) and reflectance of the bands ETM+ 3, ETM+ 4 and ETM+ 5. Stepwise regression analysis was performed to determine the digital variables that could better explain each biometric variable. Synthetic images resulting from application of regression models that were tested from biometric variables were classified by the slicing method. Then, thematic maps of volume, biomass and basal area of the forest were generated from those images. The results showed negative correlation between the biometric variables basal area, volume, biomass and the digital NDVI. Estimation of biometric parameters using satellite data associated to field data was efficient.

INDEX TERMS: Forest Structure, Satellite Data, Normalized Difference of Vegetation Index.

1 INTRODUÇÃO

A degradação do espaço, no contexto amazônico, vem sendo motivo de preocupação de pesquisadores, entidades de pesquisa e governos, principalmente pela intensificação do processo de ocupação e exploração de seus recursos naturais verificados nas últimas décadas, sem o devido conhecimento dos ecossistemas da região. Tais preocupações se devem ao fato de que a Amazônia brasileira se destaca por possuir a maior floresta tropical intacta do planeta (SKOLE et al., 1994) e abriga mais da metade das espécies vegetais do mundo (MORAN et al., 1994).

Neste ecossistema, as espécies interagem, formando uma estrutura ecológica dinamicamente complexa, que precisa ser conhecida em detalhe, para permitir a elaboração e aplicação correta dos planos de manejo silvicultural, proporcionando o aproveitamento racional dos recursos florestais (CARVALHO, 1982).

Entretanto, devido à sua dimensão, à dificuldade de acesso e à necessidade de análise periódica, o emprego de técnicas convencionais de levantamento da vegetação na região amazônica, muitas vezes, torna-se proibitivo, ou dificultoso. Assim, torna-se necessário o uso do sensoriamento remoto, a partir de sensores orbitais, como ferramenta adequada nas atividades de detecção e avaliação dos recursos naturais desta região (MACIEL, 2002).

Neste sentido, tem-se presenciado nas duas últimas décadas um vertiginoso avanço de sistemas computacionais, que propiciaram o desenvolvimento e refinamento de poderosos conjuntos instrumentais voltados ao mapeamento, análise e representação de fenômenos do mundo real. Esse conjunto de tecnologias, conhecido genericamente como geoprocessamento, compreende, dentre outras coisas, o desenvolvimento e uso de produtos e técnicas de sensoriamento remoto e de sistemas de informações geográficas.

Assim sendo, o presente trabalho tem como objetivo estimar parâmetros estruturais de uma floresta primária em uma área no município de Paragominas, Estado do Pará, relacionando dados biométricos (campo), com dados orbitais obtidos pelas imagens Landsat-7.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na fazenda Rio Capim, pertencente a Cikel Brasil Verde S/A, localizada no município de Paragominas, Estado do Pará, entre as coordenadas geográficas 03°30' e 03°45' de latitude Sul e 48°30' e 48°45' de longitude Oeste.

O clima da região, onde está inserida a área de estudo, segundo a classificação de Köppen, é do tipo "Am" (tropical chuvoso, com chuvas de monção). A área apresenta uma topografia que vai de plana a suavemente ondulada, com altitude média de 20m em relação ao nível do mar. Os principais solos são os Latossolos Amarelos; Argissolos Amarelos; Plintossolos; Gleissolos; e Neossolos (SILVA, 1997). Os solos apresentam fertilidade muito baixa, condicionados pela baixa reserva de nutrientes essenciais a diversas culturas, principalmente cálcio, magnésio, potássio, fósforo e nitrogênio, além de alta saturação por alumínio. Segundo o IBGE (1992), os seguintes ambientes fitoecológicos são definidos na área de estudo: Floresta Ombrófila Densa de Terra Firme, Floresta Ombrófila Aberta Mista de Cipó e Palmeira; e Floresta Ombrófila Aluvial.

2.2 PRODUTOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Foram utilizadas imagens de satélite Landsat-7 bandas 3, 4 e 5, sensor ETM+, órbita-ponto 223-063, adquirida em

27/08/2002 e cartas topográficas do DSG (Diretoria de Serviço Geográfico) SA-22-Z-D-V e SA-22-Z-D-II em escala de 1:100.000, objetivando principalmente dar suporte cartográfico às informações obtidas a partir das imagens digitais.

Para as etapas de pré-processamento e processamento dos dados digitais, foi empregado o programa *Environment for Visualizing Images* (ENVI 3.2).

Para o auxílio no deslocamento em campo, bem como na alocação adequada dos pontos de amostragem na imagem georreferenciada, foi utilizado o *Global Positioning System* (GPS), instrumento que fornece a localização por coordenadas geográficas.

2.3 OBTENÇÃO DOS DADOS DE CAMPO

As atividades desenvolvidas no campo foram divididas em duas etapas sequenciais: aquisição de pontos de controle e levantamento da vegetação.

2.3.1 Aquisição de Pontos de Controle

Visando ao georreferenciamento da imagem, foram coletadas as posições geográficas de pontos de controle, através de GPS, procurando-se coletar pontos de fácil identificação na imagem e que a cobrissem por completo.

2.3.2 Levantamento Florístico-Estrutural da Floresta Primária

Em uma área de floresta primária de 100 ha (Unidade de trabalho - UT 02 da Unidade de Produção Anual - UPA 07), na Fazenda Rio Capim, foram estabelecidas, aleatoriamente, 36 parcelas quadradas de 0,25 ha (Figura 1). Nessas parcelas foram inventariadas todas

as árvores com $DAP \geq 10\text{cm}$. O diâmetro foi medido a 1,30 m do solo ou em outra posição no fuste, livre de defeitos. Nas árvores com

sapopemas, a medição foi feita em um ponto acima da influência das mesmas.

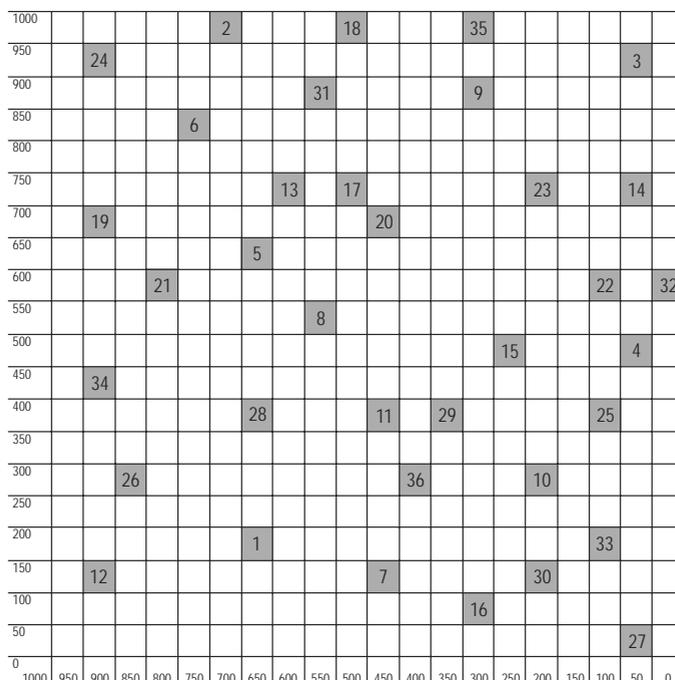


Figura 1 – Croqui da distribuição espacial das parcelas inventariadas em uma Unidade de Trabalho de 1000 x 1000m, em área da Fazenda Rio Capim, propriedade da CIKEL Brasil Verde S.A., no município de Paragominas - Pará.

2.3.3 Cálculo das Variáveis Biométricas da Floresta

As variáveis biométricas estudadas foram: densidade, área basal, biomassa, volume e diversidade de espécies, sendo que os cálculos realizados consideraram todos os indivíduos levantados nas unidades de amostra (parcelas amostrais). A densidade foi definida como o número de árvores por unidade de área (1 ha), enquanto a área basal foi computada como sendo a somatória das áreas transversais de todas as árvores existentes em um hectare, sendo expressa em m^2/ha .

A biomassa da vegetação, definida como sendo o peso seco de material vivo por unidade

de área, foi estimada através do método indireto que consiste em correlacioná-la com alguma variável de fácil medição e que não requeira a destruição do material vegetal. De acordo com Brown, Gillespife e Lugo (1989), a biomassa é estimada utilizando-se equações matemáticas que descrevem a relação entre peso seco e outras variáveis independentes da árvore, como DAP e altura total.

Para a análise da biomassa, utilizaram-se as equações definidas por Higuchi et al. (1998), como sendo as mais adequadas para vegetação de floresta tropical úmida de terra firme, pois produzem estimativas confiáveis desta variável, com desvios inferiores a cinco por cento (5%).

Para o cálculo da biomassa, obtida em kg/ha, levou-se em consideração as seguintes condições:

Para indivíduos com $10 \text{ cm} \leq \text{DAP} < 20 \text{ cm}$, utilizou-se a seguinte equação:

$$\bullet \ln P = -1,754 + 2,665 \ln \text{DAP}$$

Para indivíduos com $\text{DAP} \geq 20 \text{ cm}$, estimou-se a seguinte fórmula:

$$\bullet \ln P = -0,151 + 2,170 \ln \text{DAP}$$

onde: P = peso da massa fresca de cada árvore.

O volume foi calculado para árvores com $\text{DAP} \geq 20 \text{ cm}$, considerando que não há equações para a região amazônica que considere diâmetros a partir de 10 cm. Utilizou-se a equação definida por Baima, Silva e Silva (2001), para florestas de terra firme, similares às existentes no município de Moju, que é a seguinte: $\ln V = -7,49337 + 2,086952 \ln \text{DAP}$; onde: V = volume com casca (m^3); DAP = diâmetro a 130 cm do solo (cm).

Para a análise de diversidade florística foi utilizado o Índice de Shannon-Weaver (H') (1949), dado por: $H' = -\sum p_i \ln p_i$; onde: $p_i = n_i/N$, a porção da abundância da i -ésima espécie em relação ao total de espécies.

2.4 PRÉ-PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Inicialmente foi feito o georreferenciamento da imagem, com erro menor que 0,5 pixel e a reamostragem dos pixels foi feita pelo método vizinho mais próximo. Em seguida, procedeu-se à conversão dos números digitais (DN) para reflectância aparente através da metodologia proposta por Markham e Barker (1986), utilizando-se os parâmetros de calibração do manual de calibração para o sensor ETM+/Landsat7

fornecido pela NASA (http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_htmls/chapter11/chapter11.html)

2.5 PROCESSAMENTO DE IMAGENS

A fim de promover a melhor caracterização das formações florestais da área de estudo, foi empregado o índice de vegetação NDVI, que é dado pela seguinte fórmula:

$$NDVI = \left(\frac{IVP - VM}{IVP + VM} \right)$$

Onde:

IVP = reflectância na banda referente ao infravermelho próximo;

VM = reflectância na banda referente ao vermelho;

Neste trabalho, para a obtenção da imagem NDVI, foram empregadas as bandas ETM+ 3 (vermelho) e ETM+ 4 (infravermelho próximo).

2.6 OBTENÇÃO DOS VALORES DIGITAIS

As unidades de amostra de campo foram sobrepostas às imagens originais e sintéticas, sendo então extraídos os valores digitais correspondentes às mesmas. As unidades amostrais também foram sobrepostas às imagens de reflectância e imagens NDVI, onde, de maneira análoga ao procedimento anterior, foram extraídos os valores digitais médios dos "pixels" correspondentes a cada uma das unidades amostrais de campo de 50 x 50 m.

2.7 PROCEDIMENTO ESTATÍSTICO

Visando avaliar a capacidade de utilização de imagens de satélite para a

caracterização quantitativa da floresta, procurou-se estabelecer a relação entre os dados de campo e os valores extraídos das imagens, empregando os procedimentos estatísticos descritos a seguir.

Inicialmente procedeu-se a uma análise de correlação entre as variáveis biométricas e digitais, a fim de determinar o grau de dependência linear entre elas, empregando-se função linear e exponencial.

Os dados de campo foram relacionados às imagens através de modelo de regressão, onde, as variáveis densidade, área basal, biomassa, volume e diversidade foram consideradas variáveis dependentes e os valores digitais extraídos das imagens reflectância, índice de vegetação e proporção correspondentes às unidades amostrais, considerados variáveis independentes.

Visando avaliar a utilização conjunta dos dados oriundos de todas as imagens geradas, foram efetuadas análises de regressão múltipla. Na determinação da variável ou variáveis que melhor expliquem a variação

em y , foi empregado o método de regressão *Stepwise* e, posteriormente, procedeu-se à análise de resíduos. As análises foram feitas utilizando-se o pacote estatístico STATISTICA (STATSOFT, 2001).

2.8 CLASSIFICAÇÃO DIGITAL

Os modelos ajustados foram aplicados e as imagens sintéticas resultantes da aplicação desses modelos foram classificadas através de fatiamento, que é uma técnica que consiste em realçar os “pixels” cujas intensidades se situam dentro de um intervalo especificado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DA FLORESTA PRIMÁRIA

Os resultados obtidos para as variáveis densidade, área basal, biomassa, volume e diversidade de espécies nas 36 unidades amostrais, considerando indivíduos com $DAP \geq 10$ cm, encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de Densidade, Área Basal, Volume, Biomassa e Diversidade de espécies em 36 unidades de amostra ($DAP \geq 10\text{cm}$), em uma floresta primária, Paragominas – Pará.

Parcela	Densidade (N° de ind/ha)	Área Basal m ² / ha.	Volume m ³ /ha.	Biomassa (ton/ ha)	Diversidade (Shannon- Weaver)
1	520	29,5478	118,1912	534,4161	2,950
2	524	23,4380	93,7519	393,6625	3,291
3	516	29,4957	117,9827	537,9939	3,281
4	420	27,4043	109,6173	518,3505	3,404
5	508	31,4112	125,6449	586,1648	3,396
6	516	38,4330	153,7319	766,1778	3,423
7	484	22,9884	91,9537	406,6667	3,572
8	468	25,3968	101,5870	463,1764	3,035
9	520	19,4089	77,6356	303,6752	3,206
10	516	17,4096	69,6386	249,0772	3,581
11	480	28,5402	114,1606	531,1498	3,530
12	520	21,6728	86,6912	358,0658	3,223
13	520	23,5512	94,2046	403,1458	3,337
14	492	30,3461	121,3844	578,5698	3,438
15	412	32,6601	130,6403	646,5935	3,227
16	444	22,3233	89,2933	387,9240	3,220
17	500	29,5198	118,0793	546,5977	3,561
18	564	27,7789	111,1158	484,2353	3,166
19	532	32,4188	129,6751	607,7903	3,423
20	520	22,8156	91,2623	385,4882	3,636
21	512	27,3331	109,3325	484,5991	3,455
22	516	18,6627	74,6506	278,8328	3,103
23	532	26,1399	104,5597	459,8117	3,387
24	508	23,9771	95,9085	410,4741	3,395
25	536	26,0572	104,2290	457,8812	3,615
26	416	29,4721	117,8883	567,9266	2,894
27	516	29,0009	116,0036	544,0159	3,320
28	440	24,0848	96,3393	429,4324	3,076
29	508	30,2219	120,8876	544,3028	3,555
30	464	29,8016	119,2065	566,2750	3,270
31	536	30,4022	121,6086	563,7633	3,357
32	440	26,0060	104,0240	480,8500	3,078
33	532	21,2079	84,8316	343,8555	3,572
34	448	25,3826	101,5302	461,4725	3,183
35	536	28,6629	114,6516	513,9335	3,621
36	428	28,7310	114,9241	555,1140	3,298
\bar{X}	495,6667	26,7140	106,8560	481,9850	3,3354
s	40,3683	4,3683	17,7779	107,2088	0,1966

Para a variável densidade, observa-se que a amplitude de valores, nas unidades de amostra levantadas, está entre 412 a 564 ind/ha, caracterizando valores médios de 495,6667 ind/ha ($S = 39,8037$). Maciel (2002), para a variável densidade, em levantamento no município de Moju (PA), observou que a amplitude de valores nas unidades de amostra levantadas estava entre 186 a 511 ind/ha, para indivíduos com $DAP \geq 10$ cm. Carvalho (1999) encontrou valores variando de 140 a 302 ind/ha, para indivíduo com $DAP \geq 30$ cm na Floresta Nacional do Tapajós (PA). Maciel (1998), analisando indivíduos com $DAP \geq 25$ cm na Floresta Nacional de Caxiuanã, PA, encontrou valores entre 99,71 árv/ha a 168,67 árv/ha.

Em relação à área basal das árvores, observou-se que a média foi de, aproximadamente, 26,71 m²/ha, para indivíduos com $DAP \geq 10$ cm, com valores variando entre 17,41 e 38,43 m²/ha. Maciel (2002), no município de Moju (PA), analisando indivíduos com $DAP \geq 10$ cm, encontrou valores entre 10,48 a 32,45 m²/ha. Na Floresta Nacional de Caxiuanã (PA), Maciel (1998), analisando indivíduos com $DAP \geq 25$ cm, encontrou valores entre 15,63 e 26,6 m²/ha. Carvalho (1999) encontrou valores variando de 30,99 a 70,33 m²/ha, para indivíduos com $DAP \geq 30$ cm na Floresta Nacional do Tapajós (PA). Resultados superiores foram observados por Barros (1986), que encontrou um valor médio de 29,8 m²/ha, analisando indivíduos com $DAP \geq 5$ cm em floresta no Planalto de Curuá-Una, PA.

Na área de estudo, a variável volume apresentou valores entre 69,6386 e 153,7319 m³/ha, para indivíduos com $DAP \geq 20$ cm. Maciel (2002), no município de Moju (PA), analisando indivíduos com $DAP \geq 10$ cm, encontrou valores entre 135,28 e 450,99 m³/ha. Também no município de Moju (PA), o volume

encontrado por Costa et al. (1998), variou entre 30,52 e 42,51 m³/ha, para indivíduos com $DAP \geq 45$ cm. Na Floresta Nacional do Tapajós (PA), Carvalho (1999) encontrou valores entre 475,62 e 1.164,45 m³/ha, para indivíduo com $DAP \geq 30$ cm. Silva, Lopes e Carvalho (1985), analisando indivíduos com $DAP > 45$ cm, encontraram volumes inferiores a 113 m³/ha, na Floresta Nacional do Tapajós, PA.

Com relação à biomassa, encontrou-se, em média, 481,98 ton/ha, para indivíduos com $DAP \geq 10$ cm, com valores variando entre 249,07 e 766,18 ton/ha. Maciel (2002), no município de Moju (PA), analisando indivíduos com $DAP \geq 10$ cm, encontrou uma amplitude de 104,24 a 342,38 ton/ha de biomassa total na área amostrada. Bernardes (1998) encontrou, na Floresta Nacional do Tapajós (PA), um valor médio de 267 ton/ha. Araújo (1999) encontrou valores considerados baixos, de 108,75 e 127,85 ton/ha, afirmando que este comportamento se deve às características da formação florestal estudada, composta por indivíduos com altura média de 14 m e de 23,20 m de diâmetro. Zerbini e Santos (1993) estimaram a fitomassa de uma floresta densa de terra firme no município de Oriximiná (PA), encontrando valores entre 480 e 198 ton/ha para indivíduos com $DAP \geq 7$ cm.

A diversidade florística, determinada pelo Índice de Shannon-Weaver (H'), variou entre 2,89 e 3,64, mostrando que na área de estudo a diversidade de espécies é relativamente baixa, em relação aos padrões amazônicos. Valores semelhantes foram encontrados por Pinheiro (2004), que obteve um índice de 3,8, para uma área vizinha, na mesma floresta, onde foi realizado este estudo. Maciel (1998), em uma floresta de terra firme em Caxiuanã, Pará, encontrou valores variando entre 3,5 e 3,82. Barros (1986), para a região de Curuá-Una, PA, encontrou índice de diversidade de 3,32. Um baixo valor no índice de diversidade,

segundo Wilson et al. (1996) indica que uma ou poucas espécies são altamente abundantes e, por outro lado, um alto valor neste índice indica que muitas espécies são igualmente abundantes nas comunidades.

O comportamento de tais resultados comprovam a heterogeneidade de florestas na Amazônia, em relação à densidade, área basal, volume, biomassa e diversidade de espécies.

3.2 CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DA FLORESTA PRIMÁRIA

A Figura 2 mostra os valores médios, máximos e mínimos de reflectância nas bandas ETM+ 3, 4 e 5, referentes às 36 unidades amostrais inventariadas. De uma forma geral, observa-se, para o conjunto de imagens, um comportamento espectral típico de coberturas vegetais, com respostas baixas na região do visível (banda ETM+ 3), apresentando um valor de reflectância médio de 0,1708,

aumentando no infravermelho próximo (banda ETM+ 4), com reflectância média de 0,5578, e tornando a diminuir na banda do infravermelho médio (banda ETM+ 5), com reflectância média de 0,2011.

Foi observada uma grande amplitude de valores de reflectância dentro das unidades amostrais, especialmente na banda ETM+ 4, com valores variando entre 0,3237 e 0,7968 (Tabela 2). Isso é devido, potencialmente, à heterogeneidade florística e estrutural existente entre as unidades de amostra. Segundo Kumar (1972), apesar dos níveis de reflectância no infravermelho próximo serem altos para a vegetação, de um modo geral, há variações destas respostas, de espécie para espécie, pois a reflectância espectral das folhas nesta região é o resultado da interação da radiação incidente com a estrutura interna das folhas. Além disso, as variações na reflectância de um dossel dependerão também da quantidade de folhas dentro do mesmo, de suas orientações espaciais e de sua arquitetura.

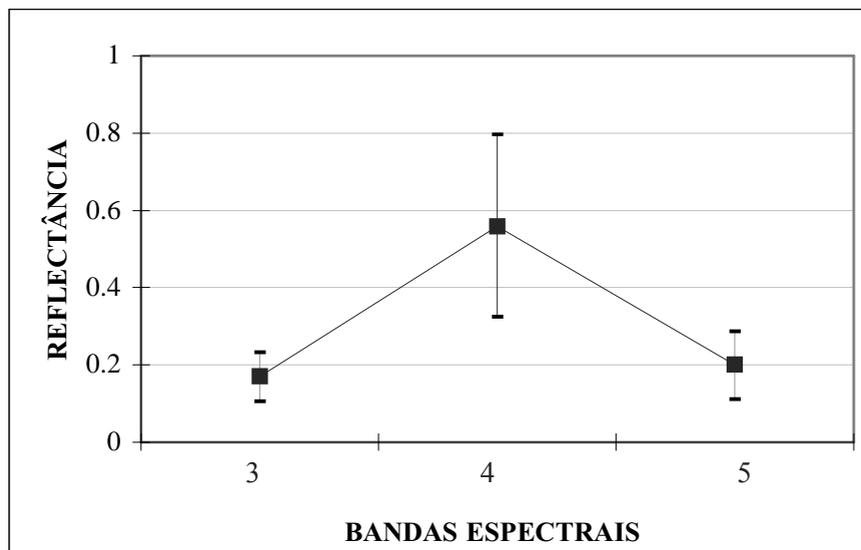


Figura 2 – Distribuição dos valores médios, máximos e mínimos de reflectância nas bandas ETM+ 3, 4 e 5 referentes às 36 unidades amostrais em uma floresta primária, em Paragominas - Pará.

Na análise dos dados oriundos da imagem NDVI (Tabela 2), observou-se um valor médio de 0,37 referente às unidades de amostra. Verificou-se que os maiores valores de NDVI foram encontrados nas unidades amostrais 10, 22 e 9 (Tabela 2), sendo estas caracterizadas pelos mais baixos valores de biomassa, volume e área basal (Tabela 1). Observou-se também que os mais baixos valores de NDVI encontram-se nas unidades amostrais 6, 15 e 19, que apresentam altos valores de biomassa, volume e área basal. Bernardes (1998) e Maciel (2002) também observaram que em áreas florestais há um decréscimo no valor de índice de vegetação, com o aumento da biomassa, volume e área basal.

Araújo (1999) encontrou, para floresta secundária, um valor de índice de vegetação de 0,47 e verificou que, a partir de um determinado estágio de crescimento, esse valor tende a diminuir, chegando a um valor médio para floresta madura (primária) de 0,36, mais baixo que o da floresta em construção (secundária), apesar da maior biomassa. Os resultados encontrados devem-se à grande proporção de sombra na floresta primária, e também à sua menor capacidade fotossintética, ocasionando menor resposta espectral dessa vegetação primária em relação às áreas em sucessão secundária.

Tabela 2 – Distribuição dos valores de reflectância nas bandas 3, 4 e 5 do sensor ETM+, e valores de NDVI, das 36 unidades amostrais levantadas em uma floresta primária, no município de Paragominas - Pará.

UNIDADES DE AMOSTRA	REFLECTÂNCIA			NDVI
	BANDA 3	BANDA 4	BANDA 5	
1	0,1568	0,5760	0,2578	0,2931
2	0,2071	0,5935	0,1943	0,4261
3	0,1819	0,6412	0,2540	0,3230
4	0,2323	0,5967	0,2136	0,3804
5	0,1991	0,6269	0,2867	0,2732
6	0,1335	0,3237	0,1655	0,2162
7	0,1602	0,5378	0,1655	0,4305
8	0,1739	0,5545	0,1943	0,3980
9	0,1876	0,6659	0,1751	0,5004
10	0,1659	0,5101	0,1105	0,6319
11	0,1568	0,5330	0,1943	0,3734
12	0,1320	0,4367	0,1270	0,4689
13	0,2312	0,6863	0,2226	0,4168
14	0,1634	0,4693	0,2328	0,2814
15	0,1140	0,5091	0,2424	0,2570
16	0,1728	0,5656	0,1655	0,4584
17	0,1056	0,4309	0,1799	0,3036
18	0,1510	0,4813	0,1751	0,3755
19	0,1714	0,4528	0,2059	0,2679
20	0,1905	0,5998	0,1799	0,4559
21	0,1850	0,7009	0,2328	0,3842
22	0,1953	0,7113	0,1847	0,5063
23	0,1659	0,4661	0,1655	0,3884
24	0,1634	0,6264	0,2072	0,4118
25	0,1659	0,5349	0,1828	0,3946
26	0,1697	0,5083	0,1943	0,3347
27	0,1240	0,4743	0,1886	0,3386
28	0,2304	0,6142	0,2040	0,4050
29	0,1653	0,5945	0,2650	0,2841
30	0,1650	0,5569	0,2290	0,2881
31	0,1888	0,5569	0,2521	0,2794
32	0,2105	0,7968	0,2723	0,3967
33	0,1396	0,5342	0,1366	0,4977
34	0,1703	0,5394	0,1843	0,3989
35	0,1590	0,4821	0,1751	0,3700
36	0,1648	0,5927	0,2232	0,3609
\bar{x}	0,1708	0,5578	0,2011	0,3770

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Inicialmente, são apresentados os resultados obtidos pela análise de correlação entre as variáveis independentes (variáveis digitais) e as variáveis dependentes (variáveis biométricas) obtidas com o emprego de função linear. Em seguida, são apresentados os resultados oriundos da análise de regressão com os modelos que melhor explicam a dependência entre as variáveis.

3.3.1 Análise de correlação entre variáveis

A matriz de correlação, relacionando as variáveis independentes (variáveis digitais) com as variáveis dependentes (variáveis biométricas), através de função linear (Tabela 3), possibilitou a determinação do grau de dependência linear entre essas variáveis.

Tabela 3 – Coeficientes de correlação entre variáveis biométricas e digitais obtidos através de função linear, para uma área de floresta primária em Paragominas - Pará.

	DEN	AB	Vol	Bio	Div	REF 3	REF 4	REF 5	NDVI
DEN	1								
ÁB	-0,1044198	1							
Vol	-0,1281203	0,99929	1						
Bio	-0,2073827	0,992987	0,995795	1					
Div	0,4033085	0,019172	0,013386	-0,0165	1				
REF 3	-0,1410716	-0,30249	-0,29999	-0,29367	-0,19781	1			
REF4	-0,1752329	-0,41598	-0,4164	-0,40821	-0,25257	0,702643	1		
REF 5	-0,2269978	0,534057	0,52865	0,530874	-0,24397	0,319087	0,477347	1	
NDVI	0,1109171	-0,95909	-0,95578	-0,95169	0,06575	0,239308	0,310593	-0,66022	1

DEN – densidade (n° ind/ ha); AB - área basal (m² / ha); BIO – biomassa (ton / ha); VOL – volume (m³ / ha); div – diversidade; REF3 – reflectância na banda 3 do ETM+; REF4 – reflectância na banda 4 do ETM+; REF5 – reflectância na banda 5 do ETM+ ; NDVI – índice de vegetação por diferença normalizada.

Através da função linear, observam-se altas correlações negativas (inferiores a -0,7) entre as variáveis biométricas AB, BIO e VOL e a variável digital NDVI, conforme pode-se verificar em destaque na Tabela 3. Esses resultados eram esperados uma vez que, anteriormente, já se evidenciou que as unidades amostrais com altos valores para essas variáveis biométricas apresentavam também baixos valores de NDVI, como é o caso das unidades amostrais 6, 15 e 19. Por outro lado, os menores valores de área basal, biomassa e volume foram verificados nas unidades amostrais 10, 22 e 9, que apresentaram altos valores de NDVI.

Os resultados alcançados neste trabalho ratificam os evidenciados por outros autores

para floresta primária na Amazônia. Bernardes (1998) encontrou correlações altas e negativas do índice de vegetação SAVI com biomassa (-0,82), bem como com área basal (-0,73). Araújo (1999), estudando a variável biomassa, também verificou alta correlação negativa desta com o índice de vegetação SAVI (-0,88). Maciel (2002) observou altas correlações negativas do índice de vegetação com biomassa (-0,83), área basal (-0,73) e volume (-0,85). Essas relações negativas também foram encontradas nos resultados de trabalhos realizados em florestas naturais de coníferas (FRANKLIN, 1986) e plantadas (OZA et al., 1989; DANSON; CURRAN, 1993). Franklin (1986) encontrou relações negativas entre área basal e a radiancia no visível, registrada por um sensor

multiespectral aerotransportável. Uma vez que o aumento da área foliar e da copa das árvores estava diretamente relacionado com o aumento da área basal, o autor atribuiu a redução da resposta espectral no visível ao aumento da sombra, causado pelo incremento da copa das árvores das parcelas que apresentavam maior área basal.

As variáveis biométricas densidade (DEN) e diversidade (DIV) não apresentaram fortes correlações com nenhuma variável digital estudada, mostrando a independência das mesmas. A análise da matriz de correlação mostrou ainda a alta correlação entre algumas das variáveis independentes, o que é devidamente esperado, dado o aspecto de redundância das informações, o mesmo acontecendo entre algumas variáveis dependentes.

3.3.2 Análise de regressão

Visando relacionar os dados de campo com a utilização conjunta dos dados oriundos das imagens geradas, efetuaram-se análises de regressão múltipla pelo método *Stepwise*, podendo-se, assim, determinar a variável ou variáveis independentes que melhor explicassem a variação de cada variável dependente. Ressalta-se que as variáveis densidade, área basal, biomassa, volume e diversidade foram consideradas variáveis dependentes e os valores digitais de reflectância e o índice de vegetação, correspondentes às unidades amostrais, foram considerados variáveis independentes.

Na Tabela 4, são apresentados os resultados obtidos pela regressão *stepwise* para as variáveis dependentes de biomassa (BIO), volume (VOL) e área basal (AB), onde foram observados bons ajustes para as mesmas.

Tabela 4 – Parâmetros dos Modelos de Regressão aplicados para as variáveis Biomassa (BIO), Volume (VOL) e Área Basal (AB) de uma floresta primária, no município de Paragominas-Pará.

VARIÁVEL DEPENDENTE	MODELO DE REGRESSÃO	R ² ajustado	F	S _{xy}
Biomassa (BIO)	1057,3239 - 1306,89.NDVI - 411,06.REF3	0,91	189,82**	58,30
Volume (VOL)	191,212 - 186,935.NDVI - 24,893.REF4	0,93	238,48**	12,59
Área basal (AB)	47,8029 - 46,7338.NDVI - 6,2234.REF4	0,93	238,48**	1,29

BIO – biomassa (ton / ha); VOL – volume (m³ / ha); AB – área basal (m² / ha); REF3 – reflectância na banda 3 do ETM+; REF4 – reflectância na banda 4 do ETM+; NDVI – índice de vegetação por diferença normalizada.

** Valor Altamente Significativo a 99% de Probabilidade.

Para a variável biomassa (BIO), o modelo ajustado foi capaz de explicar 91% da variação existente (R² = 0,91). Usando regressão linear simples, Araújo (1999) constatou que os dados de biomassa em uma floresta primária foram melhor explicados através do índice de vegetação SAVI, com R²

= 0,78 e F = 61,4. Entretanto, estes valores foram inferiores aos encontrados neste trabalho, quando se ajustou um modelo de regressão múltipla (com duas variáveis), onde a regressão *stepwise* mostrou que o índice de vegetação NDVI foi o que melhor explicou a variação da biomassa observada. A

introdução do atributo espectral reflectância da banda ETM+3 (REF3) pôde adicionar mais informações ao modelo.

Para a variável volume (VOL), o modelo ajustado foi capaz de explicar 93% ($R^2 = 0,93$) da variação existente, através das variáveis digitais NDVI e REF4, conforme apresentado na Tabela 4. No tocante à variável área basal (AB), obteve-se um bom ajuste ($R^2 = 0,93$) através das variáveis NDVI e REF4.

Para as variáveis dependentes densidade (DEN) e diversidade (DIV) não foi possível ajustar nenhum modelo de regressão, pois nenhuma variável digital estudada foi capaz de explicar a variação da densidade e diversidade observada em campo. Este comportamento era de se esperar, já que todas as variáveis digitais testadas apresentaram baixas correlações com estas variáveis biométricas de interesse neste trabalho.

3.4 MAPEAMENTO DA VEGETAÇÃO

Neste estudo se propunha, inicialmente, apresentar o mapeamento da floresta primária em função da aplicação dos modelos ajustados para todas as variáveis biométricas analisadas; porém, em virtude da obtenção de ajustes satisfatórios, o mapeamento foi efetuado somente para as variáveis biomassa, volume e área basal. A aplicação de cada modelo gerou uma nova imagem, em que cada “pixel” passou a representar a quantidade estimada da variável em questão.

Visando reduzir a quantidade de pontos isolados observados nas imagens classificadas e, conseqüentemente, promover uma maior uniformidade nas classes definidas para as três variáveis biométricas analisadas, aplicou-se um filtro de moda. Os intervalos de classe foram definidos em função da amplitude de valores observados em campo. Assim, produziram-se os mapas temáticos de biomassa, de volume e de área basal da floresta primária, os quais são apresentados nas Figuras 3, 4 e 5, respectivamente.

Considerando estes mapas, pode-se observar que, para as três variáveis biométricas analisadas, as unidades de mapeamento dominantes referem-se aos valores intermediários. Dessa forma, as classes mais representativas para biomassa, volume e área basal foram de, respectivamente, 400 a 600 ton / ha, 90 a 120 m³ / ha e 20 a 30 m² / ha, mostrando que a área de estudo apresenta um grande potencial florestal.

Os mapas gerados neste trabalho fornecem informações valiosas, as quais podem subsidiar ações ligadas ao monitoramento e manejo florestal, propiciando tomadas de decisão com bases ecológicas, tomando-se como fundamento a análise estrutural da vegetação para o aproveitamento ordenado e permanente da floresta. Esses mapas são úteis na avaliação de áreas de potencialidades madeireiras, bem como no planejamento de inventários florestais, melhorando, sobretudo, a eficiência da alocação de amostras e a conseqüente redução dos custos.

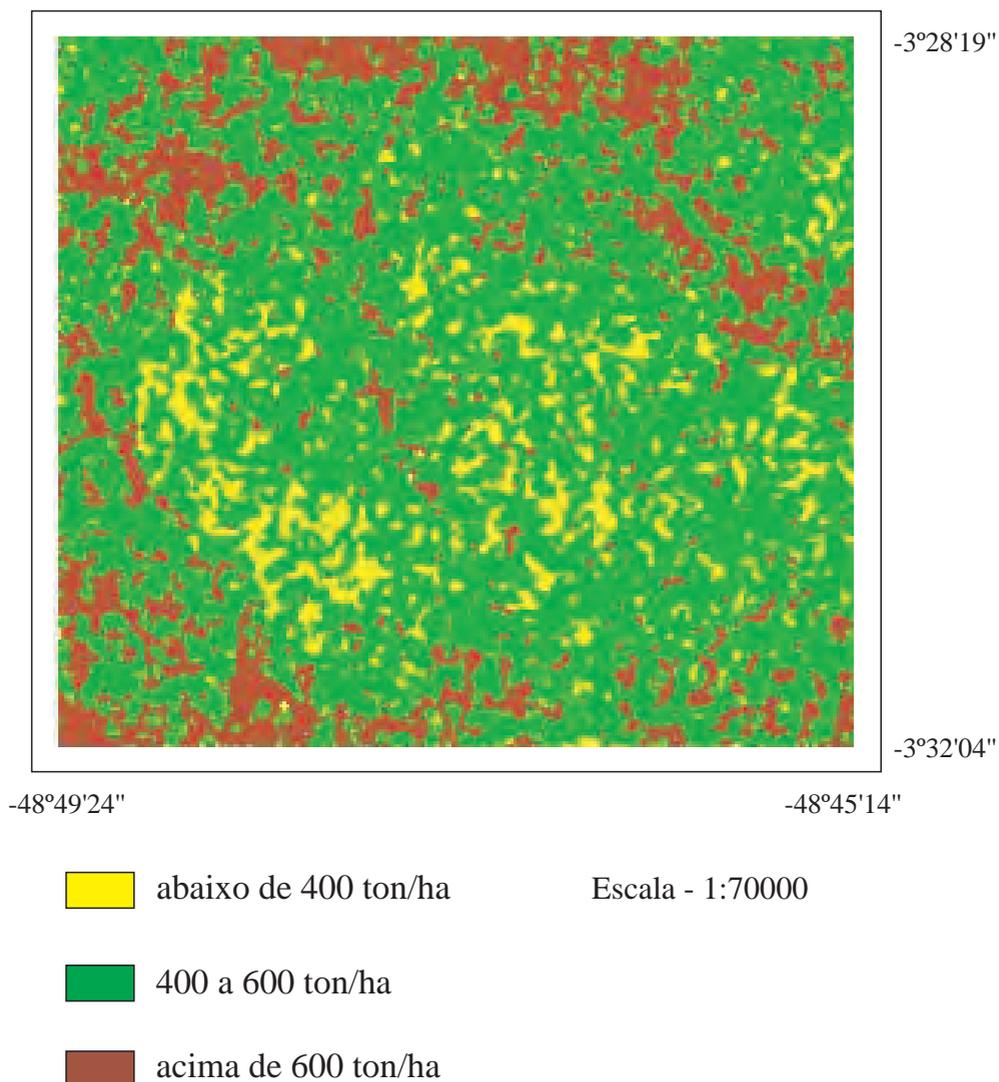


Figura 3 – Mapa da biomassa (BIO) de uma floresta primária, município de Paragominas, Pará, obtido a partir de imagem sintética gerada pela aplicação do modelo:
BIO = 1057,3239-1306,89 NDVI-411,06 REF3

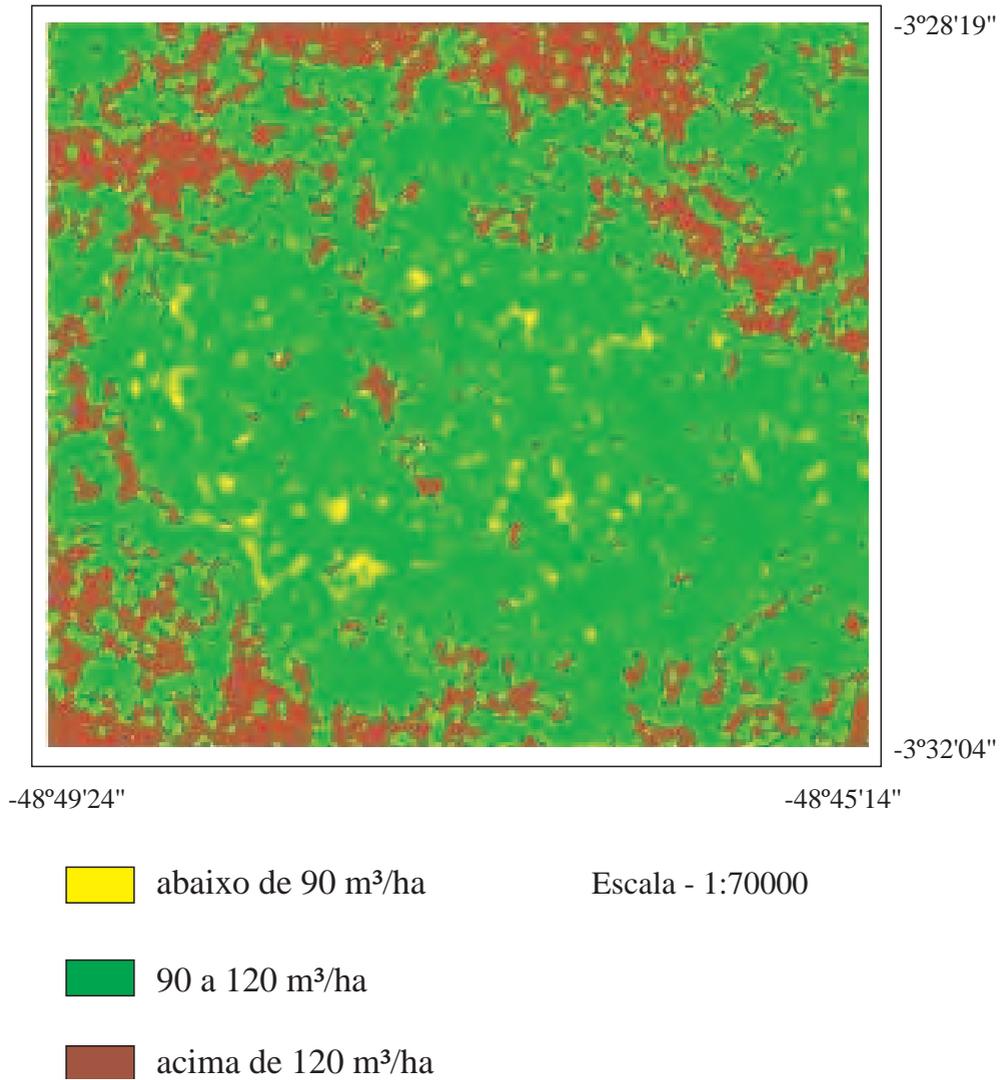


Figura 4 – Mapa do volume (VOL) de uma floresta primária, município de Paragominas, Pará, obtido a partir de imagem sintética gerada pela aplicação do modelo:
VOL= 191,212-186,935 NDVI-24,893 REF4.

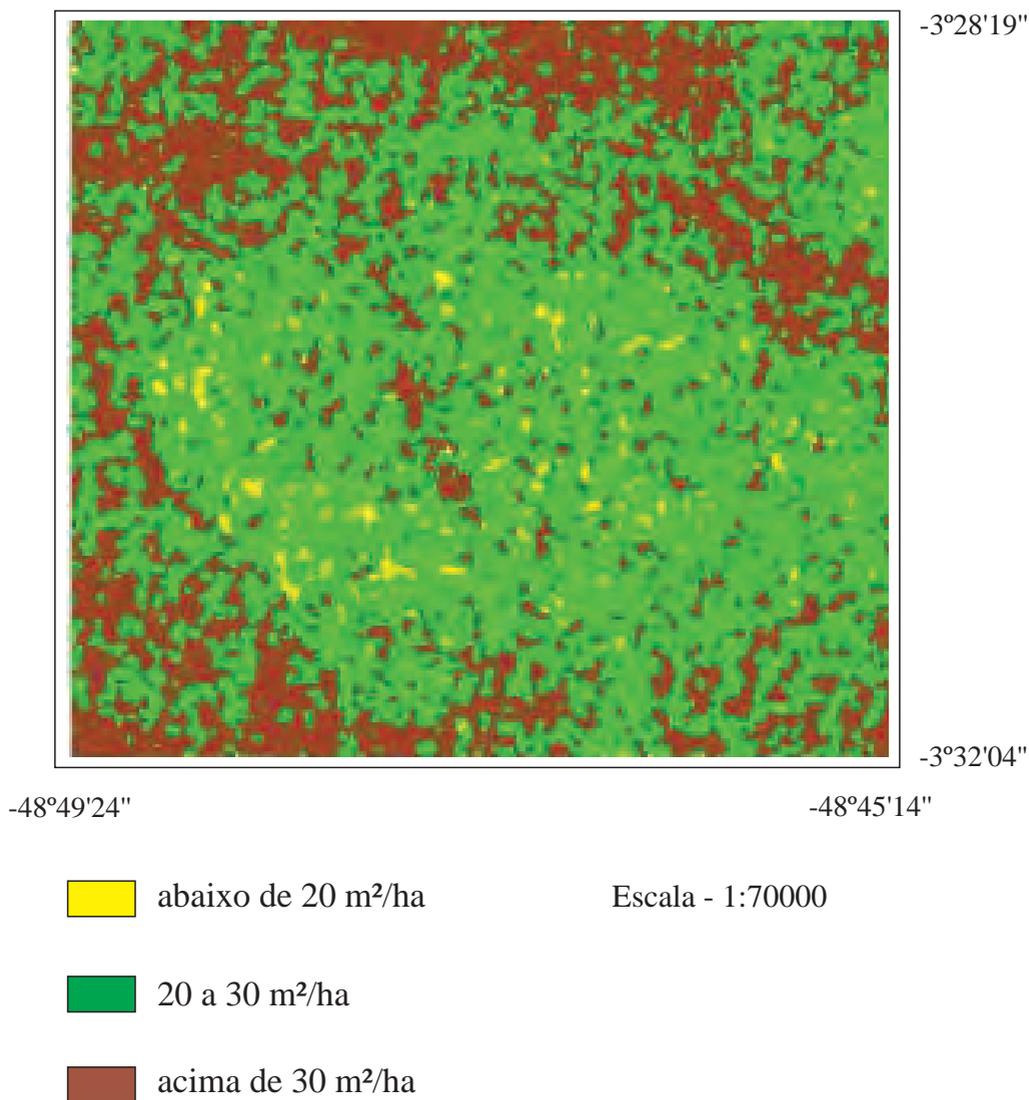


Figura 5 – Mapa da área basal (AB) de uma floresta primária, município de Paragominas, Pará, obtido a partir de imagem sintética gerada pela aplicação do modelo:
AB = 47,8029 - 46,7338 NDVI-6,2234 REF4.

4 CONCLUSÃO

- O índice de vegetação NDVI mostrou-se como bom discriminador, caracterizando bem a heterogeneidade da floresta primária em termos de biomassa, volume e área basal.
- Existe alta correlação negativa entre área basal, biomassa e volume e os valores de NDVI. As variáveis densidade e diversidade de espécies não apresentam forte correlação com nenhuma variável digital estudada, portanto, através das variáveis digitais utilizadas, não é possível estabelecer estimativas de densidade e diversidade através de modelos de regressão com o emprego de imagens do satélite ETM+/LANDSAT- 7.
- A estimativa de parâmetros biométricos, com emprego de imagens do satélite ETM+/LANDSAT- 7, associadas a dados de campo, apresenta-se satisfatória, mostrando que os valores obtidos, a partir da análise das imagens orbitais, propiciam a caracterização da floresta primária em termos de biomassa, volume e área basal.
- A utilização da análise integrada de dados de campo e de dados orbitais pode facilitar, sobretudo, uma análise de possíveis mudanças estruturais que porventura aconteçam nos processos de exploração e conservação de áreas de floresta primária.
- O presente estudo reforça ainda mais o emprego das técnicas de sensoriamento remoto, principalmente em nível orbital, considerando que, atualmente, encontram-se em disponibilidade sensores com melhores resoluções espacial e espectral, que tornam

possíveis avaliações qualitativa e quantitativa mais detalhadas da floresta amazônica.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, L.S. *Análise da cobertura vegetal e de biomassa em áreas de contato floresta/savana a partir de dados TM/LANDSAT e JERS-1*. 1999. 129p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.
- BAIMA, A.M.V.; SILVA, S.M.A. da; SILVA, J.N.M. Equações de volume para florestas tropicais de terra firme em Moju, PA. In: SILVA, J.N.M.; CARVALHO, J.O.P.; YARED, J.A.G. (Ed.): *A silvicultura na Amazônia Oriental - contribuições do Projeto Embrapa/DFID*. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2001. p.367-381.
- BARROS, P. L. C. de. *Estudo fitossociológico de uma floresta tropical úmida no Planalto de Curuá-Una, Amazônia Brasileira*. 1986. 147p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1986.
- 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 do Tapajós - Estado do Pará*. 1998. 97p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1998.
- BROWN, S.; GILLESPIE, A.J.R.; LUGO, A. E. Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science*, v. 35, n. 4, p. 881-902, 1989.

- CARVALHO, A. E. F. B. DE. *Estrutura fitossociológica e pós-estratificação multidimensional de uma área na Flona do Tapajós - Pará*. 1999. 173p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Faculdade de Ciências Agrárias do Pará, Belém, 1999.
- CARVALHO, J.O.P. de. *Análise estrutural da regeneração natural em floresta tropical densa na região do Tapajós no estado do Pará*. 1982. 63p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)- UFPR, Curitiba, 1982.
- COSTA D.H.M.; FERREIRA, C.A. P.; SILVA, J.N.M.; LOPES, J.do C. A.; CARVALHO, J. O. P. *Potencial madeireiro de floresta densa no município de Moju, estado do Pará*. Belém: Embrapa. CPATU, 1998. 33p. (Documentos, 121).
- DANSON, F.M.; CURRAN, P.J. Factors affecting the remotely sensed response of coniferous forest plantations. *Remote Sensing of Environment*, New York, v.43, p.55-65, 1993.
- FRANKLIN, J. Thematic mapper analysis of coniferous forest structure and composition. *International Journal of Remote Sensing*, Abinjdou, v.7, n.10, p.1287-1301, 1986.
- HIGUCHI, N.; SANTOS, J. dos; RIBEIRO, R. J.; MINETTE, L.; BIOT, Y. Biomassa da parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia. *Acta Amazonica*. v.28, n.2, p.153-166, 1998.
- IBGE. *Manual técnico da vegetação brasileira*. Rio de Janeiro, 1992. (Manuais Técnicos em Geociências, n.1).
- KUMAR, R. *Radiation from plants-reflection and emission: a review*. Lafayette: Purdue University, 1972. 88p.
- MACIEL, M. de N. M. *Estimativa de parâmetros estruturais de uma floresta primária na Amazônia Oriental através de dados orbitais*. 2002. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- _____. *Levantamento da cobertura vegetal e estudo fitossociológico da Floresta Nacional de Caxiuanã - PA*. 1998. 118p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Faculdade de Ciências Agrárias do Pará, Belém. 1998.
- MARKHAM, B.L.; BARKER. J.L. *Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures*. Lanham: EDSAT, 1986. 21p. (Landsat Technical Notes, n.1).
- MORAN, E. F.; BRONDIZIO, E.; MAUSEL, P.; WU, Y. Integrating amazonian vegetation, land-use, and satellite data. *BioScience*, v. 44, n.5, p.329-38, 1994.
- OZA, M.P.; SRIVASTAVA, V.K.; PARISWAD, B.S.; SETTY, R.V. Relationship between Landsat MSS data and forest tree parameters. *International Journal of Remote Sensing*, Abinjdou, v.10, n.11, p.1813-1819, 1989.
- PINHEIRO, K. A.O. *Fitossociologia de uma área de preservação permanente na Fazenda Rio Capim, Paragominas – PA*. Belém, 2004.
- SILVA, J.N.M.; LOPES, J. DO C.A.; CARVALHO, J. O. P. DE. *Inventário florestal de uma área experimental na floresta Nacional de Tapajós*. Curitiba: Embrapa – CNPF, 1985. (Boletim de Pesquisa Florestal, 10 / 11).
- SILVA, R. das C. *Contribuição de levantamento de solo a caracterização dos sistemas naturais e ambientais na região de Paragominas – Estado do Pará*. 1997. 107p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – FCAP, Belém, 1997.

SHANNON, C. E.; WEAVER, W. *The mathematical theory of communication*. Urbana: University of Illinois Press, 1949.

SKOLE, D. L.; CHOMENTOWSKJ, W. H.; SALAS, W. A.; NOBRE, A. D. Physical and human dimensions of deforestation in Amazonia. *BioScience*, v. 44, n. 5, p. 314-322, May, 1994.

STATSOFT. *Statistica*. Disponível em: <<http://www.statsoft.com.br/statisti.htm>>. Acesso em: mar. 2001.

WILSON, J. B.; WELLS, T. C.; TRUERNAN, I. C.; JONES, G.; ATKINSON, M.D.; CRAWLEY, M. J.; DOOD, M.E.; SILVERTOWN, J. Are there assembly rules for plant species abundance? An investigation in relation to soil resources and successional trends. *Journal of Ecology*, n. 84, p. 527 – 538, 1996.

ZERBINI, N.J.; SANTOS, J.R. Estimativa de fitomassa aérea em região de floresta tropical com uso de dados TM/Landsat 5 e HRV/SPOT 1. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., 1993, Curitiba. *Anais...*São José dos Campos: INPE, 1993. v. 2.