

Modelo linear de mistura espectral e métricas da paisagem aplicados ao estudo do desflorestamento em Manaus, Amazonas

Eduardo da Silva Pinheiro¹
Jenifer Pereira Castilho Marques²
Hermann Johann Heinrich Kux³

¹ Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia – SIPAM/MN
Avenida do Turismo, 1350, Tarumã Manaus - AM, 69049-630
eduardo.pinheiro@sipam.gov.br

² Universidade Federal do Amazonas - UFAM
Av. Gen. Otávio Rodrigo Ramos, 3000. Manaus, AM, Brasil
jenniffercastilho@gmail.com

³ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
hermann@dsr.inpe.br

Abstract. The Amazonas State presents the lowest deforestation rates in the so-called “Legal Amazon” of Brazil, but the pressure on the forest of its capital Manaus is very strong due to industrialization and urbanization. This paper presents the analysis of spatial and temporal dynamics of deforestation in the Manaus metropolis, Amazonas, Brazil, for the timeframe 1977-2011. LANDSAT data were segmented and classified to detect changes in forest landscapes. Landscape metrics were calculated to evaluate the changes occurred on the number, size and form of forest fragments due to an intense urbanization process. The consequences of the forest cover alteration process in Manaus are discussed.

Palavras-chave: Amazon, linear mixing model, landscape metrics, Amazônia, métricas da paisagem, modelo linear de mistura espectral.

1. Introdução

Nos últimos anos, ocorreu elevado crescimento da população humana nas cidades no mundo (Grimm *et al.*, 2008; Montgomery, 2008; Clement, 2010). De acordo com Worldwatch Institute (2007), em 1900 10% da população mundial residia em áreas urbanas, atualmente este percentual ultrapassa 50%. O crescimento demográfico nas cidades está associado às tendências de desenvolvimento econômico mundial, ao processo de globalização e ao desenvolvimento tecnológico e industrial que permitiu a ascensão das cidades (Montgomery, 2008; Clement, 2010).

No Brasil, Manaus/AM está entre os municípios que apresentaram as maiores taxas de desenvolvimento econômico e crescimento demográfico (IBGE, 2011). A ascensão deste município pode ser explicada essencialmente pela implantação, em 1967, da Zona Franca de Manaus e o Polo Industrial. Desde a instalação do complexo industrial na cidade, esta experimentou uma elevada centralização das atividades econômicas e concentração populacional (Oliveira e Schor, 2009).

A dinâmica de ocupação urbana causam alterações na paisagem que necessitam de técnicas capazes de realizar diagnósticos e monitoramento ambiental para garantir a sustentabilidade no uso, ocupação e parcelamento dos espaços urbanos. Na cidade Manaus, o quadro é mais agravado, uma vez que está inserida na região da maior floresta tropical do mundo, a Amazônia. Na região, diversas espécies possuem pequenas áreas de ocorrência natural, ou pequenas áreas possuem altas taxas de endemismo (Gascon *et al.* 2002).

A ecologia de paisagens associada às técnicas de sensoriamento remoto são instrumentos que podem auxiliar as tomadas de decisão em planejamento ambiental, uma vez que permite a

sistematização, análise da complexidade e multiplicidade dos fatores que atuam em um ambiente (Metzger, 2002). As técnicas de sensoriamento remoto têm demonstrado um grande potencial para a aquisição detalhadas e precisas de informações sobre o uso da terra para a gestão e planejamento de regiões urbanas (Guindon et al, 2004; Araya e Cabral, 2008; Montgomery, 2008; Tooke et al, 2009).

O Modelo linear de mistura espectral - MLME (Shimabukuro e Smith, 1991) é uma técnica adequada para mapear as mudanças de uso da terra (Adams et al, 1995; Carreiras et al, 2002; Haertel et al, 2004), principalmente em áreas urbanas onde há uma heterogeneidade na paisagem. A composição heterogênea de áreas urbanas quando imageada por sensores com resolução moderada, pode apresentar um único pixel formado pelas respostas espectrais de diferentes alvos. Para Freitas et al (2008), o MLME pode auxiliar no mapeamento, pois assume que a resposta espectral de um pixel pode ser modelada por uma combinação linear ponderada das respostas espectrais dos membros de referência e formar as imagens fração (solo, vegetação e sombra), importantes para reduzir a confusão de alvos.

Neste estudo foram aplicados o MLME e as métricas da paisagem para mapear as mudanças ocorridas na cobertura florestal da área urbana de Manaus em um período de 34 anos, em entre 1977 a 2011.

Metodologia de Trabalho

O estudo foi realizado na área urbana do município de Manaus, capital do Estado do Amazonas. A área possui uma superfície de 454.925 km², está localizada na parte central da Amazônia brasileira (Figura 1). Originalmente, a vegetação predominante na área era a Floresta ombrófila densa das terras baixas (IBGE, 1978) conhecida também como floresta de terra firme com platôs, vertentes e baixios.

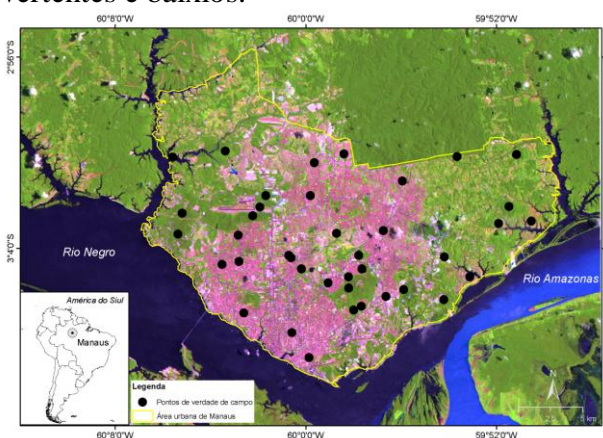


Figura 1. Localização da área de estudo.

Para analisar as modificações na paisagem da área urbana de Manaus foram utilizadas imagens da série histórica do satélite LANDSAT (Tabela 1), disponíveis, no banco de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (www.dgi.inpe.br).

Tabela 1. Cenas MSS e TM LANDSAT de 1977 - 2011.

Satélite	Sensor	Data	Orbita/ponto	Resolução espacial	Bandas espectrais
LS-2	MSS	07/06/1977	248/62	79 m	4 (0.5 - 0.6 μm) 5 (0.6 - 0.7 μm) 7 (0.8 - 1.1 μm)
LS-5	TM	19/10/1994	231/062	30 m	3 (0.63 - 0.69 μm)
		24/03/2011			4 (0.76 - 0.90 μm) 5 (1.55 - 1.75 μm)

O processamento digital das imagens foi realizado utilizando *software SPRING/INPE* (<http://www.dpi.inpe.br/spring/>) (CÂMARA et al. 1996). A correção geométrica das imagens

foi realizada pelo modelo polinomial de 1° grau e reamostragem por vizinho-mais-próximo. Os pontos de controle foram obtidos na base cartográfica da Prefeitura Municipal de Manaus, em escala 1:10.000, contendo os dados referentes ao arruamento, limite dos bairros, edificações e hidrografia. Com uso de 20 pontos de controle para cada imagem (1977, 1994 e 2011), o Erro Quadrado Médio foi menor do que 0,5 pixels.

Após a correção geométrica, foi aplicado o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) nas imagens LANDSAT (MSS e TM), com objetivo de melhorar o contraste da resposta espectral dos alvos em análise. O MLME descrito por Shimabukuro e Smith (1991), considera o valor do pixel em qualquer banda espectral como a combinação linear da resposta de cada componente dentro do pixel (frações vegetação, solo e sombra) e é expresso por:

$$r_i = \sum_{j=1}^n (a_{ij} x_{ij}) + e_i \quad (1)$$

O ajuste do MLME pode ser avaliado a partir do Erro Médio Quadrático (*RMS*) (Equação 2) que descreve os *pixels* não modelados no processamento (Shimabukuro e Smith, 1991).

$$RMS_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (e_i)^2 / j} \quad (2)$$

Onde, r_i : reflectância de um *pixel*, para a i -ésima banda espectral (contendo um ou mais componentes); a_{ij} : reflectância do j -ésimo componente puro do *pixel* para a i -ésima banda espectral; x_j : fração do j -ésimo componente puro no *pixel*; e_i : resíduo da modelagem para a i -ésima banda espectral;

As imagens fração vegetação foram segmentadas pelo método denominado Crescimento de Regiões, após diversos testes, os melhores valores de similaridade e a área de pixels foram iguais a 20 e 10 para as imagens TM dos anos de 1994 e 2011 e para a imagem MSS de 1977, similaridade e área de pixels iguais a 10 e 2, respectivamente (Figura 2).

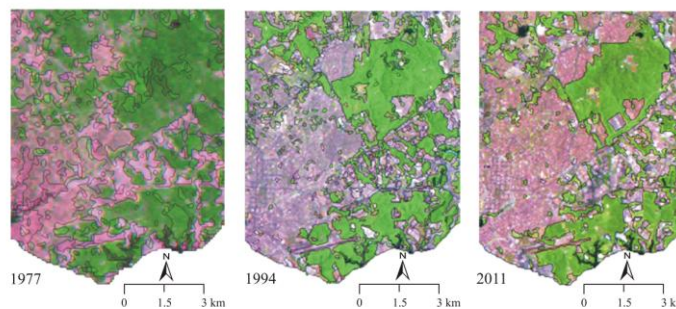


Figura 2. Exemplo da segmentação por crescimento de regiões, em um trecho da área urbana de Manaus, AM, Brasil.

A classificação das imagens foi realizada a partir do classificador supervisionado denominado Distância de *Bhattacharyya* (Schowengerdt, 1997). Neste sentido, foram mapeadas as classes temáticas, floresta, área alterada (locais com ocupação urbana ou solo exposto) e hidrografia (corpos d'água e rios). Posteriormente, foi aplicada a estatística *Kappa* (Landis e Koch, 1977) para analisar a exatidão temática do mapa elaborado para o ano de 2011. A verdade terrestre foi obtida a partir de 38 pontos (Figura 1) mapeados e descritos em trabalhos de campo com auxílio de um aparelho receptor *GPS Garmin Oregon 550*.

Para realizar as análises da estrutura da paisagem da área urbana de Manaus, foi utilizado o *software Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure - FRAGSTATS 3.3* (McGarigal e Marks 1995; McGarigal *et al.* 2002). Assim, foram calculadas as métricas de classe classificadas quanto ao número de fragmentos (NP), densidade de borda (ED), densidade de fragmentos (PD) e área total (CA), índice de

proximidade média (PROX_MN) e proporção entre perímetro e área (PARA); e métricas da paisagem classificadas quanto à forma (SHAPE) e índice de dimensão fractal (FRAC_MN).

Resultados e Discussão

O Modelo Linear de Mistura Espectral obteve um ajuste adequado, uma vez que o RMS para a imagem MSS 1977 foi de 1,05 e para as imagens TM 1994 e 2011 foi igual a 0,98 e 0,94, respectivamente. Um modelo pode ser considerado bem ajustado quando o valor do RMS é baixo e as frações estão dentro de um limite entre 0 e 1 (Adams et al, 1995). As imagens fração solo, vegetação e sombra podem ser visualizadas na Figura 3, os tons de cinza claros demonstram a predominância dos componentes puros de suas respectivas frações.

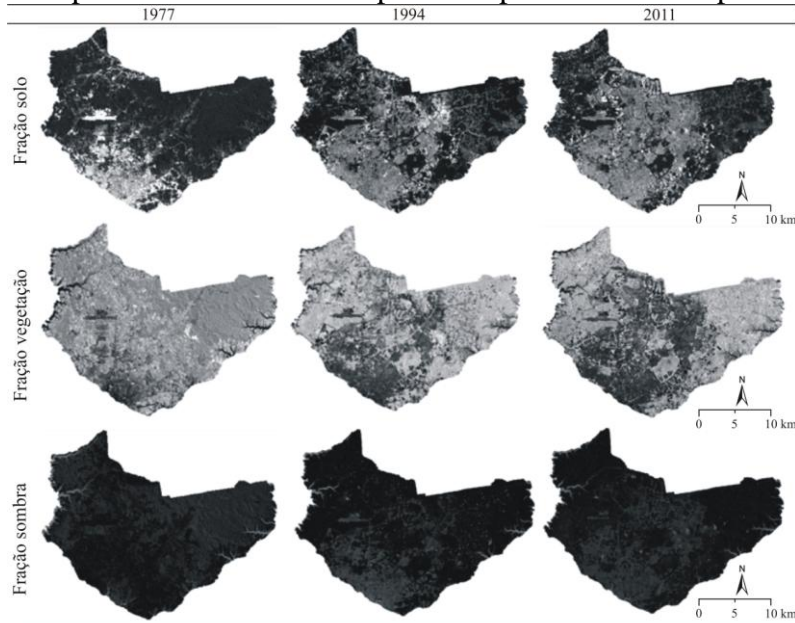


Figura 3. Imagens fração: solo, vegetação e sombra para os anos 1977, 1994 e 2011.

O classificador Distancia de *Bhattacharyya* permitiu mapear adequadamente as classes floresta, área alterada e hidrografia para os diferentes anos estudados (Figura 4). A classificação da imagem TM 2011, avaliada a partir de 38 pontos obtidos em campo, apresentou exatidão global de 0.89 e Índice *Kappa* de 0.801, valor considerado excelente de acordo com a proposta de Landis e Koch (1977). Apenas a exatidão temática da imagem TM 2011 pode ser avaliada, uma vez que não havia dados de verdade terrestre para os anos de 1977 e 1994. Contudo, avalia-se que a exatidão temática daqueles mapas também pode ser aceita, pois os procedimentos metodológicos foram os mesmos que o aplicado na imagem TM 2011. Nos 34 anos de análise identificou-se uma redução elevada na cobertura florestal da cidade de Manaus (Figura 4).

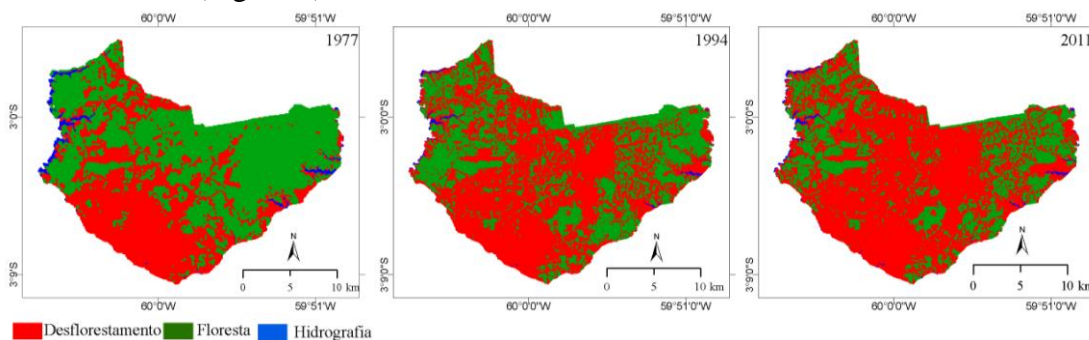


Figura 4. Alterações na cobertura florestal urbana (1977, 1994 e 2011) de Manaus, AM, Brasil.

A área total (CA) do desflorestamento apresentou elevado aumento nos anos analisados (Figura 5a). Além disso, também ocorreu aumento no número de manchas (NP) de floresta (Figura 5b). No ano de 1977 existiam 190 fragmentos florestais e aumentou para 1829 em 1994 e sofreu uma leve redução para 1160 em 2011. Esta redução de 2011 pode ser explicada pelo aumento do desflorestamento. O tamanho dos fragmentos também sofreu redução ao longo do tempo (Figura 5c). Em 1997, o maior fragmento florestal na cidade continha 20.144,53 hectares, em 1994 o maior continha 3.931,42 ha, em 2011 o maior fragmento foi de 1.715,31 ha. No ano de 2011, cerca de 95% dos fragmentos florestais apresentaram tamanho de até 30 ha com a média de 2,24 ha (Figura 5c). A densidade de fragmentos florestais passou de 0.22 fragmentos.ha⁻¹ em 1977 para 2.16 fragmentos.ha⁻¹ em 1994, em 2011 observa-se uma redução para 1.37 fragmentos.ha⁻¹ (Figura 5d).

Estes resultados indicam uma tendência à extinção e fragmentação florestal, além da formação de ilhas de vegetação isoladas. Para Laurence et al (2001), a eliminação de grandes trechos de floresta pode causar a extinção de várias espécies de fauna e flora as quais resultam na diminuição da biodiversidade contribuindo para o surgimento de ilhas isoladas, como os fragmentos de floresta. O tamanho e o grau de isolamento dos fragmentos florestais são fatores determinantes para a conservação da biodiversidade (Mcarthur e Wilson, 1967). A diminuição da superfície dos fragmentos florestais está relacionada à redução do número de espécies, assim como de suas relações interespecíficas. Quanto mais fragmentadas e perturbadas as paisagens, maiores são os desafios para a conservação da biodiversidade (Turner e Gardner, 1990). O isolamento crescente desses fragmentos pode influenciar a queda das taxas de migração e aumento da extinção das espécies isoladas pela crescente pressão urbana (Mcarthur e Wilson, 1967).

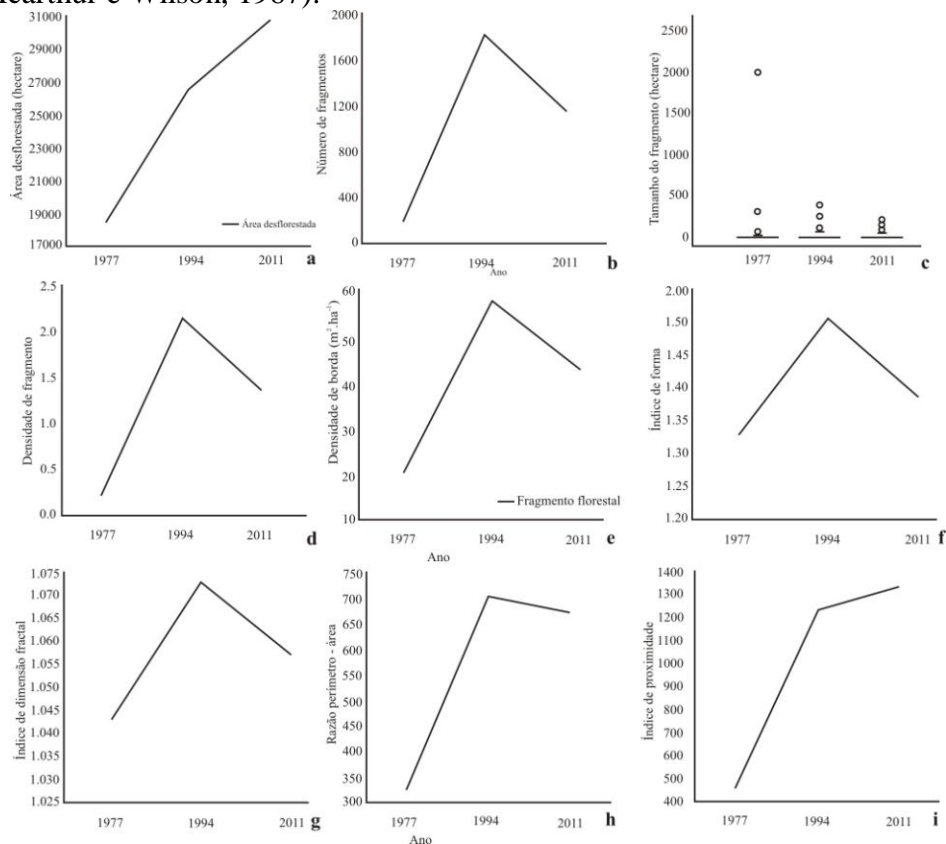


Figura 5. a) Evolução do desflorestamento na área urbana de Manaus; b) Número de fragmentos florestais; c) Tamanho dos fragmentos florestais; d) Densidade de fragmentos; e) Densidade de borda dos fragmentos; f) Índice de forma; g) Índice de dimensão fractal; h) Razão perímetro – área; i) Índice de proximidade.

A alteração no número e tamanho dos fragmentos florestais (Figuras 5b e 5c), verifica-se uma modificação na densidade de borda da floresta (ED) (Figura 5e). Este índice representa o grau de degradação das áreas de floresta. O processo de fragmentação florestal determina alta densidade de bordas na paisagem, o que influencia na composição florística e diversidade de espécies arbóreas (Metzger, 2000). No primeiro período houve um grande aumento da densidade de borda (Figura 5e). Para o período seguinte verifica-se uma redução, porém esse valor continua indicando alto grau de degradação da floresta. Os fragmentos foram reduzidos em tamanho (Figura 5c) o que permitiu uma redução na densidade de bordas.

O índice de forma médio (SHAPE_MN) mede a complexidade da forma comparada a um quadrado (quando analisada em dados matriciais, como neste estudo). A forma é um parâmetro importante para estudos de fragmentos, uma vez que está relacionada ao efeito de borda, quanto mais complexas e alongadas são as formas, maior é o efeito de borda. Nas Figuras 5f e 5g, verifica-se que as formas dos fragmentos tendem a serem mais complexas com valores acima de 1,3 e 1,04 nos 34 anos de análise. Estas formas complexas indicam a necessidade de maior controle de seus limites (bordas) com a matriz de seu entorno, essencialmente urbanizada, pois quanto mais irregular e menor o seu perímetro maior será a área de contato com a matriz. Conforme McGarigal et al (2002), áreas circulares são desejáveis, já que reduzem a relação borda/interior, e o centro encontra-se mais protegido por estar menos exposto aos efeitos de borda. Por outro lado, fragmentos alongados possuem elevada razão borda/interior e estão mais sujeitos a alterações de borda, impactando a manutenção de determinadas espécies da fauna e flora (Farina, 1998). Na borda do fragmento pode haver alteração no microclima, devido à maior incidência solar e de vento, além de maior vulnerabilidade ao fogo (Nascimento e Laurance 2006).

A métrica PARA_MN obteve um aumento entre 1977 a 1994 e uma leve redução entre 1977 a 2011 (Figura 5h), indicando que a forma dos fragmentos tende a serem mais complexas e assim mais vulneráveis as intervenções da matriz urbana ao redor dos fragmentos florestais. Esta métrica de paisagem mede a relação perímetro/área das manchas, e quanto maior ela for pior será a forma do fragmento (Figura 5h). Segundo Forman e Godron (1986), os fragmentos de floresta com forma mais próxima à circular estão menos sujeitos às intervenções da matriz, enquanto aqueles com formas mais alongadas são os mais sujeitos a essas intervenções, porém se estes estiverem mais próximos entre si o efeito da matriz pode diminuir. Portanto, a métrica PARA_MN deve ser interpretada com cautela e associada a outras métricas, como a PROX_MN, que mede o grau de proximidade das manchas e tem implícito em seus resultados o grau de isolamento dos fragmentos. Os valores da métrica PARA apontam um aumento significativo ao longo das décadas indicando que os fragmentos tendem para uma forma mais irregular (Figura 5h).

Considerando que o raio de busca de 100m, os valores encontrados para a métrica PROX_MN (Figura 5i), o qual mede o grau de isolamento das manchas, indicam que os fragmentos florestais estavam mais próximos em 1977; para os anos seguintes estes fragmentos ficaram mais isolados entre si, e em 2011 houve uma pequena diminuição deste índice, entretanto estes valores indicam que os fragmentos florestais ficaram mais isolados ao longo das décadas.

As alterações na paisagem urbana, relacionadas redução da cobertura florestal podem interferir nos ciclos biogeoquímicos (Grimm et al, 2008), uma vez que o carbono contido na biomassa florestal é liberado para atmosfera. Além dos problemas ambientais do desflorestamento, como emissões de gases do efeito estufa e a redução da biodiversidade. A urbanização causa concentração de veículos de transporte e indústrias nas cidades, como Manaus, que emite uma grande concentração de CO₂ para a atmosfera, com consequência em escala global.

Entre os vários efeitos da concentração populacional nas cidades estão o grande consumo de energia, tanto de combustíveis fósseis, recursos naturais (madeira, areia, cascalho, etc), como a energia elétrica (Clement, 2010). Em Manaus, estes fatores são agravados, principalmente a geração de energia elétrica fornecida à população e as indústrias, cerca de 70% é produzida em usinas termoeletricas, com a queima de diesel.

O desmatamento na área urbana, o crescimento da construção civil e conseqüente impermeabilização do solo também podem causar sérios problemas para a população local. Neste processo as temperaturas tendem a se tornar mais altas, interferindo no conforto térmico, a probabilidade de ocorrer enchentes também é aumentada (Bononi, 2004).

Conclusão

A existência de uma série histórica de imagens do programa LANDSAT da NASA permite realizar estudos históricos e geocológicos adequados, uma vez torna-se possível avaliar as alterações ocorridas na paisagem em décadas passadas. As técnicas atuais de processamento digital de imagens disponíveis em *softwares* livres (SPRING/INPE), tais como o modelo linear de mistura espectral, segmentação e classificação de imagens possibilitaram mapear e analisar as modificações em um trecho da Floresta Amazônica contida na cidade de Manaus.

Nos 34 anos analisados neste estudo a cobertura florestal na cidade reduziu drasticamente, restando apenas cerca de 40% das florestas originais. A principal causa do desflorestamento na cidade é o crescimento urbano e populacional, associado principalmente à existência da Zona Franca e do Polo industrial. Estes constituintes possuem importância nacional, contudo são os principais fatores de atração de fluxos migratórios, tanto do interior do Amazonas, como de fora do Estado.

O processo de desflorestamento e conseqüentemente a fragmentação florestal não implica somente em perda de florestas, mas também numa redução do tamanho dos fragmentos florestais, aumento da distância entre os fragmentos e, por conseguinte maior intervenção nos limites entre a matriz urbana e a borda do fragmento. As análises das métricas de paisagem permitiram o estabelecimento de uma base informativa que serve de suporte para o planejamento de ações futuras tanto para ocupação, quanto para a conservação de fragmentos florestais na cidade de Manaus.

Novos estudos estão sendo realizados na área urbana de Manaus, especificamente nos maiores fragmentos florestais, com objetivo de proteger e conservar estes remanescentes. Estes estudos são em escala de detalhe com uso de imagens de altíssima resolução do satélite *WorldView-2*, que possibilita mapear o padrão das espécies arbóreas dominantes nos ambientes, permitindo ainda um aprimoramento das métricas de paisagem na cidade de Manaus, Amazonas.

Referências

- Adams, J.B.; Sabol, D.E.; Kapos, V.; Almeida Filho, R.; Roberts, D.A.; Smith, M.O.; Gillespie, A. R. Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: application to land-cover change in the Brazilian Amazon. **Remote Sensing of Environment**. v.52, p.137-154. 1995.
- Araya, Y.H.; Cabral, P. Analysis and modeling of urban land cover change in Setúbal and Sesimbra, Portugal. **Remote Sensing**, v. 2, p.1549-156.3, 2010.
- Bononi, V.L.R. Controle ambiental de áreas verdes. In: Philippi Jr, A.; Romério, M.A.; Bruna, G.C. (eds.) **Curso de gestão ambiental**. Coleção Ambiental. Barueri, SP: Manoele, 2004. p. 213-255.
- Câmara, G.; Souza, R.C.M.; Freitas U.M.; Garrido, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, 20: (3) 395-403, 1996.
- Carreiras, J.M.B., Shimabukuro, Y.E., Pereira, J.M.C., Fraction images derived from SPOT-4 VEGETATION data to assess land-cover change over the State of Mato Grosso, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v 23, n. 23, p. 4979-4983, 2002.

- Clement, M.T. Urbanization and the natural environment: an environmental sociological review and synthesis. **Organization & Environment**. v. 23, n. 3, p. 291–314, 2010.
- Farina, A. **Principles and methods in landscape ecology**. Chapman & Hall Ltd., London. 1998. 224p.
- Forman, R.T.T.; Godron, M. **Landscape ecology**. Wiley & Sons Ed. New York. 1986.
- Freitas, R.M.; Haertel, V.; Shimabukuro, Y.E. Modelo linear de mistura espectral em imagem de moderada resolução espacial. **Bol. Ciênc. Geod.**, v. 14, n. 1, p.55-71, 2008.
- Gascon, C.; Laurance, W.F.; Lovejoy, T.E.; Fragmentação florestal e biodiversidade na Amazônia central, In: **Conservação da biodiversidade de ecossistemas tropicais: Avanços conceituais e revisão de novas metodologias de avaliação e monitoramento**, p. 112-127, Editora Vozes, Petropolis, Brazil, 2002.
- Grimm, N.B.; Faeth, S.H.; Golubiewski, N.E.; Redman, C.L.; Wu, J. Bai, X.; Briggs. Global change and the ecology of cities. **Science**, v. 319, p. 756, 2008.
- Guindon, B.; Zhang, Y.; Dillabaugh, C. Landsat urban mapping based on a combined spectral–spatial methodology. **Remote Sensing of Environment**. 92 (2004) 218–232.
- Haertel, V., Shimabukuro, Y. E., Almeida-Filho, R., Fraction images in multitemporal change detection. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 23, p. 5473-5489, 2004.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Cidades informações estatísticas, 2011. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/>. Acesso em: nov. 2011.
- Landis, J.R.; Koch, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, n.1, p.159-174, 1977.
- Laurance, W.F.; Cochrane, M.A.; Bergen, S.; Fearnside, P.M.; Delamônica, P.; Barber, C.; D'angelo, S.; Fernandes, T. The future of the brasilian Amazon. **Science**, v. 291, p. 438-439, 2001.
- Mcarthur, R.H.; Wilson, E.O. **The theory of island biogeography**. Monographs in population biology, n.1, Princeton, NJ: Princeton University Press. 1967.
- Megarigal, K., Marks. B.J. **FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure**. Gen. Tech. Report PNW-GTR-351, USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR. 1995.
- Megarigal, K.; Cushman, S.A.; Neel, M.C.; Ene, E. **FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps**. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst. Available at the following. 2002. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>. Acesso em: out.2010.
- Metzger, J.P. O que é ecologia de paisagens? **Biota Neotropica**, v. 1, p. 1-9, 2002.
- Montgomery, M.R. The urban transformation of the developing World, **Science**, v. 319, p.761, 2008.
- Nascimento, H.E.M.; Laurance, W.F. Efeitos de área e de borda sobre a estrutura florestal em fragmentos de floresta de terra-firme após 13-17 anos de isolamento. **Acta Amazonica**, v. 36, p. 183-192, 2006.
- Oliveira, J.A.; Shor, T. Manaus: transformações e permanências, do forte à metrópole regional. In: Castro, E. (org.) **Cidade na Floresta**. São Paulo: Anna Blume, 2009. p.59-98.
- Schowengerdt, R. A. **Remote sensing: models and methods for image processing**. New York: Academic Press, 1997. 2ª ed. 522 p.
- Shimabukuro, Y.E.; Smith, J.A. The least-square mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v. 29, p. 6-20, 1991.
- Tooke, T.R.; Coops, N.C.; Nicholas R. Goodwin, N.R.; Voogt. J.A. Extracting urban vegetation characteristics using spectral mixture analysis and decision tree classifications. **Remote Sensing of Environment**, 113, 398–407, 2009.
- Worldwatch Institute. **State of the world 2007: Our urban future**. Washington, DC: Author, 2007.