

Revista Brasileira de Cartografia (2013) N^o 65/3: 541-554
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

ESTIMATIVA DE BIOMASSA EM UMA FLORESTA TROPICAL NO MUNICÍPIO DE MAUÉS – AM, BRASIL

Biomass Estimate in Tropical Forest in Maués – AM, Brasil

**Carlos Henrique Souza Celes¹, Yosio Edemir Shimabukuro²,
Moacir Alberto Assis Campos¹ & Niro Higuchi¹**

**¹Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia INPA
Laboratório de Manejo Florestal LMF**

Av. André Araújo, 2936, Aleixo, 69060-001, Manaus –AM, Brasil
{carlos.celes, moacir.campos, niro}@inpa.gov.br

**²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE
Departamento de Sensoriamento Remoto DSR**

Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
yosio@dsr.inpe.br

*Recebido em 03 de maio, 2013/ Aceito em 17 de novembro, 2013
Received on may 03, 2013/ Accepted on november 17, 2013*

RESUMO

O sensoriamento remoto (SR), sistema de informação geográfica (SIG) e sistema de posicionamento global (GPS) são importantes ferramentas para as diversas etapas de inventários florestais, inclusive para as estimativas de biomassa. O objetivo deste trabalho foi consolidar uma metodologia para a espacialização ou mapeamento das variáveis biofísicas utilizando dados de campo e técnicas de sensoriamento remoto. Os dados de campo foram provenientes do sistema de inventário florestal contínuo (IFC) do laboratório de manejo florestal do Instituto Nacional de Pesquisa na Amazônia (LMF-INPA) na região de Maués (AM). Os dados de sensoriamento remoto foram obtidos de imagens do sensor TM, do satélite Landsat 5, e do modelo digital de elevação (MDE) da missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Foram ajustadas equações e realizadas classificações para as estimativas e espacialização das variáveis biofísicas. A área de estudo obteve uma média de $485,3 \pm 1,9\%$ indivíduos por hectare e de $578,3 \pm 3,4\%$ toneladas de biomassa fresca. As equações ajustadas não apresentaram bom desempenho. O maior R^2 ajustado foi de 0,24 para o volume e a melhor distribuição dos resíduos foi para a Densidade. A espacialização da biomassa foi realizada por meio da classificação *isocluster* da topografia, incluindo a altitude, declividade e curvatura da região. Os estoques estimados para a área de estudo foram de $662,6 \pm 13\%$ e $189,2 \pm 13\%$ milhões de toneladas de biomassa e carbono, respectivamente. A distribuição da biomassa na área de estudo foi heterogênea. Áreas declivosas possuem maior proporção de árvores desenraizadas quando comparadas com, as áreas planas. As clareiras abertas pela queda das árvores favorecem a regeneração que mantém o número de árvores por ha estável, porém com menor área basal e consequentemente menor biomassa. Áreas planas de altitude aproximadamente de 50 m tendem a ter maior biomassa

que áreas planas e mais altas (~90 m). A diferença de biomassa pode estar associada ao menor número de indivíduos por hectares nas áreas altas. O método da classificação não supervisionada *isocluster* da topografia utilizando a altitude, a declividade e curvatura do terreno é um método simples, demanda pouco processamento e explicou bem a variação da biomassa nesta região.

Palavras-chave: Inventário Florestal, Sensoriamento Remoto, Processamento de Imagens, Carbono.

ABSTRACT

The remote sensing (RS), geographic information system (GIS) and global positioning system (GPS) are important tools for the several steps of forest inventories, including biomass estimates. The objective of this work was to consolidate a methodology for mapping or spatialization of the biophysical variables using field data and remote sensing techniques. The field data were available from the continuous forest inventory system (IFC) in Maués (AM) region conducted by the Forest Management Laboratory at the National Institute for Amazonian Research (INPA-LMF). The remote sensing data were obtained from TM sensor of Landsat-5 satellite, and digital elevation model (DEM) of the SRTM mission. It was adjusted the equations and performed the classifications for the estimates and spatialization of the biophysical variables. The study area presented an average of $485.3 \pm 1.9\%$ individuals per hectare and $578.3 \pm 3.4\%$ tons per hectares of fresh biomass. The adjusted equations did not present good performance. The highest adjusted R^2 was 0.24 for the volume and the density presented the best residual distribution. The spatialization of biomass was performed using the *isocluster* classification of the topography, including elevation, slope, and curvature of the region. The extrapolation of the biomass and carbon was $662.6 \pm 13\%$ $189.2 \pm 13\%$ million tons, respectively were estimated for the all study area. The distribution of biomass in the study area was heterogeneous. Sloping area has higher proportion of trees uprooted when compared with the flat areas. The gap open by the fall of trees favors the regeneration that keeps the number of trees per ha, but with less basal area and consequently less biomass. Flat areas of approximately 50 m altitude tend to have more biomass that flat and higher altitude (~ 90 m). The difference in biomass may be associated with the smallest number of individuals per ha in high altitude areas. The *isocluster* unsupervised classification method of the topography using the altitude, slope and curvature of terrain is a simple method, demand little processing and explained the variation of biomass in this region.

Keywords: Forest Inventories, Remote Sensing, Image Processing, Carbon.

1. INTRODUÇÃO

A quantificação da biomassa da vegetação é importante para compreensão dos fluxos de Carbono, principalmente devido ao desmatamento e distúrbio nas florestas. Conhecimento necessário para o entendimento da suscetibilidade das florestas. Há uma demanda para a elaboração de métodos que quantifiquem o Carbono estocado na vegetação (MYNENI *et al.*, 2001; FOODY *et al.*, 2003), para subsidiar projetos para geração de créditos de Carbono, como por exemplo da modalidade REDD (Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal). Esses métodos ainda precisam ser confiáveis, replicáveis e auditáveis para estarem no padrão do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) (IPCC, 2006). O desenvolvimento da geotecnologia ou geoprocessamento no inventário florestal de Carbono é essencial para se alcançar a qualidade necessária em projetos de carbono.

Nas florestas tropicais, 93% da biomassa viva acima do solo se encontra nos indivíduos arbóreos (SILVA, 2007). O Carbono estocado em um ecossistema é quantificado pelas estimativas de biomassa fresca, obtidas pelo método indireto. Neste método são utilizadas equações alométricas específicas para cada região ou habitat nos dados de um inventário florestal tradicional. Entretanto, as dimensões e a complexidade nos levantamentos da vegetação, principalmente na Amazônia, levam os autores que trabalham com biomassa a concordar que os métodos indiretos ainda precisam melhorar (HIGUCHI *et al.*, 2004).

Zerbine *et al.* (1995), Bernardes (1998), Araujo (1999), Matos (2006) e Maciel (2007), geraram equações correlacionando a biomassa em florestas tropicais com dados espectrais do sensor TM do Landsat-5. Os índices de vegetação utilizados nestas estimativas se baseiam em diferenças significativas da relação inversa que existe entre as bandas do vermelho e do

infravermelho próximo no comportamento espectral da vegetação viva, morta e do solo (KUNTSCHIK, 2004) e são frequentemente utilizados por diversos autores. A radiação detectada por um sensor é resultado de uma combinação ou mistura de alvos presentes na superfície terrestre, adicionada a contribuição atmosférica (SHIMABUKURO e SMITH, 1991). Com base neste entendimento, o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) é outra ferramenta de processamento digital de imagens que possibilita estimar a contribuição de cada alvo em um *pixel* (PEREIRA *et al.*, 1998). A análise de texturas baseadas na média e na variância e assim como a classificação não supervisionada isocluster podem ser utilizadas nos ajustes de equações. Entretanto, mesmo com bons resultados, as equações geradas para um específico local utilizando sensores ópticos, não devem ser utilizadas em outros locais ou para diferentes datas de aquisição das imagens (FOODY *et al.*, 2003).

Na Amazônia Central, cerca de 30% da variação espacial da biomassa está relacionada com a textura do solo e com a topografia (LAURANCE *et al.*, 1999; CASTILHO *et al.*, 2006). Os modelos digitais de elevação (MDE) fornecem a altitude do terreno (MDT) ou da superfície (MDS) em forma digital ou de imagem, possibilitando gerar diversos subprodutos como redes hidrográficas, bacias, declividade e classificação das topo sequências. A missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) realizada em 2000, derivou MDE em que os dados digitais possuem grande congruência com dados de elevação medidos em campo, (SCHIETTI *et al.*, 2007), com potencial para serem empregados em diversos estudos. Por exemplo na modelagem da erosão do terreno (Salgado *et al.*, 2012). Elmiro *et al.* (2006) indica o potencial dos dados do SRTM para futuros estudos que envolve a determinação do volume e cálculo de biomassa da floresta.

O trabalho de Salimon *et al.* (2011) demonstra como pode ser simples a espacialização dos estoques de carbono no Estado do Acre. As diferentes fitofisionomias mapeadas no projeto RADAM são utilizadas para o cálculo das médias das 44 parcelas existente entre as diferentes fisionomias. Já Saatchi *et al.* (2010),

utilizando imagens de LIDAR de satélite, na região das microondas e óptica, associadas a amostras de campo, elaboraram um mapa de estoque de carbono mundial. É muito difícil uma comparação direta dos trabalhos devido à escala e método, mas em ambos, os autores trabalham com estratificação das fisionomias utilizando dados espaciais para realizar as estimativas. Salimon *et al.* (2011) aponta para as lacunas nos dados de campo e Saatchi *et al.* (2007) deixa bem claro que o desafio em se calcular a biomassa ou carbono para toda a Amazônia é a falta de um sistema de parcelas padronizadas e bem distribuídas para a realização das estimativas de biomassa em campo.

A utilização de dados de campo padronizados e de técnicas de geoprocessamento são necessários para a elaboração de um projeto de carbono que atenda as exigências do IPCC. O estudo de Keller *et al.* (2001) demonstra que 21 amostras de 0,25 ha são mais adequadas do que parcelas maiores, com a mesma área amostrada para as estimativas da biomassa por equações alométricas. Os Inventários florestais contínuos (IFC) do Laboratório de Manejo Florestal (LMF-INPA) cobrem grandes extensões em diversos pontos do estado do Amazonas com mais de duas mil parcelas alocadas. Somada a grande disponibilidade de imagens de sensores remotos como a do TM Landsat-5 e MDE do SRTM é possível elaborar um método para as estimativas de carbono para a floresta Amazônica. O presente trabalho teve como objetivo consolidar um método para a espacialização ou mapeamento das variáveis biofísicas em uma floresta tropical no município de Maués-AM, Brasil utilizando os dados acima apresentados.

2. METODOLOGIA DO TRABALHO

A área de estudo compreende os rios Paraconi, Apoquetaua e Parauari no município de Maués no estado do Amazonas próximo à divisa com o estado do Pará (Figura 1). Apresenta o predomínio do Latossolo Amarelo Distrófico (Oliveira *et al.*, 2006) e da Floresta Ombrófila Densa de terras baixas (VELOSO *et al.*, 1991). O clima “Am” da classificação de Köppen-Geiger, (“A”) megatérmico, em que o mês mais frio é acima dos 18°C com (“m”) precipitações anuais acima dos 1500 mm mais um período com

precipitação mensais menores do que 60 mm, (KOTTEK *et al.*, 2006). Apesar do período de menor precipitação, a situação é de ausência de um período biologicamente seco (VELOSO *et al.*, 1991).

2.1 Dados de campo - Inventário Florestal (IF)

Os dados de campo são provenientes de três inventários florestais, dois realizados na Floresta Nacional (FLONA) de Pau Rosa, no mês de fevereiro de 2009 e agosto de 2011, e um na Floresta Estadual (FLOREST) de Maués no mês de maio de 2010. O método de inventário florestal consistiu na abertura de uma picada na qual as parcelas de 20 m x 125 m são alocadas sistematicamente, na forma de transectos e de conglomerados. Um receptor de GPS, Modelo GPSmap 60CSx da Garmim, foi empregado para registro da localização das parcelas. Para isto foram coletados dois pontos por parcela, sendo um no início e outro no final da parcela. A quantidade de parcelas com pontos de GPS foi de 57, 46 e 74 em cada inventário, totalizando 177 parcelas.

Todos os indivíduos arbóreos vivos, com DAP maior ou igual a 10 cm foram mensurados com uma fita diamétrica. Cada árvore também foi identificada pelo seu nome popular e coletas botânicas foram realizadas para análise no herbário do INPA. Foi realizada também a cubagem das árvores, caídas naturalmente ou derrubadas, para o ajuste de uma equação volumétrica. Também foi feito o cálculo da altura dominante, tendo em vista a correção da equação de biomassa.

A Área Basal (AB), o volume comercial (VOL), a biomassa fresca total (BIO), densidade (DENS) e o número de indivíduos foram calculados para cada parcela. No cálculo do volume foram utilizadas as equações ajustadas com os dados da cubagem das madeiras caídas para cada inventário (Tabela 1). No cálculo da biomassa fresca total, foi utilizada a Equação 1 ajustada por Silva (2007) para a região de Manaus. Esta foi corrigida por um fator “*fc*” (Equação 2) que utiliza a altura dominante (Hdom) da floresta. Segundo Silva (2007) o conteúdo de Carbono é obtido pela retirada do teor de água (41,6%) e multiplicando-se a massa

seca pelo teor de Carbono (48,9%), resultando na Equação 3.

$$BIO = 2,7179 \times DAP^{1,8774} \times fc \quad (1)$$

$$fc = \frac{Hdom_{inv}}{Hdom_{ref}} \quad (2)$$

$$C = BIO \times 0,2855 \quad (3)$$

Em que: BIO é biomassa, C é Carbono, *fc* é a razão entre as alturas dominantes do sítio inventariado ($Hdom_{inv}$) e do sítio da equação ($Hdom_{ref} = 28,6$ m). Neste caso, como a variável altura dos indivíduos em pé é de difícil mensuração, a altura dominante é a média da altura de 20% das árvores caídas com maior DAP (Tabela 1).

2.2 Dados de sensoriamento remoto

Os dados das 6 bandas na região óptica do sensor TM do satélite Landsat-5 foram utilizados e obtidos gratuitamente pela USGS (*United States Geological Survey*). Estes dados possuem um padrão de correção geométrica pelo terreno, produto “L1T”. A imagem selecionada possui órbita/ponto 229/63 e data de aquisição 17/08/2011, com menor cobertura de nuvens. A segunda fonte de dados foi o Modelo Digital da Elevação (MDE) derivado da missão SRTM da NASA realizado em fevereiro de 2000 (USGS, 2004). Estes dados também estão disponibilizados pela Embrapa CNPM (Miranda, 2005), para todo Brasil. As imagens MDE selecionadas foram SA-21-Y-D e SB-21-V-A, de acordo com a nomenclatura de cartas correspondentes. Outra fonte de dados utilizada foram os vetores elaborados pelo projeto PRODES-INPE, que possui as área de hidrografia, do desflorestamento, das áreas de vegetação não florestal e das áreas de floresta.

Todos os dados tiveram suas projeções ajustadas para UTM Zona 20 S, Datum WGS84. Nas 6 bandas TM foi aplicada o modelo MODTRAN 4 da ferramenta FLAASH, disponível no *software* ENVI, para atenuar o efeito da atmosfera. O FLAASH converte os valores do número digital previamente transformados para radiância em valores de refletância de superfície. Em seguida foram

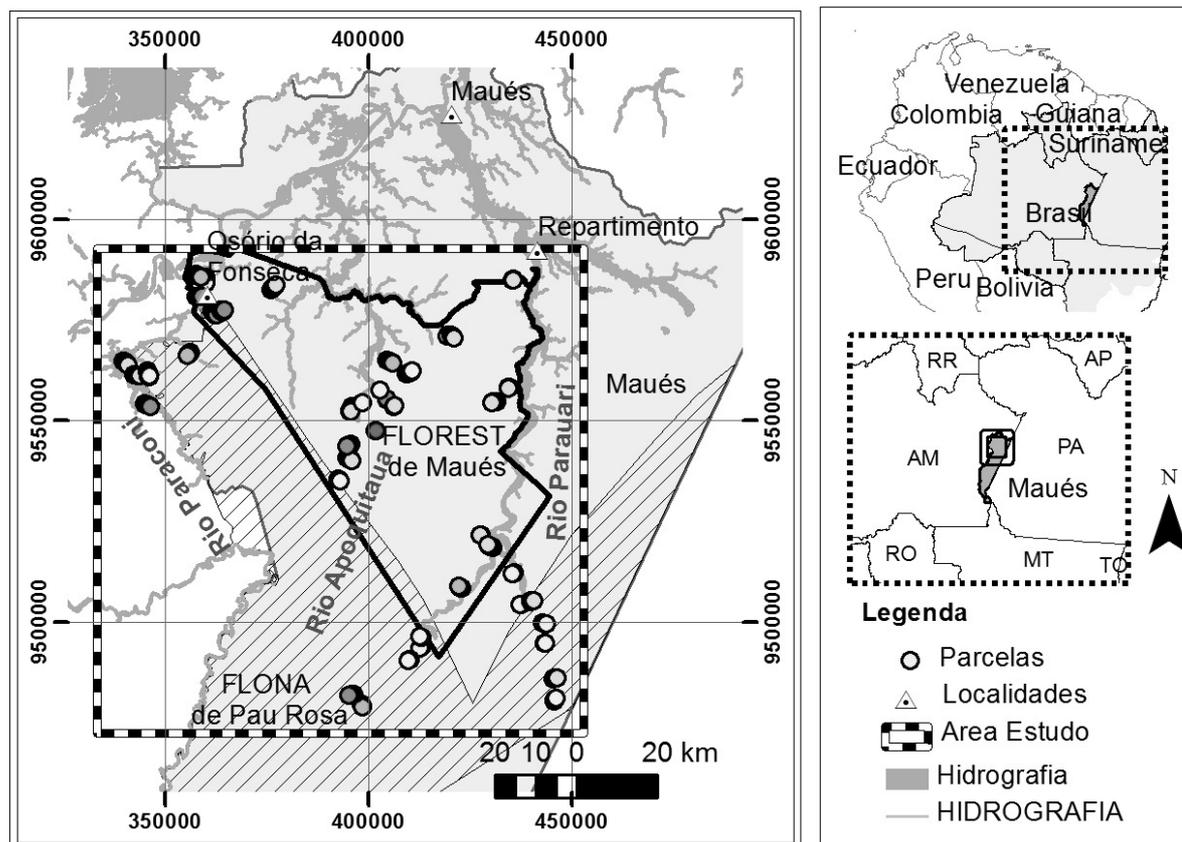


Fig. 1 - Localização das parcelas alocadas na FLONA de Pau Rosa e na FLOREST de Maués.

Tabela 1 - Equações de volume, número de árvores cubadas (N), altura dominante do sítio inventariado ($H_{dom_{inv}}$) e fator de correção para biomassa (fc) dos Inventários Florestais.

Mês/Ano	Inventário	Equação VOL	N.	$H_{dom_{inv}}$	fc
fev/09	FLONA de Pau Rosa	$VOL= 0,000567 * DAP^{2,1462}$	303	30,2	1,0559
mai/10	FLOREST Maués	$VOL= 0,000740 * DAP^{2,068801}$	202	30,4	1,0629
ago/11	FLONA de Pau Rosa	$VOL=0,000695 * DAP^{2,050465}$	162	28,6	1

calculados sete índices de vegetação: Razão simples (SR), Índice de Vegetação por diferença normalizada (NDVI), Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), Índice de Vegetação realçado (EVI), Índice de Umidade por Diferença Normalizada (NDWI), Índice de Vegetação Triangular (TVI) e Transformação Kauth-Thomas (Brightness (B), Greenness (G), and Wetness (W)) (Jensen, 2009). A análise de mistura espectral foi aplicada utilizando as 6 bandas espectrais do TM para produzir as imagens fração vegetação, solo e sombra. Os *endmembers* puros foram determinados pelas curvas

espectrais (*Z-profiles*) mais características de cada *endmembers* na imagem estudada.

A declividade (DECLI) e curvatura (CRUVA) do terreno foram geradas a partir do MDE do SRTM. Uma classificação não supervisionada *isocluster* foi aplicada nas 6 imagens-reflectância, com 100 (ISO_100) diferentes classes para uma classificação com valores contínuo e 20 (ISO_20) diferentes classes para cada classe ter aproximadamente 10 parcelas. Utilizando as três imagens derivadas do SRTM (MDE, DECLI e CRUVA) também foi aplicado o *isocluster* em 20 diferentes classes

(ISO_SRTM). A análise de textura com matriz de ocorrência 3 x 3 e 5 x 5 células, calculando a média, a variância, o desvio padrão, a soma e a amplitude dos *pixels* também foi aplicada para todas as imagens originais e derivadas. Todas as imagens foram sobrepostas aos centróides das parcelas e o valor do pixel coincidente foi coletado para cada parcela.

2.3 Análise estatística

A primeira investigação foi o ajuste de equações para o melhor entendimento das relações entre as variáveis biofísicas e as variáveis derivadas de sensores remotos. As equações foram ajustadas considerando as variáveis biofísicas como variáveis dependentes e todas as imagens originais e derivadas como as variáveis independentes. O algoritmo *Stepwise backward* foi utilizado para escolha das variáveis independentes mais significativas. Os parâmetros para seleção das variáveis independentes foram: valor de tolerância maior do que 0,5, afim de evitar a multicolineariedade e valor de *p* maior do que 0,05 para remoção das variáveis menos representativas. Os valores de tolerância foram sendo mais restritos até a obtenção de 3 a 4 variáveis independentes por equação. Na análise do ajuste, verificou-se a distribuição dos resíduos, a ANOVA da regressão, o R², o erro padrão da estimativa absoluto e relativo.

A segunda investigação foi utilizando o método de classificação não supervisionada da área e cálculo da média das variáveis biofísicas para cada classe. Neste caso foi utilizado somente as imagens ISO_20 e ISO_SRTM. O primeiro ISO_20 são as Classes espectrais de 1 a 20 e o segundo ISO_SRTM são classes topográficas de 1 a 20. As médias da biomassa foram plotadas em um gráfico para observação do comportamento dessas variáveis. Estas estimativas foram

posteriormente utilizadas para a espacialização da biomassa, e os dados do PRODES-INPE auxiliaram no isolamento das áreas de hidrografia, de desflorestamento e da vegetação não florestal da área de floresta. As classes topográficas que não possuíam mais de 4 parcelas formaram a classe intitulada - sem dado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O inventário na FLONA de Pau Rosa em 2009 e o inventário na FLOREST Maués obtiveram valores semelhantes das variáveis biofísicas. Já o inventário em 2011 na FLONA, região de maiores altitudes, mostrou-se com menores valores das variáveis biofísicas (Tabela 2). Assim como o valor da Altura dominante que foi menor na região com a topografia mais movimentada (Tabela 1).

Keller *et al.* (2001) encontraram uma biomassa de 372 t/ha para a Floresta Nacional de Tapajós, trabalhando com biomassa acima do solo, para DAP>35 cm. Higuchi *et al.* (1993) ajustaram um modelo de biomassa na Estação Experimental de Silvicultura Tropical (EEST) a 50 km de Manaus e aplicando a equação obtida estimaram a biomassa em duas regiões, uma no sul do Pará e outra no sul de Roraima, obtendo 306,8t/ha e 377,4t/ha, respectivamente para DAP>25. Considerando as diferenças no método do cálculo da biomassa empregado por estes autores e o do presente estudo, os valores encontrados são promissores. O trabalho de Lima (2010), avaliando o Sistema de Inventário Florestal Contínuo (IFC) do LMF-INPA, apresenta uma lista de 16 sítios no Estado do Amazonas em diferentes fisionomias, topografias e condições edáficas. Os valores de biomassa encontrada pelo autor varia entre 404 t/ha em uma área manejada de Lábrea à 687 t/ha em uma área

Tabela 2 - Variáveis número de árvores e" 10 cm de DAP (DENS), Área basal (G), Volume Comercial (VOL) e Biomassa total (BIO), da FLONA de Pau Rosa nos anos de 2009, 2010, 2011 e média.

Data	DENS(n/ha)	G (m ² /ha)	VOL(m ³ /ha)	BIO (t/ha)
2009	493 ± 2,90%	27 ± 6,00%	336,6 ± 6,70%	629,3 ± 5,40%
2010	490 ± 2,90%	24,9 ± 5,00%	301,4 ± 5,20%	594 ± 4,60%
2011	468 ± 4,00%	21,7 ± 6,60%	229,3 ± 6,70%	490 ± 6,10%
Total	485 ± 1,9%	24,8 ± 3,6%	294 ± 4,2%	578,3 ± 3,4%

preservada na estação experimental de manejo florestal do INPA em Manaus. Considerando que as parcelas em Maués também estão em diferentes condições topográficas as médias da biomassa deste estudo foram similares aos encontrados por Lima (2010).

3.1 Análise das regressões

A equação para a variável Volume foi a que obteve o maior coeficiente de determinação e menor erro padrão da estimativa ($R^2 = 0,26$ e $EPE\% = 24,5$); seguido pela Área Basal (G) com $R^2 = 0,21$ e $EPE\% = 21,5$; Biomassa com $R^2 = 0,19$ e $EPE\% = 20,6$; e Densidade com $R^2 = 0,07$ e $EPE\% = 12,5$. Os valores de tolerâncias das variáveis independentes são altos, indicando que não há multicolineariedade. O comportamento semelhante entre as variáveis G, VOL, e BIO era esperado, entretanto as imagens escolhidas para as equações foram diferentes (Tabela 3). As imagens da análise de textura, tanto da média, como da variância, foram frequentes nas equações. Mas neste caso, as regiões com maiores variâncias estão na porção da topografia mais movimentada. As variáveis texturas, variância, desvio e amplitude apresentaram coeficiente negativos em todas as equações (Tabela 3), demonstrando a tendência das áreas principalmente inclinada de possuir maior proporção de árvores mortas desenraizadas, devido principalmente a maior exposição ao vento e baixa qualidade de ancoragem, devido ao movimento lento do solo, mesmo que haja alta proporção de argila (TOLEDO, 2009) resultando em um menor estoque de biomassa na área.

Apesar da significância das equações, elas explicam muito pouco a variação da dependente em todas as equações. A distribuição dos resíduos da densidade foi a que apresentou os menores valores. Variando entre $\pm 40\%$ do valor estimado. A variação dos resíduos foi maior para outras variáveis, chegando $\pm 70\%$ das estimativas. A distribuição dos resíduos (Figura 2), colabora para justificar o baixo desempenho no ajuste das equações lineares.

O resultado dos ajustes foram mais baixos que os encontrados por Araújo (1999), Bernardes (1998) e Matos (2006). Entretanto, as diferenças metodológicas precisam ser analisadas. No trabalho do primeiro autor foram amostradas áreas de floresta primária e secundária e de savanas em Roraima para o ajuste das equações. Encontrou-se uma equação linear entre a biomassa e o SAVI com um R^2 de 0,74. Foi determinado também que o índice SAVI diminui de 0,47 para 0,36 na floresta secundária, após determinado ponto de maturidade da floresta secundária. O trabalho de Bernardes (1998) também fez uso de floresta primária e secundária, em diferentes estágios de sucessão na FLONA do Tapajós. Apesar do autor também encontrar boas relações se considerar somente os dados de florestas primária o comportamento do ajuste da equação pode ser bem diferente, como se pode inferir dos gráficos de Bernardes (1998). Matos (2006), trabalhando na região de Manaus, obteve equações ajustadas para diferentes tamanhos de parcelas. O R^2 decaiu com o aumento da área, indo de 0,546 para uma área de 400 m², $R^2 = 0,451$ para área de 900 m² e $R^2 = 0,24$ para área de um hectare. A tendência é

Tabela 3 - Equações ajustadas de cada uma das variáveis biofísicas, com os respectivos valores de coeficiente, tolerância e probabilidade das variáveis independentes.

DENS=445,3+0,4443.B1_REF_MEAN_3X3-0,1954.ERRO_MMS_VAR_3X3+7,219.SLOPE_MEAN_5X5					
Tolerância	0,89	0,99	0,89		
P	0,015	0,035	0,011		
G=63,10-27,48.EVI_MEAN_3X3-0,000093.B_CAP_VAR_5X5+0,1018.ALT-0,9491.SLOPE_SD_5X5					
Tolerância	0,83	0,96	0,81	0,92	
P	0,00000	0,013	0,0011	0,036	
VOL=419,3+1,502.B1_REF_MEAN_5X5-6,426.SR+0,363.T_CAP_MEAN_3X3-4,002.ISO_RANG_5X5					
Tolerância	0,94	0,92	0,90	0,98	
P	0,00000	0,013	0,039	0,011	
BIO=1831.3-695.358.EVI_MEAN_5X5-0,61193.T_CAP_MEAN_3X3-6,9373.ISO_RANG_5X5					
Tolerância	0,914	0,917	0,99		
P	0,00000	0,0349	0,0079		

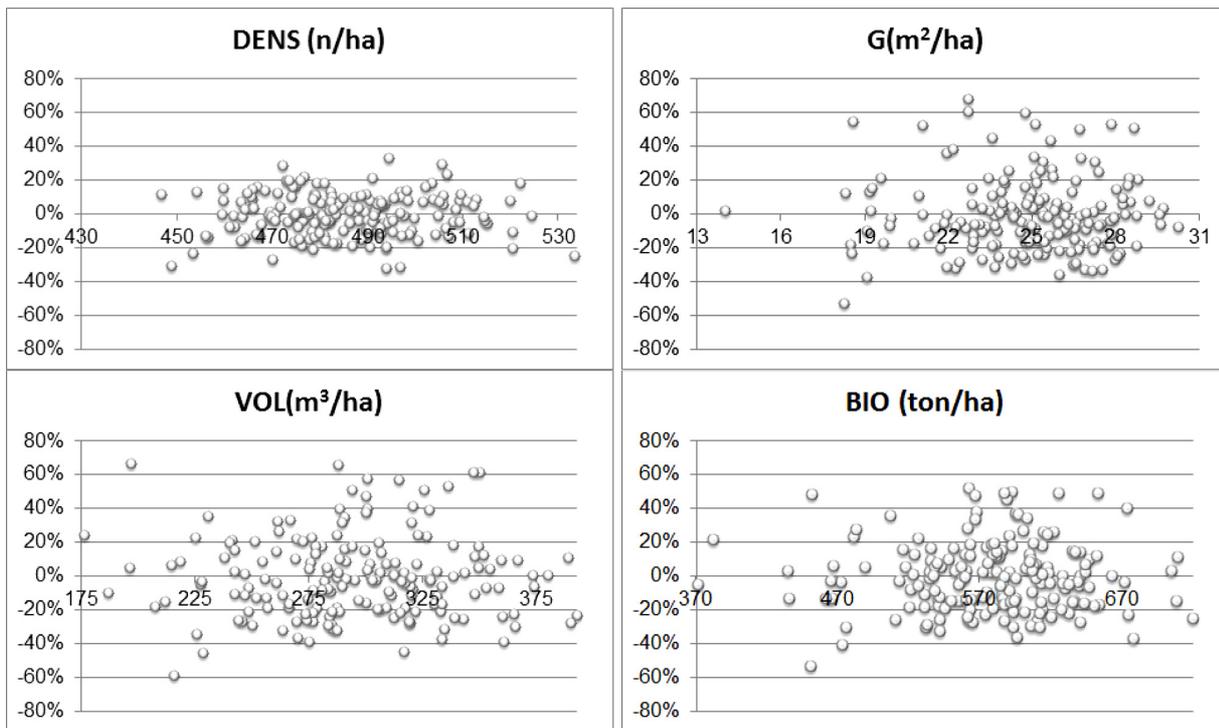


Fig. 2 - Gráficos dos resíduos das equações ajustadas pelo método *Stepwise* para as variáveis Densidade (DENS), Área Basal (G), Volume (VOL) e Biomassa (BIO).

aumentar a área amostrada e diminuir o desvio padrão da variável de interesse, o que influencia o R^2 no ajuste das equações. Uma diferença metodológica foi na utilização de diferentes equações diferentes para estimativas de biomassa. O R^2 para área de 1 ha foi semelhante aos R^2 encontrados pelas equações que melhor se ajustaram neste trabalho.

Os fatores que influenciam no ajuste das equações são: a mistura espectral dos alvos presente na área do pixel, 90 m², a pouca variância dos dados espectrais e das variáveis biofísicas, a qualidade do sensor TM do Landsat-5, e a função de distribuição bidirecional da reflectância (BRDF – do inglês, *bidirectional reflectance distribution function*) (TOIVONEN *et al.*, 2006). Somada a perda de radiação devido a atmosfera entre outros, são fatores que precisam ser superados, para melhorar a precisão das estimativas de biomassa com sensores óticos.

3.2 Espacialização

O número de parcelas por classes espectrais e topográficas foram variadas. As classes topográficas obtiveram maior número de classes com mais de 4 parcelas em cada uma (Figura 3-A), enquanto que as classes espectrais possuíam somente seis classes com mais de 4

parcelas. A variação espectral da floresta é menor que a variação topográfica por isso as classes topográficas obtiveram maior número de classes com parcelas.

As classes espectrais 18 e 12 possuem valores de biomassa mais baixos (Figura 3-C). A classe 18 representa as feições nas imagens correspondentes às florestas secundárias e das regiões de maior iluminação por causa da topografia, assim como algumas florestas de igapó com dossel fechado e plantios. A classe espectral 12 representa área florestada nas regiões sombreadas do relevo que se confundem com campinaranas e florestas de igapó com dossel mais aberto (água preta aparente). Entretanto a média da biomassa pelas classes espectrais não representa a espacialização da biomassa pela área de estudo.

A média da biomassa pelas classes topográficas (Figura 3-D) apresenta um comportamento interessante. Uma equação polinomial de terceira ordem chega a explicar 75% da variação da biomassa. Nota-se ainda que quando o terreno é declivoso a tendência é de possuir menor biomassa (Figura 3-E). Enquanto que para a variável densidade a tendência geral é de diminuir o número de indivíduos com o aumento das classes topográficas (Figura 3-B).

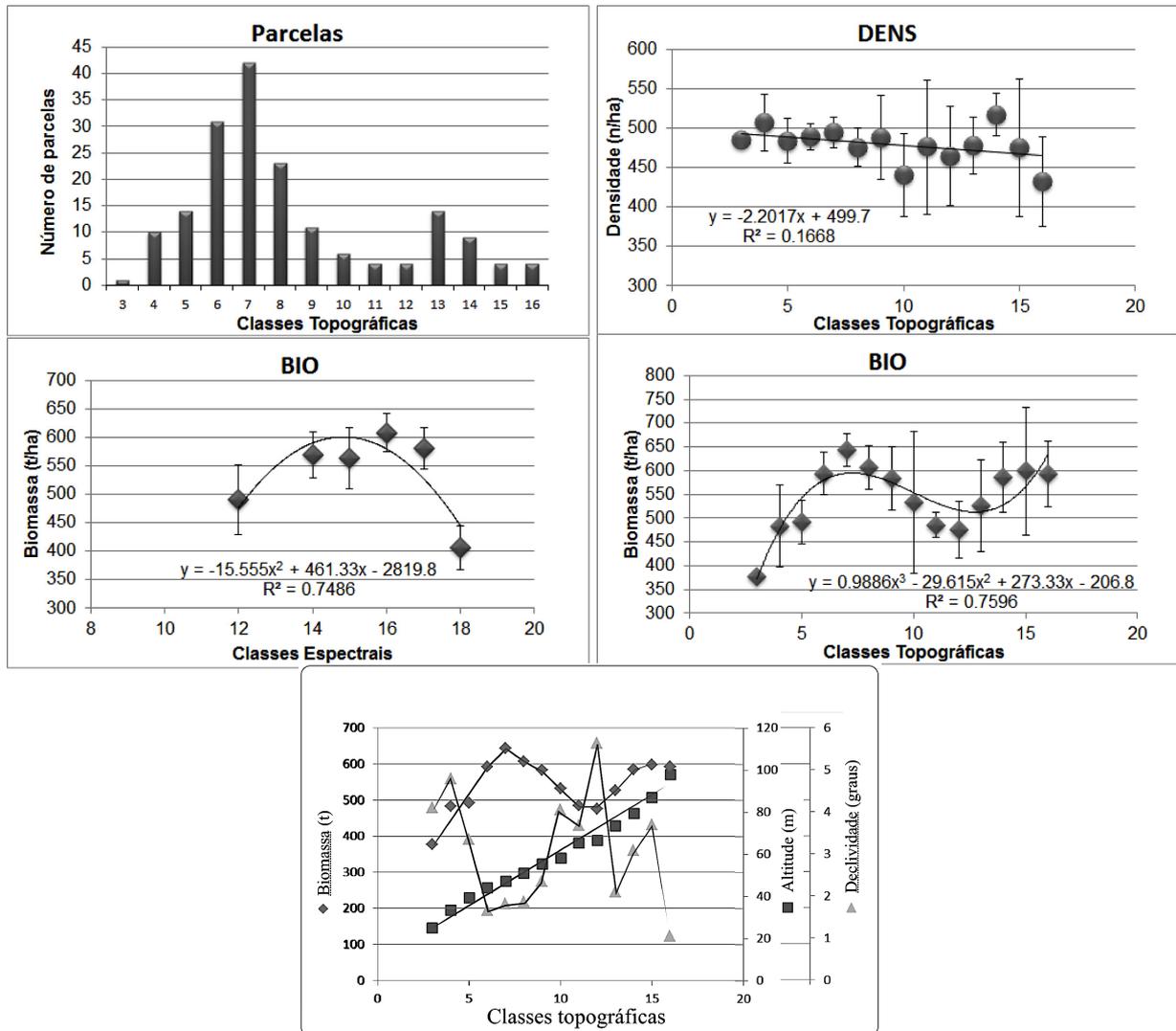


Fig. 3 - Gráficos: (A) números de parcelas e (B) número de árvores por classes topográficas; (C) biomassa por classes espectrais; (D) biomassa por classes topográficas; e (E) Relação da biomassa com a altitude e declividade por classes topográficas para a região de Maués.

Logo a menor biomassa nas classes com maiores declividades não possui relação direta com menor número de indivíduos e sim com a área basal.

As classes topográficas mostram duas regiões bem distintas, sendo uma de topografia mais suave na porção noroeste e outra mais movimentada a sudeste. Na região mais suave, a biomassa vai crescendo à medida que se afasta dos rios até alcançar as porções mais altas com as menores incertezas (Figura 4). Quando a altitude e a declividade do terreno ficam mais acentuadas a biomassa diminui. A biomassa volta a aumentar quando chega nas áreas altas de platô ou chapadões, mais próximo dos divisores d'água na porção sudeste onde a topografia é mais movimentada, com as maiores incertezas (Figura 4). As áreas com altitude maior do que 100 metros

não foram amostradas. Empiricamente podemos realizar uma extrapolação nestas regiões mais altas considerando que a média da biomassa não deve ser estatisticamente diferente da média das últimas classes, entretanto uma verificação de campo nesta região é importante pois são regiões de difícil acesso, podendo representar uma floresta com estrutura singular, devido a sua conservação.

Os estoques de biomassa e carbono para a área de estudo, que possui total de 14,4 mil km² e uma área de floresta amostrada de 11,6 mil km² foi de 662,5 e 189,2 milhões de toneladas, respectivamente (Tabela 4). O estoque total da área de estudo pela classificação foi menor que pela simples extrapolação do valor médio da variável biomassa (672,9 milhões de

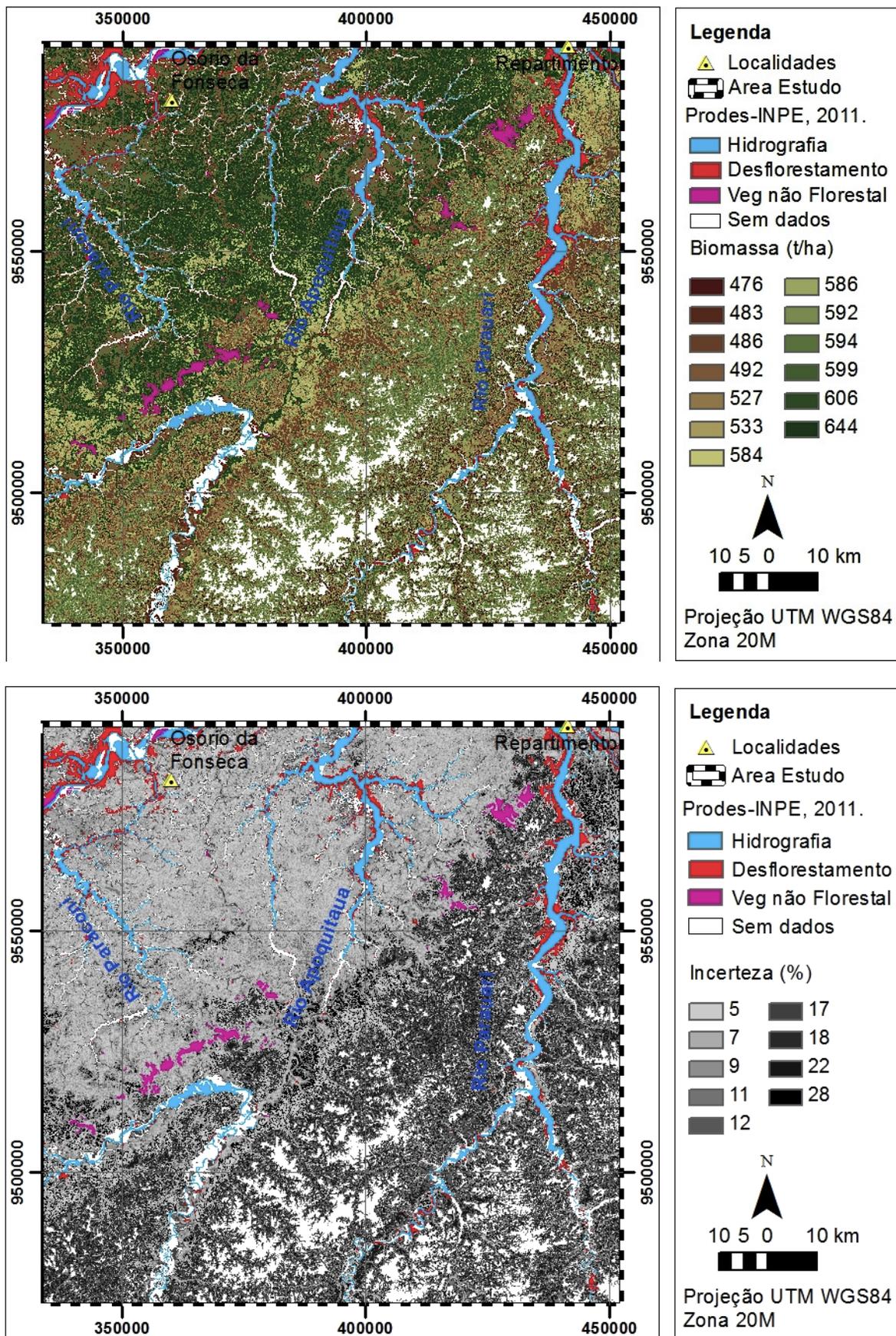


Fig. 4 - Estimativas e incertezas da média do estoque de biomassa por classes topográficas.

Tabela 4: Estoques médios de Biomassa e Carbono e suas incertezas para a floresta da área de estudo.

Categorias	BIO(t/ha)	N. Pixels	Área (ha)	BioT (10 ⁶ t)	Carb T (10 ⁶ t)	Incerteza
		(92,2 ² m ²).				($\alpha = 0,05$)
Hidrografia		74.891	63.664			
Desflorestamento		44.680	37.982			
Não floresta		11.875	10.095			
Floresta Sem dados		193.616	164.590			
Floresta	476	53.005	45.059	21,447	6,123	± 12.5%
Floresta	483	57.602	48.967	23,65	6,752	± 17.7%
Floresta	486	87.773	74.614	36,262	10,352	± 5.4%
Floresta	492	98.495	83.729	41,194	11,761	± 9.4%
Floresta	527	80.984	68.843	36,28	10,358	± 18.2%
Floresta	533	90.565	76.988	41,034	11,715	± 28.1%
Floresta	584	104.145	88.532	51,702	14,761	± 11.4%
Floresta	586	93.994	79.903	46,823	13,367	± 12.5%
Floresta	592	109.374	92.977	55,042	15,714	± 11.6%
Floresta	594	139.021	118.180	70,198	20,041	± 7.7%
Floresta	599	119.339	101.448	60,76	17,349	± 22.4%
Floresta	606	153.284	130.304	78,964	22,544	± 7.4%
Floresta	644	181.247	154.075	99,224	28,328	± 5.4%
	Total	1.693.890	1.439.949	662,594	189,17	

toneladas) para uma mesma área. Esta diferença foi de 10 milhões de toneladas de carbono, aproximadamente 1,48% do estoque de carbono da área. A vantagem da classificação é a utilização desta informação para projetos menores, subsidiando os planos de manejo das unidades de conservação de acordo com o carbono estocado. Esta estimativa espacializada de biomassa pode ser utilizada juntamente com os dados de desmatamento para a elaboração das linhas de base em um projeto de carbono.

4. CONCLUSÕES

A distribuição da biomassa na área de estudo foi heterogênea. Áreas declivosas possuem maior proporção de árvores desenraizadas quando comparadas com, as áreas planas. A clareira aberta pela queda de árvores favorece a regeneração que mantém o número de árvores por ha estável, porém com menor área basal e conseqüentemente menor biomassa. Áreas planas e baixas (altitude média de 50 metros) tendem ter maior biomassa que áreas planas mais altas (~90 metros), neste estudo de caso. A diferença de biomassa pode

estar associada ao menor número de indivíduos por hectares nas áreas altas.

A biomassa apresenta comportamento polinomial de 3 e a classe topográfica chegou a explicar 75% da variação da Biomassa, volume comercial, e área basal. Enquanto que a densidade apresentou fraca relação linear.

O método da classificação não supervisionada *isocluster* da topografia utilizando a altitude, a declividade e a curvatura do terreno é um método simples, demanda pouco processamento e explicou bem a variação da biomassa nesta região.

A replicação deste método em outras áreas, com os mesmos tipos de dados de campo e imagens pode ser executada devido ao método de IFC consolidado e a disponibilidade de imagens gratuitas do SRTM e Landsat TM. Este fato é importante para a definição da aplicabilidade do método para uma região similar ou de maior tamanho.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos às pessoas envolvidas diretamente nos inventários de campo, que com

muita coragem, permanecem durante um mês inteiro dentro da floresta. Às instituições LMF, INCT, CADA, INPA, INPE, CNPQ, FAPEAM, ICMbio, CEUC-AM que viabilizam a execução destes inventários. Muito importante lembrar de agradecer o papel dos comunitários que vivem nestas regiões, além do suporte logístico e o contato social que fortalecem a importância da conservação da floresta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, L. S. D. **Análise da cobertura vegetal e de biomassa em áreas de contato floresta/savana a partir de dados TM/LANDSAT e JERS-1.**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1999. Dissertação de Mestrado, 129pp.

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.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1998 Dissertação de mestrado, 97 pp.

CASTILHO, C. V.; MAGNUSSON, W. E.; ARAÚJO, R. N. O.; LUIZÃO, R. C.; LUIZÃO, F. J.; LIMA, A. P.; HIGUCHI, N.. Variation in aboveground tree live biomass in a central Amazonian forest: effects of soil and topography. **Forest Ecology and Management**,. v. 234, p. 85-96, 2006.

ELMIRO, M. A. T.; DUTRAL, V.; MURA, J. C.; SANTOS, J. R.; FREITAS, C. da C. Valiação de dados de altimetria da floresta amazônica baseados nas tecnologias insar, LIDAR e GPS. **Revista Brasileira de Cartografia**. v.58 n.03 p. 233-246, 2006.

FOODY, G. M.; BOYD, D. S.; CUTLER, M. E. J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. **Remote Sensing of Environment**,. v.85 n.4 p. 463-474, 2003.

HIGUCHI, N.; CHAMBERS, J.; SANTOS, J.D.; RIBEIRO, R.J.; PINTO, A.C.M.; SILVA, R.P.D.; ROCHA, R.D.M.; TRIBUZY, E.S. Dinâmica e balanço do carbono da vegetação primária da Amazônia central. **Floresta**, v.34 n. 3 p. 295-304, 2004.

HIGUCHI, N.; SANTOS, J.M.D.; IMANAGA, M.; YOSHIDA, S. Aboveground biomass estimate for Amazonian dense tropical moist forests. **Memoirs of the Faculty of Agriculture, Kagoshima**, v. 30 n.39 p. 3-54., 1993.

IPCC. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme**, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. 2006

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres.**, São José dos Campos SP, Parêntese, 2009.

KELLER, M.; PALACE, M.; HURTT, G. Biomass estimation in the Tapajos National Forest, Brazil. Examination of sampling an allometric uncertainties. **Forest Ecology and Management**, v.154 p. 371-382, 2001.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorol. Z.** v.15, n.3, p. 259-263. Jun. 2006.

KUNTSCHIK, G. **Estimativa de biomassa vegetal lenhosa em cerrado por meio de sensoriamento remoto óptico e de radar.** Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 154 pp. 2004

LAURANCE, W. F.; FEARNSIDE, P. M.; LAURANCE, S. G.; DELAMONICA, P.; LOVEJOY, T. E.; RANKIN-DE-MERONA, J. M.; CHAMBERS, J.; GASCON, C. Relationship between soils and Amazon forest biomass: a landscape-scale study. **Forest Ecology and Management**, v. 118, p. 127-138, 1999.

LIMA, A. J. N. **Avaliação de um Sistema de Inventário Florestal Contínuo em áreas manejadas e não manejadas do Estado do Amazonas (AM).** Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia, Manaus, Tese de Doutorado, 183p, 2010..

MACIEL, M.D.N.M.; BASTOS, P.C.D.O.; WATRIN, O.D.S. Estimativa de parâmetros estruturais de uma floresta primária no Município de Paragominas - Pará, através de dados orbitais.

In: *XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.*, **Anais**. p. 1725-1732, 2007

MATOS, F. D. D. A. **Estimativas 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**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Tese de Doutorado, 147 p. 2006.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevô**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 30 jul. 2012

MYNENI, R.B.; DONG, J.; TUCKER, C.J.; KAUFMANN, R.K.; KAUPPI, P.E.; LISKI, J.; ZHOU, L.; ALEXEYEV, V.; HUGHES, M.K. A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests. **PNAS**, v. 98 n. 26, p. 14784-14789, 2001.

OLIVEIRA, V.Á.D.; SOUZA, C.G.; MACEDO, E.L.D.R.; SILVA, R.D.C.; SILVA, G.B.; RIOS, A.J.W.; FRAGA, A.G.C.; OLIVEIRA, V.D.; VIEIRA, P.C.; SHIMIZU, S.H.; COSTA, N.L.D.; FORTUNATO, A.F.; BOTELHO, R.G.M.; DARIVA, T.A.; AZEVEDO, W.P.D.; LIMA, E.D. Manuais técnicos em geociências: Divulga os procedimentos metodológicos utilizados nos estudos e pesquisas de geociências. Manual técnico de Pedologia. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, Rio de Janeiro. 2006

PEREIRA, J. L. G.; BATISTA, G. T.; THALES, M. C.; ROBERTS, D.A. Proporção de componentes derivadas de imagens Landsat TM para caracterização da cobertura da terra na Amazônia. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Santos. **Anais**. p. 495-1504, 1998.

SAATCHI, S.S.; HOUGHTON, R.A., ALVALÁ, R.C.S.; SOARES J.V.; YU, Y. Distribution of aboveground live biomass in the amazon basin. **Global Change Biology**, v.13, p. 816-837, 2007.

SAATCHI S.S.; HARRIS, N. L.; BROWN, S.; LEFSKY, M.; MITCHARD, E.T. A.; SALAS, W.; ZUTTA, B. R.; BUERMANN, W.; LEWIS, S. L.; HAGEN, S.; PETROVA, S.; WHITE, L.; SILMAN, M. E.; MOREL, A. Benchmark map of

forest carbon stocks in tropical regions across three continents. **PNAS**. v.108 n.24 p.9899–9904, 2010.

SALIMON, C. I., PUTZ, F. E., MENEZES-FILHO, L., ANDERSON, A., SILVEIRA, M., FOSTER BROWN, I., OLIVEIRA, L.C. Estimating state-wide biomass carbon stocks for a REDD plan in Acre, Brazil. **Forest Ecology and Management**. v.262, p.555-560. 2011.

SALDADO, M. P. G.; FORMAGGIO, A. R.; RUDORFF, B. F. Valiação dos dados srtm aplicados à modelagem do fator topográfico da USLE. **Revista Brasileira de Cartografia**. v.64 n.004 p. 429-442, 2012.

SCHIETTI, J.; DRUCKER, D.; KEIZER, E.; CARNEIRO FILHO, A.; MAGNUSSON, W. 2007. Avaliação do uso de dados SRTM para estudos ecológicos na Amazônia central. *XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil, **Anais**, p. 6949-6955, 2007.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v.29 n.1 p.16-20, 1991.

SILVA, R. P. D. **Alometria, Estoque e Dinâmica de biomassa de floresta primária e secundária na região de Manaus (AM)**. Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA) / Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Manaus, Tese de doutorado, 152 p. 2007.

TOIVONEN, T.; KALLIOLA, R.; RUOKOLAINEN, K.; MALIK, R.N. Across-path DN gradient in Landsat TM imagery of Amazonian forests: A challenge for image interpretation and mosaicking. **Remote Sensing of Environment**. v.100, p.550-562., 2006.

TOLEDO, J. J. **Influência do solo e topografia sobre a mortalidade de árvores e decomposição de madeira em uma floresta de terra-firme na Amazônia central**. Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA) Manaus, Tese de doutorado 85 p. 2009

USGS, Reprocessing by the GLCF, 2004, (1, 3, 30) Arc Second SRTM Elevation, Reprocessed to GeoTIFF, College Park, Maryland: The Global Land Cover Facility, Version 1,0.

VELOSO, H.P.; OLIVEIRAFILHO, L.C.; VAZ, A.M.S.D.F.; LIMA, M.P.M.D.; Marquete, R.; Brazão, J.E.M. *Manual técnico de vegetação brasileira*. IBGE, Rio de Janeiro. 92 p. 1991.

ZERBINI, N.J.; ANGELO, H.; SANTOS, J.R. Relações entre parâmetros de fitomassa, dendrométricos, espectrais e altimétricos na Amazônia Brasileira. *Árvore, Viçosa-MG*, v.19, n.2, p.71-189, 1995.