

## **Análise da variação espacial da biomassa por imagens SAR simuladas para o MAPSAR (Multi-Application Purpose SAR) em uma floresta de terra-firme da Amazônia Central**

Taise Farias Pinheiro<sup>1</sup>  
João Viane Soares<sup>1</sup>  
Camilo Daleles Rennó<sup>1</sup>  
Annette Pic<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{taise, viane, annette}@ltd.inpe.br  
camilo@dpi.inpe.br

**Abstract.** Structural variation in the upland forest of the Central Amazon is related to the relief and the proximity of the drainage network which results in different vegetation types. The objective of this project is to characterize upland forest vegetation types using topographic information of SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), vegetation information displayed in SAR images, and floristic inventory data. The research area is located in the Asu Basin which is about 80 km north of Manaus. The floristic inventory was collected from five transects (from the plateau until the lowland area). Diameter at breast height data were collected to estimate biomass using allometric equations. Texture attributes to the HH, HV and VV polarization and vegetation indices were calculated for the same areas. Considering the biomass, no differences were found among the upland phytophysionomies. There are indications that HV polarization is adequate to explain biomass.

**Palavras-chave:** MAPSAR, spatial variation biomass, Central Amazon, MAPSAR, variação espacial da biomassa, Amazônia Central.

### **1. Introdução**

Na Amazônia as estimativas de biomassa variam amplamente, e são atribuídas à pequena ou incompleta medida de biomassa, às diferenças metodológicas que dificultam a comparação dos dados e a fatores naturais relacionados à micro-variações nas propriedades do solo e topografia, Laurance et al (1999), Houghton et al. (2001), Nascimento e Laurance (2002), Castilho, (2004). Na Amazônia Central fatores topográficos, edáficos e hidrológicos são variáveis que influenciam a estrutura das florestas de terra-firme pela sua influência sobre a configuração espacial das espécies e sobre o crescimento diferencial dos indivíduos, Klinge e Rodrigues (1973), Kahn e Castro (1985), Clark et al. (1999), Castilho (2004).

A distribuição espacial destes fatores abióticos na paisagem origina três fitofisionomias denominadas platô, vertente e baixio, que diferem quanto à riqueza e composição de espécies, abundância de indivíduos e estrutural vertical e horizontal. As áreas de baixio localizam-se nas planícies aluviais ao longo dos igarapés, compreendendo solos arenosos, encharcados somente com as chuvas e não pelo represamento de água, Ranzani (1980), Bravard e Righi (1989), Ribeiro et al. (1999). Embora sua fisionomia varie bastante em função do nível e do tempo de alagamento, em geral apresentam um sub-bosque dominado por palmeiras acaules e ervas de áreas encharcadas, dossel com altura entre 20 e 35m e poucas árvores emergentes, Ribeiro et al. (1999). Os platôs são áreas altas e planas onde são encontrados solos argilosos bastante drenados e pobres em nutrientes, Chauvel (1982), Bravard e Righi (1989). Estão presentes árvores de dossel com altura entre 35 e 40m e emergentes que podem atingir alturas superiores à 45m. As vertentes são áreas de transição que, embora apresentem espécies endêmicas, são fisionomicamente mais semelhantes aos platôs nas partes mais altas e aos baixios nas partes mais baixas, sendo que a transição vertente-baixio é muito mais evidente, Hopkins (2005).

Considerando estas particularidades estruturais dos ambientes da terra-firme, espera-se que estas florestas apresentem estoques de biomassa diferenciados, o que tornaria um erro considerar a terra-firme como um ambiente fisionomicamente único em estudos para estimativa de biomassa. Por suas características, as áreas de baixio apresentariam menor biomassa e as áreas de platô maior biomassa devido à densidade de árvores de dossel, responsáveis por grande parte da biomassa acima do solo de uma floresta, Nascimento e Laurance (2002), Castilho (2004). Uma vez que grande parte das estimativas não considera a variação da biomassa ao longo da paisagem, Nascimento e Laurance (2002), espera-se que o particionamento da floresta de terra firme em fitofisionomias ajude a refinar as estimativas de biomassa para Amazônia.

O radar topográfico SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) representa uma fonte de dados de grande importância para auxiliar o particionamento dos ambientes, pois indica a estrutura do relevo. Associado a este fato, a caracterização biofísica da vegetação por uma fonte constante de dados disponíveis para grandes áreas seria essencial para o refinamento das estimativas de biomassa para Amazônia. As imagens disponibilizadas pelo MAPSAR (Multi-Application Purpose SAR) têm grande potencial para qualificar e quantificar florestas com diferenças estruturais, pois, por ser um sensor ativo, não necessita de luz solar para o imageamento e não sofre com a permanente cobertura de nuvens na região. Além disso, suas especificações em banda L, multipolarizada e polarimétrica, com alta resolução espacial (10 m), constituem uma fonte inédita de imagens que podem incrementar as informações adquiridas dos ambientes florestais. Dessa forma, o objetivo é verificar como os dados do SAR aerotransportado de simulação do MAPSAR (Multi-Application Purpose SAR) se relacionam com a biomassa e com a estrutura vertical e horizontal da floresta em áreas com solos permanente ou sazonalmente encharcados até áreas com pouca influência do lençol freático.

## 2. Material e métodos

### 2.1 Área de estudo

A microbacia do igarapé Asu é uma unidade espacial mínima, dentro do sistema hidrográfico da bacia do Cuieiras, com cerca de 500 ha, **Figura 1**. Está inserida na Estação Experimental de Silvicultura Tropical do INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia) situada a 80 Km ao norte de Manaus-AM (2° 36' S e 60° 12' O). O igarapé Asu é um igarapé de 2° ordem, por ser um riacho de cabeceira, formado pela confluência de dois igarapés de 1° ordem, segundo o ordenamento de drenagem de Strahler. O material original dos solos encontrado na área que compreende a bacia do rio Cuieiras é composto pelos sedimentos terciários do Grupo Barreiras (Alter do Chão) que são, nesse caso, essencialmente constituídos de minerais resistentes à alteração, tais como caulinita, quartzo, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, Ranzani (1980), Sombroek (2000). A altitude da região varia entre 40 e 100m, Oliveira e Amaral (2004), e o relevo é caracterizado por platôs de pequena extensão, variando entre 500 e 1000 m, localmente dissecados pela rede hidrográfica e ligados por vertentes convexas aos vales planos, chamados baixios, Chauvel (1982). O clima é quente e úmido, caracterizado por uma temperatura média anual oscilando entre 25,6° C e 27,6° C, com precipitação anual entre 1.355 e 2.839 e umidade relativa do ar variando de 84 a 90% ao longo do ano, Oliveira e Amaral (2004). Há ainda alternância de uma longa estação úmida, entre dezembro e maio e uma estação seca que ocorre entre agosto e novembro. A cobertura vegetal da região é caracterizada como uma típica floresta tropical úmida de terra-firme, fisionomicamente distinta entre florestas de platô, vertente e baixio, **Figura 2**.

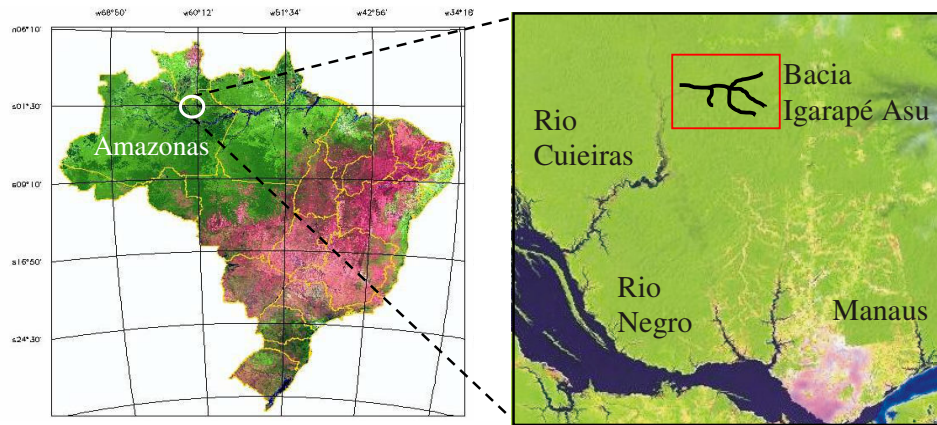


Figura 1: Localização da Microbacia do Igarapé Asu, Amazonas - AM

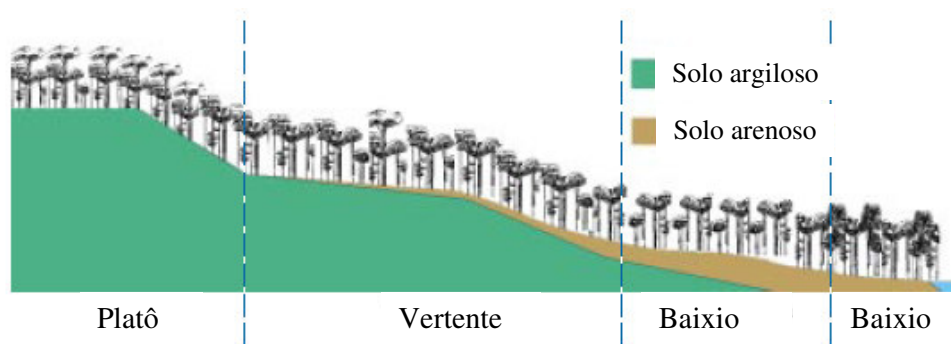


Figura 2: Unidades topográficas típicas da região Amazônica (Adaptado de Ribeiro et al. 1999)

## 2.2 Metodologia

Utilizando como base o modelo digital de elevação (MDE) do SRTM, cinco transectos foram marcados transversalmente aos baixios, de forma a percorrer a variação de declividade do terreno. Cada transecto alcançou 20m de largura com extensão variando de acordo com o tamanho do gradiente topográfico, totalizando 19 ambientes (7 platôs, 7 vertentes e 5 baixios). Nestes transectos, realizou-se o inventário florístico incluindo todos os indivíduos com diâmetro à altura do peito (DAP)  $\geq 10$  cm. O DAP foi utilizado para a estimativa da biomassa por meio de equações alométricas desenvolvidas pelo método direto em áreas de platô de latossolo amarelo na própria Bacia do Igarapé Asu, Higuchi et al. (1998). Um fator de 0,6 foi inserido à equação para conversão da biomassa de peso fresco para peso seco, assumindo que o peso seco do tronco corresponde à cerca de 60% de seu peso fresco e o peso seco da copa corresponde à 58% do seu peso fresco, Castilho (2004).

$\ln \text{ PF} = -1,754 + 2,665 \ln \text{ DAP}$ , para árvores com  $5 \text{ cm} > \text{DAP} < 20 \text{ cm}$ ;

$\ln \text{ PF} = -0,151 + 2,17 \ln \text{ DAP}$ , para árvores com  $\text{DAP} \geq 20 \text{ cm}$ ,

onde,  $\ln$  = logaritmo natural, PF = peso fresco acima do solo em kg e DAP = diâmetro à altura do peito em cm

Para as mesmas áreas, foram extraídos atributos de texturas da imagem multipolarizada do SAR aerotransportado contendo informações sobre a distribuição espacial dos níveis de cinza para cada fitofisionomia, utilizando o sistema Texture, Rennó et al. (1998). A textura

reflete a frequência de variação dos níveis de cinza na imagem que pode estar relacionada à estrutura do ambiente florestal. Estas medidas encontram-se agrupadas em três conjuntos de atributos, Oliveira et. al (2005): atributos distribucionais, que não levam em conta a distribuição espacial dos níveis de cinza; atributos baseados na matriz de co-ocorrência dos níveis de cinza, que consideram a dependência espacial entre os níveis de cinza; e a autocorrelação espacial, que levam em conta a relação entre os pixels de uma imagem, atribuindo um valor de autocorrelação para cada relação de vizinhança. Índices de vegetação também foram utilizados como parâmetros para estimativa de biomassa, Pope et al. (1994): o índice BMI (*Body mass index*) relacionado à biomassa ( $BMI=VV+HH/2$ ) e o índice CSI (*Canopy structure index*) relacionado à estrutura do dossel ( $CSI=VV/VV+HH$ ). Das imagens-índice resultantes, extraiu-se o nível digital médio para cada fitofisionomia, para as mesmas áreas onde foi realizado o inventário florístico, utilizando o sistema Texture.

### 2.3 Análise dos dados

Para testar se os ambientes de platô, vertente e baixio diferiam quanto à biomassa obtida em campo por equações alométricas utilizou-se a Análise de Variância (ANOVA). A biomassa obtida em campo foi relacionada às medidas de textura para cada polarização separadamente e em conjunto por Regressões múltiplas. Da mesma forma, os valores médios do nível de cinza adquirido pelos índices de vegetação foram utilizados como variável explicativa da biomassa na Regressão simples.

## 3. Resultados

### 3.1 Biomassa entre fitofisionomias

A diferença de biomassa entre os ambientes de platô, vertente e baixio não foi estatisticamente diferente ( $F= 0,85$ ,  $g.l= 2$ ,  $p= 0,44$ ). A biomassa média por ambiente foi de 317 ton/ha nas áreas de platô, 281 ton/ha nas áreas de vertente e 321 ton/ha nas áreas de baixio, **Figura 3**.

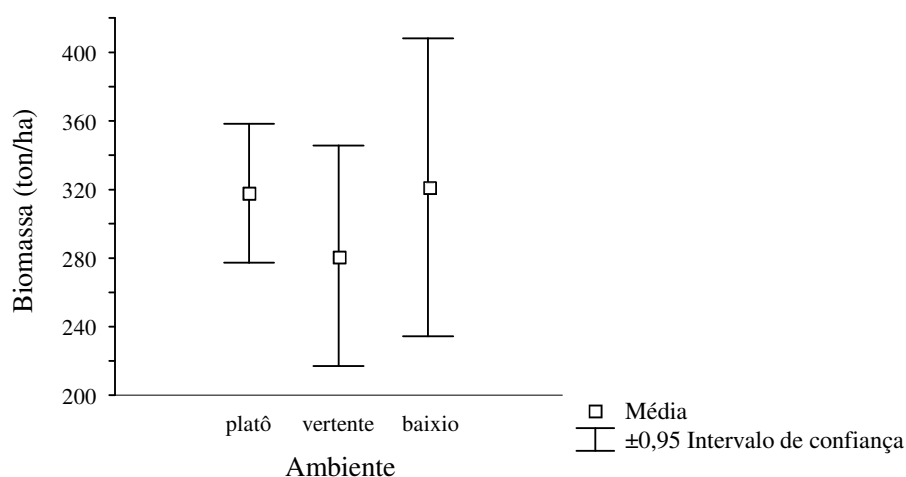


Figura 3: Variação da biomassa obtida em campo por equações alométricas entre as unidades topográficas da Bacia do Igarapé Asu, Amazônia Central.

### 3.2 Atributos de textura

Foram encontradas relações significativas entre as medidas de textura extraídas das imagens HV e VV e os dados de biomassa obtidos em campo para todas as fitofisionomias. Para polarização HV, a energia do vetor diferença e a variância do vetor soma foram atributos de co-ocorrência selecionados pelo modelo, explicando 59 % da biomassa ( $R^2= 0,59$ ;  $p<0,001$ ), **Figura 4A**. Para a polarização VV o atributo entropia, classificado como uma medida de textura distribucional, explicou 31% da biomassa de campo obtida pelas equações alométricas ( $R^2= 0,31$ ;  $p=0,01$ ), **Figura 4B**. Para a polarização HH, o atributo chi-quadrado, classificado como uma medida de textura de co-ocorrência, teve uma relação marginalmente significativa com a biomassa obtida para as fitofisionomias ( $R^2= 0,20$ ;  $p=0,57$ ), **Figura 4C**. A análise conjunta dos atributos de textura em todas as polarizações indicou que a polarização HV é a mais adequada à predição da biomassa. Os atributos escolhidos nesta análise foram os mesmos obtidos com a regressão múltipla realizada apenas com a imagem HV.

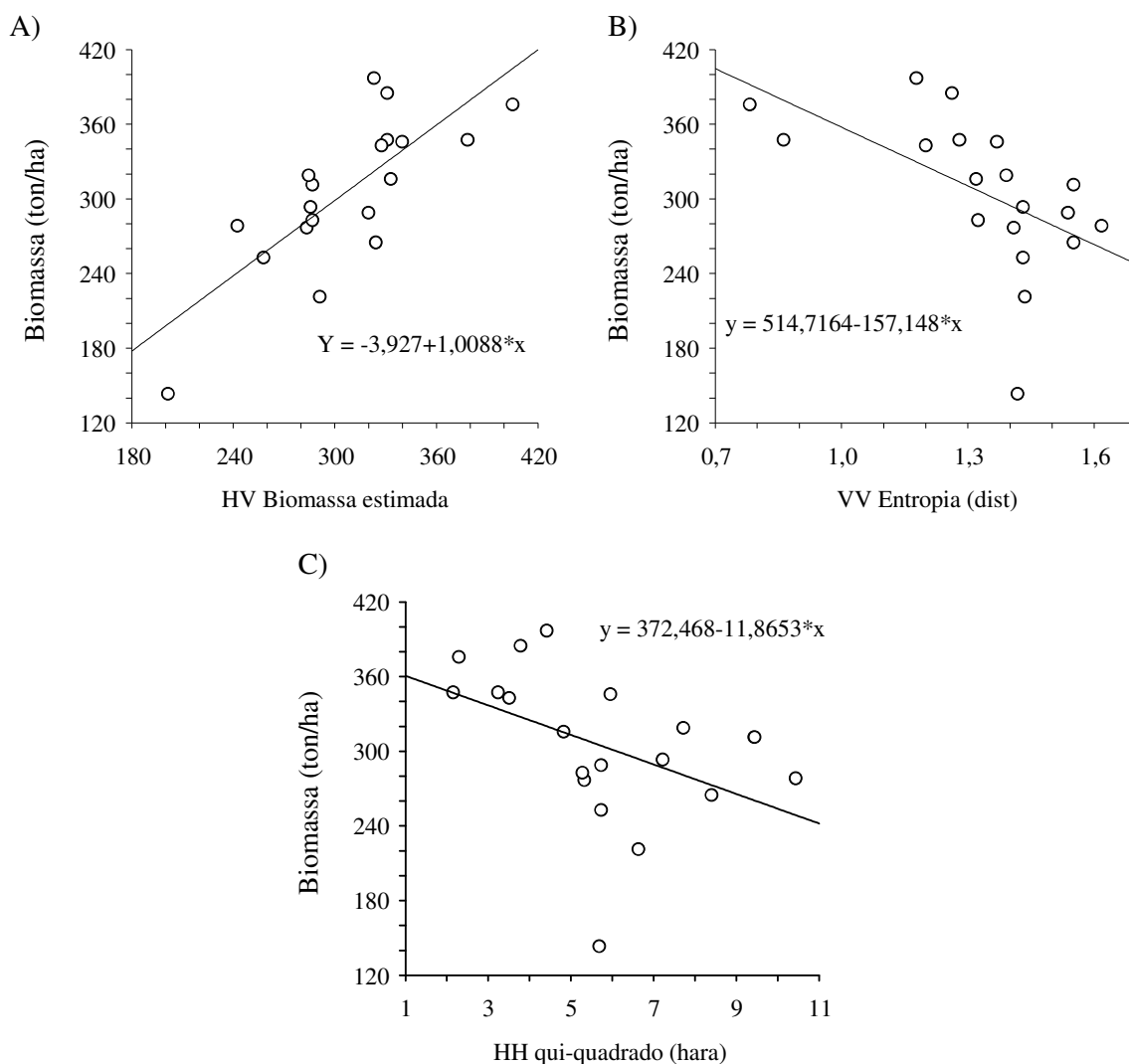


Figura 4: Relação entre atributos de textura e a biomassa obtida em campo para as três fitofisionomias. A) atributo qui-quadrado na polarização HH; B) atributo diferença do vetor energia e soma do vetor variância na polarização HV; C) atributo entropia na polarização VV.

### 3.3 Índices de vegetação

A regressão entre a biomassa de campo e o índice de vegetação CSI, relacionado à estrutura do dossel, não foi significativa ( $R^2 = 0,096$ ;  $p=0,19$ ), **Figura 5A**. Da mesma forma, não foram encontradas relações significativas entre a biomassa de campo e o índice de vegetação BMI, relacionado à biomassa ( $R^2 = 0,099$ ;  $p=0,19$ ), **Figura 5B**.

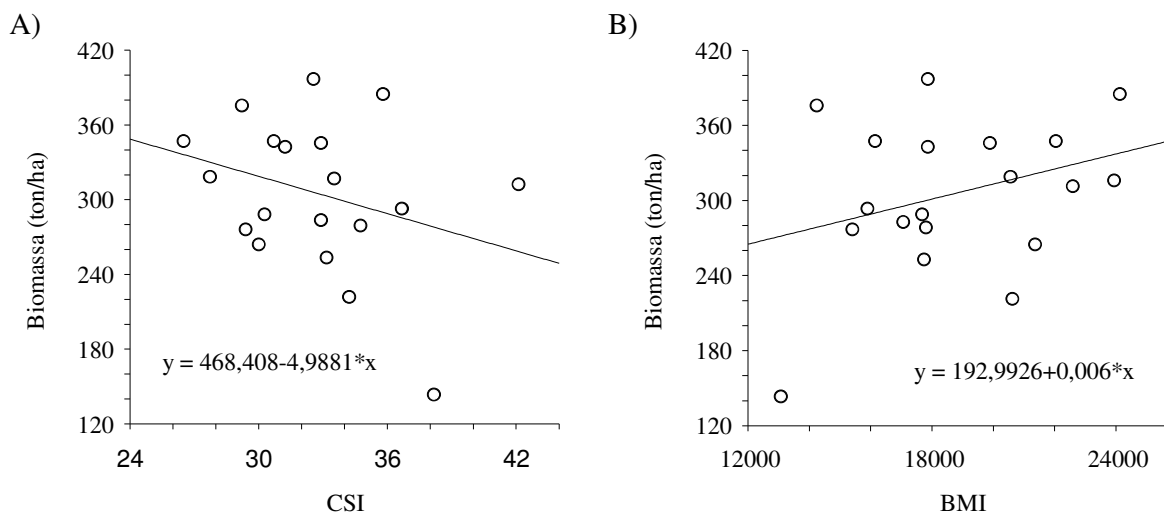


Figura 5: Relação entre os valores médios de níveis de cinza extraídos das imagens-índice de vegetação e a biomassa obtida em campo para todas as fitofisionomias. A) Índice CSI (*Canopy structure index*); B) Índice BMI (*Body mass index*).

### 4. Discussão e conclusões

A similaridade entre as medidas de biomassa entre as fitofisionomias sugere que o particionamento dos ambientes a partir dos dados do SRTM não tornaria a estimativa de biomassa atual mais confiável, tomando como estudo de caso a bacia do Igarapé Asu. No entanto, deve-se ter cautela para extrapolação destes resultados para grande parte da Amazônia, pois sabe-se que esta região é uma província fitogeográfica bem individualizada, apresentando grande heterogeneidade florística e estrutural ao longo da paisagem (Braga, 1979). Estudos conduzidos em áreas próximas à bacia do Igarapé Asu por Castilho (2004) na Reserva Ducke e por Laurance et al. (1999) nas áreas administradas pelo Projeto Dinâmica Biológica de Fragmentos Florestais demonstraram uma variação de biomassa de 215 a 421 ton/ha e 231 a 492 ton/ha, respectivamente. Ambos os trabalhos encontraram cerca de 50% de variação entre os valores extremos de biomassa, revelando uma distribuição heterogênea da biomassa arbórea ao longo da paisagem nas florestas de terra-firme da Amazônia Central. Nestes estudos, a variação encontrada foi atribuída, em grande parte, à mudança na composição de espécies e crescimento diferencial de indivíduos influenciados pela topografia, solo e proximidade à rede de drenagem, demonstrando que estas variáveis abióticas são muito importantes na determinação da biomassa na Amazônia Central. No trabalho de Castilho (2004) o gradiente do solo e a inclinação do terreno explicaram cerca de 40% da variação espacial da biomassa acima do solo, sendo que a biomassa arbórea decresceu com o aumento da inclinação. Adicionalmente, as variáveis topográficas altitude e inclinação mostraram ter maior efeito sobre árvores com DAP >30cm, sugerindo que árvores maiores tendem a se concentrar em áreas mais altas e planas. Visto que na Amazônia Central aproximadamente

metade da biomassa total acima do solo por hectare se concentra em árvores com DAP entre 20 e 50 cm (Nascimento, 2002), as áreas de platôs tenderiam a ter mais biomassa que os baixios e as vertentes.

Alguns fatores podem ter contribuído para que os resultados deste estudo não corroborassem estudos anteriores. Entre estes fatores está a extrapolação da biomassa estimada para áreas de 1 hectare a partir de amostras dos ambientes com áreas entre 0,12 e 0,7 hectares. Este procedimento, realizado para que fosse padronizada a área coberta por cada fitosionomia, pode ter causado subestimativas da biomassa, visto que foram encontrados valores de biomassa bem abaixo (144 ton/ha) das estimativas encontradas em outros estudos. Futuramente os transectos serão separados em 25 metros para padronização do tamanho da área para o cálculo da biomassa em cada tipo florestal, permitindo melhor análise dos fatores abióticos que influenciam a biomassa. Com este procedimento espera-se também incrementar as relações entre biomassa e os parâmetros extraídos das imagens de radar.

Há indícios que a polarização HV é mais indicada para predição da biomassa, utilizando as medidas de textura como parâmetro. A polarização HV está relacionada ao espalhamento volumétrico complexo, pois o sinal incidente sobre o dossel sofre inúmeros espalhamentos nos diferentes estratos da floresta primária antes de retornar ao sensor. A priori, as demais polarizações não serão descartadas do estudo, pois análises adicionais serão realizadas após o ajuste dos dados de biomassa obtida em campo tornando todas as polarizações importantes neste processo. Muitos dos atributos de textura empregados nas análises, incluindo aqueles atributos das polarizações HH e VV podem estar relacionados à estrutura vertical e horizontal do ambiente, que é uma medida indireta da biomassa. Futuras análises buscarão entender a estrutura da comunidade do platô, vertente e baixio, analisando sua composição florística, a predominância de famílias e espécies que podem definir grupos estruturais distintos para cada ambiente. Com estas análises espera-se obter melhor compreensão de como as variáveis biofísicas, tais como, biomassa, área basal e estrutura arbórea se relacionam com o sinal do radar e qual delas é mais representada pelas medidas de textura do radar.

## 5. Referências

- Braga, P.I.S. Subdivisão fitogeográfica, tipos de vegetação, conservação e inventário florístico da floresta Amazônica. **Suplemento Acta Amazônica**, v.9, n.4, p.53-80, dez. 1979.
- Bravard, S.; Righi, D. Geochemical differences in an Oxisol-Spodosol Toposequence of Amazonia, Brazil. **Geoderma**, v.44, n. 1, p. 29-42, Apr. 1989.
- Castilho, C. **Variação espacial e temporal da biomassa arbórea viva em 64 km<sup>2</sup> de floresta de terra-firme na Amazônia Central**. 2004. 87p. Tese (Doutorado em Ecologia) Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia, Manaus-AM. 2006.
- Chauvel, A. Os latossolos amarelos, álicos, argilosos dentro dos ecossistemas das bacias experimentais do INPA e da região vizinha. **Suplemento Acta Amazônica**, v.12, n.3, p. 47-60, set. 1988
- Clark, D.B.; Palmer, M.W.; Clark, D.A. Edaphic factors and the landscape-scale distribution of tropical rain forest trees. **Ecology**, v. 80, n. 8, p. 2662-2675. 1999.
- Higuchi, N., J. dos Santos, R.J. Ribeiro, L. Minette e Y. Biot.. Biomassa da Parte Aérea da Vegetação da Floresta Tropical Úmida de Terra-firme da Amazônia Brasileira. **Acta Amazonica**, v.28, n. 2, p.153-166. 1998.
- Hopkins, M.J.G. Flora da Reserva Ducke, Amazonas, Brasil. **Rodriguésia**, v. 56, n. 86, p. 9-25, 2005
- Houghton, R. A., Lawrence, K. T., Hackler, J. L.; Brown, Sandra. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. **Global Change Biology**, v.7, n.7, p. 731-746, Oct. 2001
- Kahn, F.; Castro, A. The palm community in a forest of Central Amazonia, Brazil. **Biotropica**, v.17, n.3, p. 210-216. 1985.

- Klinge, H.; Rodrigues, W.A. Biomass estimation in a central Amazonian rain forest. **Act. Cient. Venez.**, v.24, p.225-237. 1973.
- Laurance, W.F.; Fearnside, P.M.; Laurance, S.G. Delamonica, P.; Lovejoy, T.E.; Rankin-de-Merona, J.M.; Chambers, J.Q.; Gascon, C. Relationship between soils and Amazon forest biomass: a landscape-scale study. **Forest Ecology Management**, v.118, n. 1-3, p. 127-138, June 1999.
- Nascimento, H.E.M.; Laurance, W.F. Total aboveground biomass in central Amazonian rainforest: a landscape-scale study. **Forest Ecology and Management**, v.168, p.311-321. 2002.
- Oliveira, J.A.; Dutra, L.V.; Rennó, C.D. Aplicação de métodos de extração e seleção de atributos para classificação de regiões. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12, 2001, Goiânia. **Anais...** São José dos campos: INPE, 2005. p. 4201-4208.
- Oliveira, A.N.; Amaral, I.L. Florística e fitossociologia de uma floresta de vertente na Amazônia Central, Amazonas, Brasil. **Acta Amazônica**, v. 34, n.1, p.21-34, 2004.
- Pope K.O., Rey-Benayas J.M., Paris J.F. Radar Remote Sensing of forest and wetland ecosystems in the Central American Tropics. **Remote Sensing of Environment**, v.2, n. 48, p. 205-219, May 1994.
- Ranzani, G. Identificação e caracterização de alguns solos da Estação Experimental de Silvicultura Tropical do INPA. **Acta Amazônica**, v. 10, n.1, p. 7-41, 1980.
- Rennó, C. D., Freitas, C. C., Frery, A. C. A System for Region Image Classification Based on Textural Measures. **Jornada Latino-Americana de Sensoriamento Remoto por Radar: Técnicas de Processamento de Imagens. 2.**, Santos, SP, 1998.
- Sombroek, W. Amazon landforms and soils in relation to biological diversity. **Acta Amazonica**, n. 30, n. 1, p. 81-100, 2000.
- Ribeiro, J.E.L.S.; Hopkins, M.G.; Vicentini, A.; Sothers, C.A.; Costa, M.A.S.; Brito, J.M.; Souza, M.A.D.; Martins, L.H.P.; Lohmann, L.G.; Assunção, P.A.C.L.; Pereira, E. C., Silva, C.F.; Mesquita, M.R.; Procópio, L. 1999. **Flora da Reserva Ducke: Guia de Identificação das Plantas Vasculares de uma Floresta de Terra Firme na Amazônia Central.** INPA, Manaus.