

Abordagem canônica para análise da geomorfometria local e de atributos estruturais em floresta tropical

Polyanna da Conceição Bispo¹
Márcio de Morisson Valeriano¹
João Roberto dos Santos¹
Paulo Maurício Lima de Alencastro Graça²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{polyanna, valerian, jroberto}@dsr.inpe.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Amazônicas – INPA
Av. André Araújo, 2936, Aleixo, CEP 69060-001, Manaus – AM, Brasil
pmlag@inpa.gov.br

Abstract. The aim of the study is to evaluate the correlation between the characteristics of local geomorphometry and the structural composition of the vegetation of the Tapajos National Forest in order to verify associations and interdependences between those two groups of variables. Allied to this, we seek to estimate the diameter at breast height (DAP), total height (HT) and canopy openness (AD) for study sites using regression analysis. The data were extracted from local geomorphometric TOPODATA (Geomorphometric database of Brazil). Data analysis was based on analysis of canonical correlation and regression analysis. The results show that the groups considered are not independent and the inter-group associations are established primarily by the influence of higher elevations, low cosine values of the aspect, moderate slopes on the distribution of large diameter trees, low heights, and a more closed canopy. Regression analysis shows that the geomorphometric variables can be used in models with attributes of forest structures such as AD, DAP and HT, but it should be taken care of possible under or overestimation.

Palavras-chave: remote sensing, forest, geomorphometry, sensoriamento remoto, floresta, geomorfometria

1. Introdução

Os padrões de vegetação são influenciados por diversos fatores, dentre os quais destaca-se a geomorfometria. As variáveis geomorfológicas de caráter local tais como a elevação, a declividade e a orientação de vertentes, estão entre as principais relacionadas com as mudanças na vegetação (Velasques-Rosas et al., 2002; Wilson e Gallant, 2000). A elevação corresponde à altitude do terreno e influencia a distribuição altitudinal do solo e clima, condicionando diferentes padrões de vegetação. A declividade e a orientação de vertentes controlam respectivamente a intensidade e a direção de fluxos de matéria e de insolação, exercendo efeitos locais sobre os regimes hídricos e de energia. Entretanto, um conjunto básico de variáveis para caracterização local do terreno deve incluir, além daquelas já mencionadas, as curvaturas horizontal e vertical (Qi e Zhu, 2003; Schmidt et al., 2003). As duas últimas combinadas representam a caracterização das formas do terreno, que se associam diretamente a propriedades hidrológicas e de transporte, exercendo influência indireta sobre a vegetação. Outra variável que tem sido usada mais recentemente é o fator de iluminação, obtida a partir da combinação da declividade e da orientação de vertentes (Canavesi et al., 2010).

Embora existam diversos estudos dedicados à investigação da influência da variabilidade ambiental sobre a diferenciação da vegetação, ainda há poucos que testam rigorosamente os efeitos da variação geomorfológica local sobre os fatores estruturais da vegetação, tais como DAP (diâmetro a altura do peito), HT (altura total) e AD (abertura do dossel), usando dados de sensoriamento remoto (Jarvis, 2005). Esta variabilidade espacial da

vegetação tem sido atribuída a vários fatores incluindo alta umidade (Odum et al., 1970), a limitação de nutrientes (Vitousek e Sanford, 1986), a baixa temperatura (Aiba e Kitayama, 2002) e a acidez do solo (Hafkenscheid, 2000) controlados pelo relevo. Alguns estudos têm mostrado que quando se desconsidera o gradiente altitudinal na análise da variabilidade estrutural das árvores, os padrões na distribuição de diâmetro do tronco, com relação à declividade, podem não ser identificados. Entretanto, a altura de uma árvore por unidade de diâmetro pode não aumentar em encostas suaves (Robert e Moravie, 2003). Webb et al. (1999) analisou a estrutura da floresta em diferentes unidades topográficas da paisagem (divisor, vertentes e baixios), e encontrou que a densidade do tronco é mais alta em divisores de águas, com um diâmetro máximo em áreas altas (normalmente nos cumes) e uma baixa estatura. Diante disso, o objetivo do presente trabalho é o de avaliar as correlações existentes entre as características geomorfométricas locais com a composição estrutural de uma floresta tropical primária, com intuito de verificar as associações e a interdependência entre estes dois grupos de variáveis. Aliado a isso, busca-se estimar parâmetros de DAP, HT e AD da tipologia florestal através de análises de regressões, cujas mensurações dendrométricas para montagem dos modelos foram selecionadas em sítios de estudos, inseridos na Floresta Nacional do Tapajós (FNT).

2. Material e Métodos

Área de estudo

O estudo foi realizado na FNT (Figura 1).

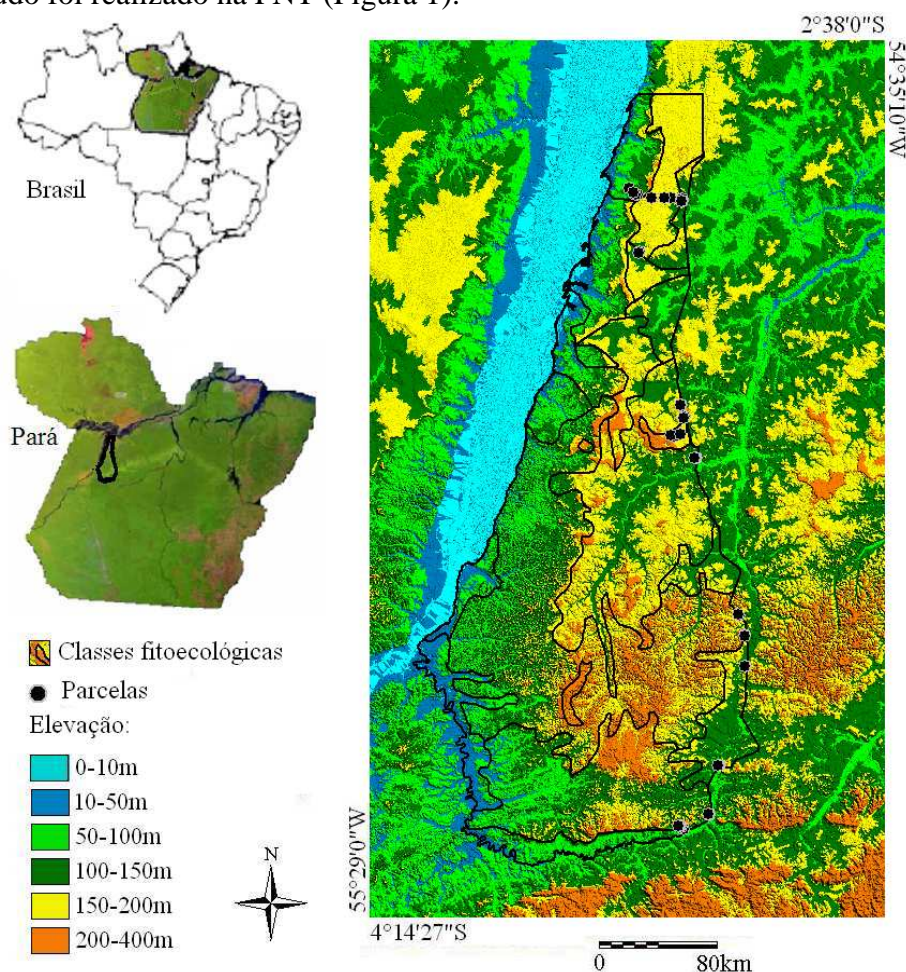


Figura 1 – Floresta Nacional do Tapajós. Ao fundo o Modelo Digital de Elevação SRTM com as classes fitoecológicas do RADAMBRASIL sobrepostas.

A FNT possui uma área aproximada de 545000 hectares e está inserida no bioma Amazônia, localizando-se entre as coordenadas geográficas 55° 30' W à 54° 36' W e 2° 30' S à 4° 18' S no oeste do Estado do Pará, Brasil. Entre outras características, seleção desta área para o presente estudo se deve à considerável diferenciação de suas tipologias vegetais e sua sutil variação topográfica. Nesta área foram selecionados sítios com diferentes características fitoecológicas para a realização do inventário florestal.

Dados e Análise dos dados

O inventário florestal foi realizado em setembro de 2009. Para representar a variabilidade florístico estrutural existente na área selecionada foram estabelecidas de 4 a 6 parcelas em 9 classes fitoecológicas diferentes, resultando em 46 parcelas de 0,25ha cada, totalizando uma área amostral de 11,5 ha. Nas parcelas foram inventariados todos os indivíduos arbóreos com diâmetro à altura do peito (DAP) maior ou igual a 10 cm, altura total (HT) e abertura do dossel (AD). A medida da AD foi feita através de fotografias hemisféricas obtidas a partir de uma lente *Fish Eye*. A porcentagem de abertura do dossel foi calculada com o programa GLA (*Gap Light Analyzer*) version 2.

Os dados geomorfométricos foram extraídos do TOPODATA (Banco de dados Geomorfométricos do Brasil, 2008), sendo utilizadas, as variáveis geomorfométricas elevação, declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal e curvatura vertical. A variável fator iluminação foi estimada a partir da declividade e orientação de vertentes.

A partir dos dados de campo foi feito um painel amostral, o qual foi aplicado sobre as imagens das variáveis geomorfométricas, extraindo os valores numéricos destas correspondentes a localização das árvores. Para isso foi utilizado o SIG ARCGIS 9.2. Em seguida, as análises foram conduzidas no sentido de investigar as relações entre o grupo de variáveis estruturais da floresta (DAP, HT e AD) e a geomorfometria local (elevação, declividade, orientação de vertentes, curvatura vertical, curvatura horizontal e iluminação). As informações foram organizadas por parcelas. Para cada uma destas foi calculada a média dos valores encontrados para cada uma das variáveis geomorfométricas. Estes dados foram submetidos a uma análise de correlação canônica (ACC) (Harris, 1998) e análises de regressão (Neter et al., 1996). A ACC mede a existência e a intensidade da associação entre dois grupos de variáveis. As correlações canônicas referem-se às combinações lineares de variáveis, de tal modo que a correlação entre essas combinações seja máxima. O aspecto de maximização da ACC representa uma tentativa de concentrar uma relação de alta dimensão entre dois grupos de variáveis em poucos pares de variáveis canônicas, semelhante ao que ocorre com a análise de componentes principais, mas neste caso o foco da análise está na maximização da correlação, e não da variância. A análise de correlação canônica é uma técnica de avaliação da interdependência entre grupos de variáveis, sendo muito usada em estudos exploratórios. Neste trabalho, foram realizadas análises de correlação canônica para verificar as associações existentes entre o grupo de características estruturais da floresta e o grupo de características geomorfométricas locais do terreno.

Em seguida foram gerados modelos de regressão para cada uma das variáveis DAP, HT e AD em relação às variáveis geomorfométricas locais. A seleção de variáveis e proposição do modelo de regressão a ser utilizado foi implementado o procedimento *best subset* (Neter et al., 1996). Também foi verificado se existia autocorrelação espacial entre as mesmas através do Índice de Moran. A validação de cada modelo selecionado foi avaliada com uso do critério da soma dos quadrados da predição (PRESS) (Neter et al., 1996). O procedimento consistiu em estimar as variáveis dependentes (DAP, HT e AD) de cada observação a partir de funções ajustadas com as n-1 observações remanescentes. Assim, o valor PRESS foi calculado e comparado à SQR (Soma dos quadrados dos resíduos) do modelo ajustado com todas as n observações. De acordo com Neter et al. (1996), quando o valor PRESS é

semelhante à SQR, o QMR (Quadrado médio dos resíduos) pode ser considerado um indicador adequado da capacidade preditiva do modelo. Tais análises foram realizadas no programa Estatística 6.0 e Minitab 11.

3. Resultados e Discussão

Análise Canônica

Pela Tabela 1 pode-se observar que as correlações dos dois primeiros pares canônicos foram elevadas e significativas a 1% de probabilidade, pelo teste de qui-quadrado. Também verifica-se que a correlação canônica do primeiro par canônico é elevada (0,8195) e que os grupos considerados não são independentes.

Tabela 1 – Pares Canônicos

Variáveis	Pares Canônicos		
	1°	2°	3°
DAP	0,699162	-0,192116	-1,03425
HT	-0,314699	-0,873486	0,76195
AD	-0,616547	-0,228738	-0,84699
HN	0,206125	-0,449017	0,318548
ZN	0,978364	-0,244700	-0,309005
sen ON	0,144453	0,155777	-0,231372
cos ON	-0,246842	0,250037	-0,875712
SN	0,005597	-0,895289	-0,130911
VN	-0,318180	-0,052584	-0,470549
ILUM	-0,074356	-0,607488	-0,135220
ρ	0,819508	0,559240	0,356041
X^2	64,15227	20,16894	5,35424
GL	21	12	5
α	0,000003	0,064015	0,374216

DAP = diâmetro a altura do peito, HT = altura total, AD = abertura do dossel, HN = curvatura horizontal, ZN = elevação, sen ON = seno da orientação de vertentes, cos ON = cosseno da orientação de vertentes, SN = declividade, VN = curvatura vertical, ILUM = iluminação, ρ = correlação canônica, X^2 = Qui-quadrado calculado, GL = graus de liberdade, α = nível de significância.

A partir Tabela 2 verifica-se que as associações intergrupos são estabelecidas.

Tabela 2 – Fatores Canônicos

Variáveis	Fatores Canônicos		
	1°	2°	3°
DAP	0,723700	-0,582942	-0,369373
HT	0,058469	-0,973659	0,220386
AD	-0,831106	-0,164077	-0,531358
HN	0,053623	-0,323420	-0,039698
ZN	0,934262	0,008987	-0,258623
sen ON	0,052408	-0,043090	-0,226475
cos ON	-0,287955	0,206288	-0,846025
SN	-0,233891	-0,718960	-0,071005
VN	0,049894	-0,315726	-0,234123
ILUM	-0,180664	-0,249933	-0,147864

As associações são evidentes, principalmente, pelas influências de: o primeiro par de fatores canônicos, com correlação de 0,8195, associa largos diâmetros à altura do peito, baixa estatura e dossel mais fechado com áreas de maiores elevações, baixos valores cosseno da orientação de vertentes, declividades mais amenas e menos iluminação; o segundo par de fatores canônicos, com correlação de 0,5592, associa árvores mais baixas, diâmetros mais finos e dossel menos aberto com altos valores de orientação de vertentes, baixos valores de declividades e curvaturas.

Análises de regressão e modelos de estimativas das variáveis estruturais da floresta

Uma análise visual detalhada dos diagramas entre o AD e o conjunto total de variáveis explicativas apontou a ocorrência de 3 *outliers* no grupo de observações. Constatou-se resultado semelhante com relação às demais variáveis DAP e HT. Para explorar com maior profundidade as relações entre cada uma das variáveis dependentes e suas respectivas variáveis explicativas estes *outliers* foram removidos e as relações foram recalculadas. Novamente foram feitas análises dos *outliers* através da distância de Cooks, não eliminando mais nenhuma amostra. Uma análise preliminar não indicou a necessidade de transformação das variáveis. No ajuste de modelos de regressão, como regra geral, segundo Neter et al. (1996) o número total de observações utilizadas (i.e., 46 ou 43 sem os *outliers*) deve ser 10 vezes o número de parâmetros, ou seja, no máximo 4 no caso do presente estudo. Entretanto optou-se pela seleção de modelos com no máximo 3 parâmetros ou variáveis explicativas.

Os critérios de seleção utilizados apresentaram convergência na indicação dos melhores subconjuntos de variáveis explicativas. No modelo de estimativa da AD foi incluído elevação e cosseno da orientação de vertentes como o melhor conjunto de variáveis ($R^2 = 0,47$, QMR= 14,17). No modelo para DAP por sua vez, também foi incluída a componente cosseno da orientação de vertentes, com curvatura horizontal e elevação ($R^2 = 0,56$, QMR= 3,601). Por último para o modelo de estimativa para HT foram selecionadas as variáveis curvatura horizontal e a declividade ($R^2 = 0,24$, QMR= 1,748).

Na Tabela 3 são apresentados, para todos os modelos, os coeficientes de regressão padronizados estimados (β), os respectivos erros padrões (SE), valor da estatística t, p valor e o VIF (fatores de inflação da variância), este último, conforme sugerido por Neter et al. (1996), para detecção de possível presença de colinearidade.

Tabela 3 – Modelos de Regressão para AD, DAP e HT

Modelo AD					
Variável	β	SE	t	p	VIF
Constante	20,13	2,334	8,68	0,000	
ZN	-0,08	0,015	-5,23*	0,000	1,0
Cos ON	2,26	0,910	2,49*	0,017	1,0
S = 3,76, R-Sq = 47,2,5%, R-Sq(adj) = 44,6%, R-Sq(pred) = 39,57%					
Modelo DAP					
Constante	12,209	1,471	8,30	0,000	
HN	1,056	0,559	1,89*	0,067	1,0
ZN	0,054	0,008	6,72*	0,000	1,1
SN	0,170	0,052	3,26*	0,002	1,1
S = 1,89770, R-Sq = 56,2%, R-Sq(adj) = 52,8%, R-Sq(pred) = 48,34%					
Modelo HT					
Constante	15,31	0,405	37,82	0,000	
HN	0,703	0,389	1,80*	0,079	1,0
SN	0,107	0,034	3,09*	0,004	1,0
S = 1,32, R-Sq = 24%, R-Sq(adj) = 20,2%, R-Sq(pred) = 12,47%					

* Valor significativo ao nível de 10% de significância

Como pode ser observado, o valor da estatística t foi significativo em todos os casos (AD, DAP e HT). Os valores de β indicam uma relação negativa entre a AD e a elevação, sendo relacionada positivamente com o cosseno da orientação de vertente. O DAP, por sua vez está positivamente correlacionado com a curvatura horizontal, elevação e declividade. E finalmente HT está relacionada positivamente com a curvatura horizontal e a declividade.

É possível constatar que todos os valores de VIF calculados foram inferiores a 10, indicando ausência de problemas graves com multicolinearidade nestes modelos de regressão (Neter et al., 1996). A aplicação dos testes de normalidade e o gráfico de probabilidade normal para os resíduos mostraram que os dados de todas as variáveis estudadas tiveram distribuição que não difere da normal. O modelo foi submetido ao teste de Levene, que apontou a variância constante dos resíduos. Analisando os gráficos de resíduos contra os valores preditos, verifica-se que os pressupostos de linearidade e homocedasticidade não foram violados. Aliado a isso, a análise de autocorrelação espacial realizada através do índice de Moran mostrou que não há autocorrelação entre os dados.

Para a validação dos dados, o valor PRESS do modelo AD (649,412) diferiu em 14,17 (QMR) da SQR deste mesmo modelo (566,93). Já o valor PRESS do modelo DAP (165,592) diferiu em 3,6 (QMR) da SQR deste mesmo modelo (140,449). Finalmente o valor PRESS do modelo HT (80,5138) diferiu em 1,74 (QMR) da SQR deste mesmo modelo (65,929). Com base em resultados apresentados por Neter et al. (1996), estas diferenças foram consideradas próximas o suficiente para suportar a eficácia dos modelos selecionados. Contudo, quando comparado ao QMR do modelo AD, o QMR dos modelos HT e DAP podem ser considerados como um melhores indicadores da verdadeira capacidade preditiva da função de regressão ajustada. Cabe-se ressaltar aqui o baixo valor de R^2 do modelo HT.

A partir da validação dos modelos, partiu-se para sua aplicação sobre o conjunto de variáveis geomorfométricas locais de modo a obter um produto AD, DAP e HT estimados. Estes mostram-se em conformidade com o que foi observado pela análise de correlação canônica, segundo a qual largos diâmetros a altura do peito, baixa estatura e dossel mais fechado estão associados à áreas de maiores elevações. Entretanto há de se considerar que o R^2 para a estimativa HT foi pequena e para as demais estimativas (AD e DAP), este teve um valor médio em torno de 50%.

A análise de correlação canônica, como dito anteriormente, mostrou a relação entre dois grupos de variáveis. A análise de regressão por sua vez, aplicada sobre o mesmo conjunto de dados permitiu um maior detalhamento desta relação, analisando cada uma das variáveis estruturais contra as variáveis geomorfométricas locais. A Figura 2 mostra um exemplo de um dos produtos finais gerados, a DAP. Segundo o modelo estimado os menores DAPs, de 10 a 24 cm, estão localizados em áreas de convergente a planar, menos elevadas e de pouco a moderadamente declivosas. Já os DAPs de 25 a 30 cm caracterizam-se por terrenos mais planos, elevações e declividades moderadas. Finalmente as árvores com DAPs maiores do que 30 cm estão distribuídas em áreas de planar a divergentes, com maiores elevações e declividades de onduladas a forte onduladas. Desse modo, a espacialização dos modelo de regressão gerados propiciaram uma melhor visualização e interpretação mais clara das relações entre as variáveis estruturais da floresta e a geomorfometria.

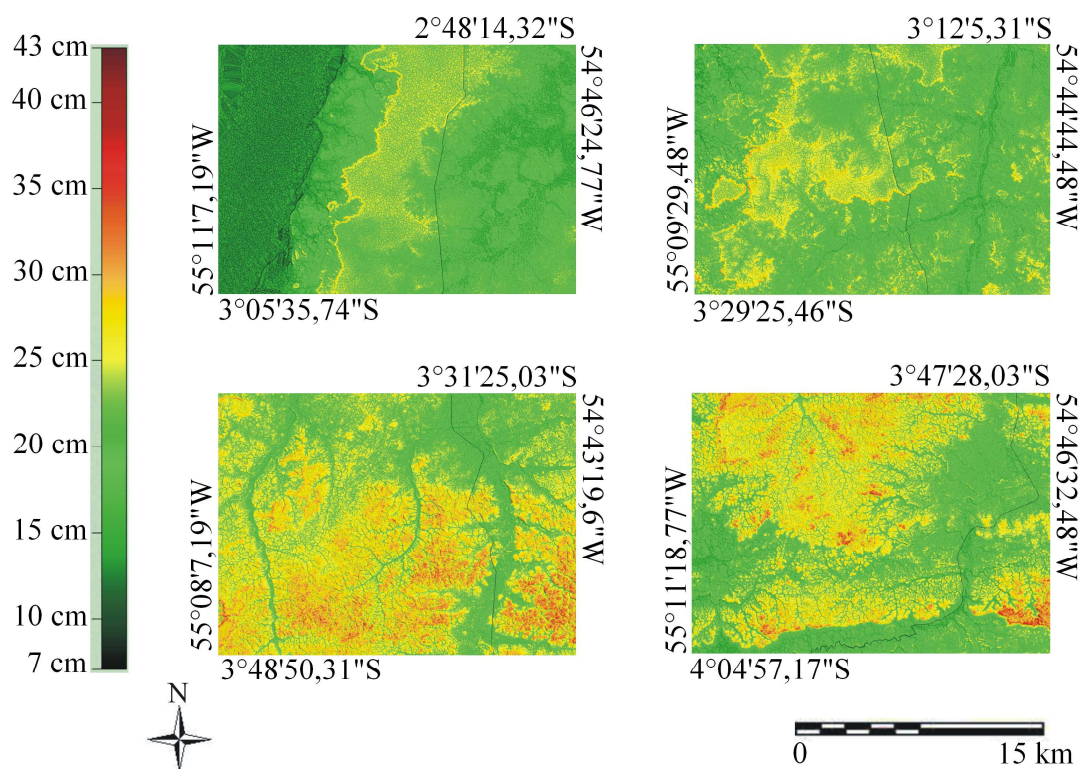


Figura 2 – Imagens DAP estimada a partir de análises de regressão.

4. Conclusões

Os resultados das análises efetuadas permitiram concluir que:

- As correlações canônicas foram elevadas, sendo que o primeiro e segundo pares foram significativos a 1% de probabilidade;
- As análises de correlação canônica permitem observar que os grupos considerados não são independentes e que as associações intergrupos são estabelecidas, principalmente, pela influência das maiores elevações, baixos valores cosseno da orientação de vertentes, declividades mais amenas sobre a distribuição dos largos diâmetros das árvores, baixa estatura e dossel mais fechado;
- As análises de regressão mostraram que as variáveis geomorfológicas locais podem ser utilizadas na modelagem de atributos da estrutura florestal tais como AD, DAP e HT com cuidados devido a possíveis sub ou superestimações. Os modelos gerados foram considerados aceitáveis a partir do critério de validação PRESS. Embora haja uma representatividade baixa do modelo HT ($R^2=0,24$).

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e ao CNPq pela concessão das bolsas de doutorado e de produtividade em pesquisa; ao LBA/Santarém, pelo apoio logístico durante o trabalho de campo; ao IBAMA pela concessão da entrada na Floresta Nacional de Tapajós; ao identificador botânico Sr. Erly Pedroso pelo auxílio técnico nas mensurações; e à pesquisadora Dra. Corina da Costa Freitas (INPE) pelo suporte estatístico referente aos modelos de regressão.

6. Referências Bibliográficas

Aiba, S.; Kitayama, K. Effects of the 1997-98 El Niño drought on rain forests of Mount Kinabalu, Borneo. **Journal of Tropical Ecology**, v.18, p. 215-230, 2002.

Canavesi, V., Ponzoni, F. J., Valeriano, M.M. Estimativa de volume de madeira em plantios de Eucalyptus spp. utilizando dados hiperespectrais e dados topográficos. **Revista Árvore**, v.34, n.3, p. 539-549, 2010.

Hafkenscheid R. Hydrology and biogeochemistry of tropical montane rain forests of contrasting stature in the Blue Mountains, Jamaica. PhD Thesis. Vrije University, 2000.

Harris, R.J. **A primer of multivariate statistics**. New York: Academic, 1998. 332p.

Jarvis, A.J. Terrain controls on the distribution of tree species diversity and structure in tropical lowland and tropical montane forest. Thesis PhD, University of London, 2005.

Odum HT, Lugo A, Cintronn, G. Metabolism and evapotranspiration of some rainforest plants and soils. In: Odum, H.T.; R.F. Pigeon (Org.) **A Tropical Rainforest. Division of Technical Information**, U.S. Atomic Energy Commission, Washington, 1970, p. 103-164.

Qi, F.; Zhu, A.X. Knowledge discovery from soil maps using inductive learning. **International Journal of Geographical Information Science**, v.17, p. 771-795, 2003.

RADAMBRASIL. (1976) Departamento Nacional de Produção Mineral. Folha AS.21- Santarém. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: DNPM, 510 pp. (Levantamento dos Recursos Naturais, v. 10).

Neter, J.; Kutner, N.H.; Nachtsheim, C.J.; Wasserman, W. **Applied Linear Statistical Models**. 4 ed. Boston: McGraw Hill, 1996, 791p.

Robert, A.; Moravie, M. A. Topographic variation and stand heterogeneity in a wet evergreen forest of India. **Journal Tropical Ecology**, v.19, p. 697-707, 2003.

Schmidt J, Evans I.S, Brinkmann J. Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation. **International Journal of Geographical Information Science**, v.17, p.797-814, 2003.

TOPODATA-www.dsr.inpe.br/topodata- Accessed 15 April 2010.

Valeriano, M.M.; Rosseti, D.F. Topographic modeling of Marajó Island with SRTM data. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.9, p.53-63, 2008.

Velázquez-Rosas, N.; Meave, J.; Vázquez-Santana, S. Elevation variation of leaf traits in montane rain forest tree species at La Chinantla, Southern Mexico. **Biotropica**, v.34, p. 534-546, 2002.

Vitousek, P.M.; Sanford, R.L. Nutrient cycling in moist tropical forest. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v.17, p.137-167, 1986.

Webb, E.L.; Stanfield, B.S.; Jensen, M.L. Effects of topography on rainforest tree community structure and diversity in American Samoa, and implications for frugivore and nectarivore populations. **Journal of Biogeography**, v.26, n.4, p. 887-897, 1999.

Wilson, J.P., Galant, J.C. **Terrain Analysis: Principles and Applications** (1st edition), John Wiley & Sons, New York, 2000, 479p.