

EFEITOS DA MUDANÇA DE ESCALA EM PADRÕES DE DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA

Effects of Changes in Scale of Deforestation Patterns in Amazon

Érika Akemi Saito
Leila Maria Garcia Fonseca
Maria Isabel Sobral Escada
Thales Sehn Korting

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

Divisão de Processamento de Imagens – DPI

Avenida dos Astronautas, nº1758, CEP: 12227-010 - São José dos Campos – SP

erika@dpi.inpe.br

leila@dpi.inpe.br

isabel@dpi.inpe.br

tkorting@dpi.inpe.br

RESUMO

A floresta tropical Amazônica tem sido substituída por outros tipos de cobertura e usos da terra como pastos, diferentes tipos de culturas agrícolas, garimpo, exploração madeireira e assentamentos de reforma agrária. Vários estudos têm sido realizados para monitoramento da floresta e para a análise da dinâmica da paisagem, os quais são fundamentais para o entendimento do processo de ocupação da Amazônia. Assim, este trabalho tem como objetivo analisar a sensibilidade de algumas métricas da paisagem em relação à variação do tamanho das células associadas aos padrões de desmatamento e, também, aos diferentes tipos de ocupação humana. Os tamanhos testados de células foram de 25 km, 40 km, 50 km, 60 km e 70 km. Neste estudo, dados de desmatamento do Monitoramento da Floresta Amazônica por Satélite (PRODES) foram utilizados e nove métricas, que medem parâmetros da estrutura da paisagem foram avaliadas. Os resultados demonstraram que as métricas MPFD, AWMPFD, MSI e AWMSI são independentes da variação do tamanho das células e as métricas ED, MPAR, MPS e PSSD conseguem discriminar os tipos de padrões de desmatamento analisados. Os resultados obtidos neste trabalho podem subsidiar a escolha adequada do tamanho da grade celular em estudos de análise da paisagem que relacionam padrões de desmatamento com os diferentes processos e estágios de ocupação nas regiões de fronteira agropecuária da Amazônia Legal.

Palavras chaves: Amazônia, Desmatamento, PRODES, Ocupação Humana, Métricas da Paisagem, Geoprocessamento.

ABSTRACT

The Amazon rainforest have been replaced by other cover and land uses types such as pastures, agricultural crops, mining, logging and settlements. Studies for monitoring and analyzing forest landscape dynamics are fundamental to understand the Amazon occupation process. This study aims to analyze the sensitivity of the landscape metrics in relation to cells sizes variation and to different deforestation patterns associated with different types of human occupation. The window cell sizes tested were 25 km, 40 km, 50 km, 60 km and 70 km. This study used data from Amazon Deforestation Monitoring by Satellite (PRODES) and nine metrics that describe the landscape structure were evaluated. The results showed that the metrics MPFD, AWMPFD, MSI and AWMSI are independent of the scale variation as well as the metrics ED, MPAR, MPS and PSSD are adequate to discriminate the studied deforestation patterns analyzed here. The results provided in this work can support the studies of deforestation patterns related to the different process and stages of occupation in the Amazon agricultural frontier regions.

Keywords: Amazon, Deforestation, PRODES, Human Occupation, Landscape Metrics, GIS.

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia brasileira tem experimentado surtos de ocupação e desenvolvimento de diferentes atividades

econômicas que ocorrem na maioria das vezes, concomitantemente, como a extração de borracha, agricultura familiar, expansão de rodovias e de empresas interessadas na pecuária, agricultura

mecanizada, extração de madeira e mineração e desenvolvimento urbano (BECKER, 2004; 2005; PEDLOWSKI et al., 1997; ASNER et al., 2002).

O PRODES (INPE, 2010a), Sistema de Monitoramento da Floresta Amazônica por Satélite, estima taxas anuais de desmatamento da Amazônia Legal e produz grandes quantidades de dados espaciais de desmatamento da Amazônia Legal disponibilizados em bancos de dados digitais (INPE, 2008). De acordo com o INPE (2010a), em 2009 cerca de 458.971 km² de floresta já havia sido desmatada e substituída por outras coberturas. De 1997 até 2004 a taxa anual de desmatamento apresentou tendência de aumento. Em 2004, o INPE estimou a maior taxa de desmatamento desde 1988, quando o PRODES iniciou o monitoramento anual do desmatamento, de 27.770 km². A partir de então, a taxa se reduziu chegando a 7.400 km² em 2009 (INPE, 2010a). O PRODES disponibiliza na internet dados tabulares das estimativas de desmatamento, e um banco de dados espacial com dados de desmatamento.

Mesmo com o acesso público aos dados de desmatamento na internet, os mesmos têm sido pouco explorados. A partir desses dados é possível analisar e identificar os padrões de desmatamento relacionando-os com as diferentes formas de ocupação humana e os principais usos da terra. Este tipo de análise é importante para agregar conhecimento aos dados de desmatamento e para subsidiar o planejamento e ordenamento territorial da Amazônia.

Para a análise da paisagem utilizando os dados de desmatamento pode-se trabalhar com objetos individuais, representados por cada um dos polígonos de desmatamento (SILVA et al., 2008) ou com células onde cada uma é representada por um conjunto de polígonos de desmatamento (AZEREDO et al., 2008).

Na análise baseada em células a área de estudo é subdividida em pequenas regiões regulares. No espaço celular os polígonos são agregados em unidades maiores, e cada célula representa uma porção da paisagem. Assim, cada célula desta grade é associada a um padrão de desmatamento, onde cada padrão é descrito por um conjunto de métricas da paisagem. No

entanto, a definição do tamanho das células é um desafio, principalmente quando a área de estudo possui grande extensão territorial, como é o caso da Amazônia Legal, muito maior que muitos países europeus.

Este trabalho tem como objetivo analisar a sensibilidade das métricas de ecologia da paisagem em relação aos diferentes tamanhos de células e diferentes padrões espaciais de desmatamento na Amazônia Legal. A idéia é verificar se um determinado padrão pode ser caracterizado por um conjunto de métricas mesmo variando o tamanho das células. Desta forma, neste estudo, a região da Amazônia Legal é analisada em relação aos padrões espaciais resultantes dos processos de desmatamento, associados aos diferentes tipos de ocupação humana. Dados de desmatamento do PRODES são utilizados nos experimentos e cada padrão é delimitado e representado por células regulares de diferentes tamanhos. Os resultados obtidos neste trabalho podem subsidiar estudos de análise de padrões da paisagem na Amazônia indicando tamanhos de células adequados para a região analisada.

1.1. Padrões de desmatamento na Amazônia e análise da paisagem

As diferentes formas de ocupação e atividades econômicas desenvolvidas na Amazônia estão associadas aos diferentes atores sociais presentes em uma região. Vários estudos de análise de padrões de desmatamento observados em imagens de sensoriamento remoto, associados aos diferentes processos de ocupação têm sido realizados (ESCADA, 2003; BATISTELLA e MORAN, 2005; EWERS e LAWRENCE, 2006, OLIVEIRA e METZGER, 2006, MERTENS e LAMBIN, 1997).

Husson et al. (1995) definiram a seguinte tipologia de padrões de desmatamento para regiões tropicais: geométrico, corredor, espinha de peixe, difuso, fragmentos e ilha, ilustrados na Figura 1. Mertens e Lambin (1997) utilizaram esta tipologia na análise dos padrões de desmatamento no sul de Camarões identificando os padrões corredor, difuso e ilha.

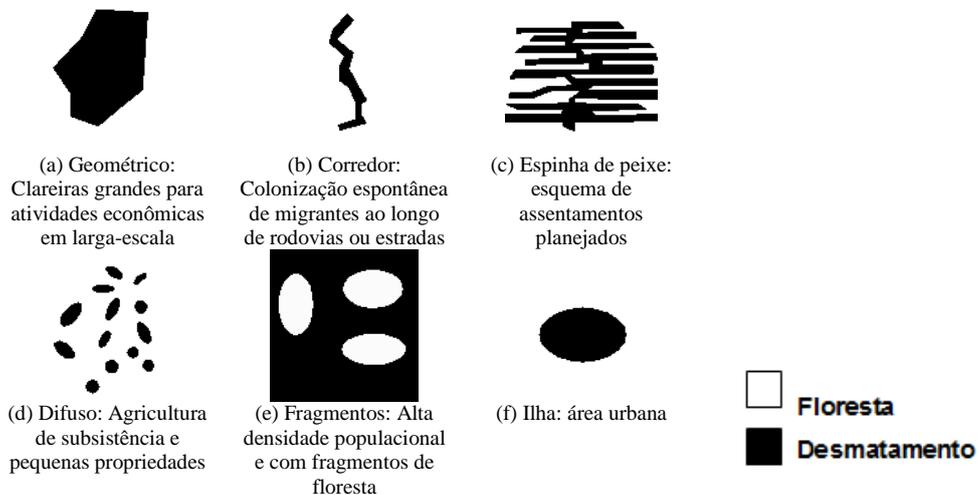


Fig. 1 - Padrões de desmatamento. Fonte: Adaptado de Mertens e Lambin (1997).

Escada et al. (2005) analisaram a região Centro-Norte de Rondônia e encontraram dez diferentes padrões de ocupação, associados a diferentes tamanhos de propriedades, formas de apropriação da terra, idade de ocupação e configuração espacial. Nesse estudo, realizado em escala local, os autores evidenciam a grande heterogeneidade de padrões espaço-temporais presentes na Amazônia brasileira. Vários desses padrões, além do padrão espinha de peixe, estavam associados a estabelecimentos de projetos de assentamento do INCRA. O padrão espinha de peixe é encontrado também na rodovia Transamazônica no Estado do Pará.

Oliveira Filho e Metzger (2006) além dos padrões espinha de peixe, corredor e geométrico, trabalharam também com assentamentos chamados independentes, compostos por pequenas propriedades distribuídas irregularmente e ocupadas por famílias que se estabeleceram independentemente dos programas de governo. De acordo com os autores, o padrão de desmatamento de grandes propriedades (geométrico) no Mato Grosso é caracterizado por desmatamentos maiores que 10 km², que equivale a 1000 ha.

A construção e distribuição espacial das estradas e dos programas de colonização foram vetores importantes nos processos de transformação da paisagem amazônica (Lui e Molina, 2009), muitas vezes gerando padrões de desmatamento do tipo linear ou corredor.

Silva et al. (2008) utilizaram um sistema de mineração de dados para analisar os polígonos de desmatamento associados a diferentes tipos de estabelecimentos rurais em uma região de fronteira

agropecuária no sudeste do Pará. Eles definiram cinco padrões de desmatamento: 1) padrão linear que se caracteriza por pequenas clareiras abertas ao longo de estradas; 2) padrão irregular pequeno e isolado, associados a pequenas fazendas que utilizam mão-de-obra familiar; 3) irregular, associado a pequenas fazendas que utilizam mão-de-obra familiar e de terceiros; 4) Irregular médio associado às fazendas médias e; 5) geométrico regular grande (> 900 ha = 9 km²) localizado em regiões isoladas e associados a grandes fazendas.

2. METODOLOGIA

Para avaliar a robustez das métricas para caracterização dos padrões de desmatamento em relação à variação de tamanho da célula dados de desmatamento do PRODES foram utilizados. Selecionaram-se os dados de desmatamento até o ano de 2006 para a elaboração do mapa para a Amazônia Legal.

Uma tipologia associando-se padrões espaciais de desmatamento aos processos e tipos de ocupação foi construída. A seleção de padrões de desmatamento baseou-se na análise dos dados do PRODES, para a região da Amazônia Legal, e em padrões descritos na literatura (MERTENS e LAMBIN, 1997; EWERS e LAURANCE, 2006; OLIVEIRA FILHO e METZGER, 2006; ESCADA, 2003).

A Tabela 1 apresenta a tipologia de padrões de desmatamento apresentando exemplos baseados em dados do PRODES, e uma breve descrição das características e semânticas associadas aos padrões.

TABELA 1 - TIPOLOGIA DE PADRÕES DE DESMATAMENTO.

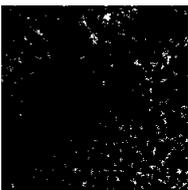
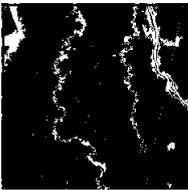
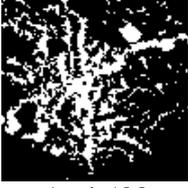
PRODES 2007- Amazônia Legal	Padrão de Desmatamento	Descrição Escala 1:100.000	Semântica Padrão de Ocupação
 Xapuri - AC	Difuso	-Manchas pequenas, isoladas; -Forma variada, irregular; -Baixa a média densidade; -Distribuição uniforme.	-Áreas de ocupação espontânea; -Pequenos e médios estabelecimentos rurais; -Atividades econômicas: agricultura de subsistência, pequena pecuária; -Estágio inicial de ocupação.
 Jacareacanga-PA	Linear	-Manchas médias e grandes; - Manchas de forma alongada dispostas ao longo das vias de acesso; - Baixa densidade.	-Ocupação ao longo de estradas e vias de acesso; -Pequenos e médios estabelecimentos rurais; -Atividades econômicas: agricultura familiar, pecuária. -Estágio inicial a intermediário de ocupação.
 Novo Ariapunã-AM	Multidirecional ordenado	-Manchas pequenas isoladas dispostas ao longo dos rios; -Baixa densidade.	-Ocupação ribeirinha; -Pequenos e médios estabelecimentos rurais; -Atividades econômicas: agricultura e pecuária de subsistência, e pesca; -Estágio inicial a intermediário de ocupação.

TABELA 1 (Continuação).

PRODES 2007- Amazônia Legal	Padrão de Desmatamento	Descrição Escala 1:100.000	Semântica Padrão de Ocupação
 Nova Maringá-MT	Geométrico regular	-Manchas médias a grandes e isoladas; -Forma geométrica regular; -Baixa a média densidade.	- Médios e grandes estabelecimentos rurais. -Atividades econômicas: agricultura, principalmente monoculturas de grãos e pecuária de média a larga escala; -Estágio intermediário de ocupação.
 Placas-PA	Espinha de Peixe	-Manchas grandes alongadas e lineares com ramificações semelhantes à vértebra de peixe; -Média densidade.	-Áreas de projeto de Assentamento rural do INCRA; -Pequenos e médios estabelecimentos rurais; -Atividades econômicas: agricultura familiar, pequena pecuária; - Estágio intermediário de ocupação.
 Rio Branco-AC	Multidirecional desordenado	-Manchas pequenas, médias e grandes; -Manchas de formas variadas, irregulares, complexidade elevada; -Média, alta densidade; -Multidirecional.	-Pode haver concentração fundiária; -Pequenos, médios e grandes estabelecimentos rurais; -Atividades econômicas: agricultura, pecuária, extração madeireira; -Estágio intermediário de ocupação, muitas vezes espontânea.
 Apuí- AM	Ilha	-Manchas pequenas, médias e grandes em geral, ligadas a estruturas lineares representadas por vias de acesso e rios; -Manchas homogêneas; -Baixa, média a alta densidade.	-Manchas urbanas. -Estágio avançado de ocupação.
 Jarú, Ouro Preto do Oeste, - RO	Consolidado	-Manchas grandes e contínuas de desmatamento; -Forma variada; -Densidade baixa e áreas pequenas de remanescentes florestais; -Manchas compactas.	-Concentração fundiária; -Pequenos, médios e grandes estabelecimentos rurais; - Atividades econômicas: agricultura, pecuária de pequena a larga escala, extração madeireira, empresários; -Esgotamento da floresta; - Fragmentação florestal; -Estágio avançado de ocupação.

Desmatamento
 Floresta

Baseados nas dimensões e nos arranjos espaciais das feições de interesse, cinco tamanhos de células foram analisados. Além disso, a fim de preservar as principais características espaciais dos

padrões estudados e assim poder compará-los, o mesmo ponto central (mesma coordenada geográfica) para todas as células foi mantido, como mostra a Figura 2.

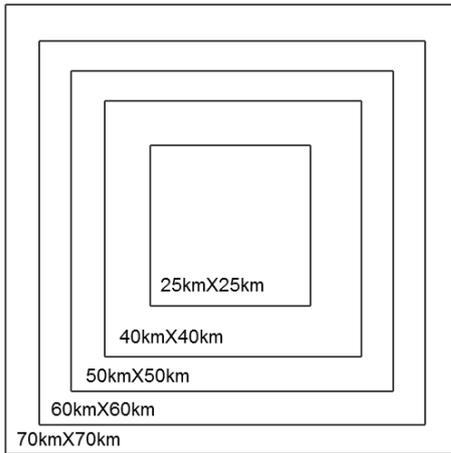


Fig.2 - Tamanho das células.

Dez amostras contendo polígonos que representassem cada um dos oito padrões de desmatamento foram selecionadas e recortadas de acordo com cinco diferentes tamanhos de célula, totalizando 400 amostras. Para as 400 amostras foram calculadas nove métricas de ecologia da paisagem no *Patch Analyst 4* (ELKIE et al., 1999). Essas métricas podem ser divididas em três grupos: 1) índice de borda, 2) índice de tamanho e 3) índice de forma. Essas medidas e as siglas (Tabela 2) presentes nas equações são descritas (MCGARIGAL et al., 1995):

TABELA 2 - SIGLAS PRESENTES NAS EQUAÇÕES DAS MÉTRICAS DE ECOLOGIA DA PAISAGEM.

i	1,...,m ou m` tipos de manchas (classes)
j	1,...,m ou m` tipos de manchas (classes)
m	Número de tipos de manchas (classes) presente na paisagem, excluindo a borda da paisagem se estiver presente
$m`$	Número de tipos de manchas (classes) presente na paisagem, incluindo a borda da paisagem se estiver presente
a_{ij}	Área da mancha
A	Área total da paisagem
P_i	Proporção de paisagem ocupada pelo tipo (classe) de mancha i
$n_i = n$	Número de manchas da paisagem em relação ao tipo de classe da mancha i
e_{ik}	Comprimento (m) total das bordas na paisagem entre os tipos de classe i e k ; incluindo as manchas da fronteira representando a borda que envolve a mancha i .
p_{ij}	Perímetro (m) das manchas ij

2.1 Índice de Borda

Edge Density - Densidade de borda (ED): razão entre a borda total e a área total da paisagem dado em metros por hectare. $ED=0$ quando não há nenhuma classe com borda na paisagem. Avalia o grau de heterogeneidade espacial na paisagem.

$$ED = \frac{\sum_{k=1}^{m'} e_{ik}}{A} (10.000) \quad (1)$$

2.2 Índices de Tamanho

Mean Patch Size - Tamanho médio das manchas (MPS): O tamanho médio das manchas é dado em hectares (ha), sendo $MPS>0$. Esse índice permite analisar a fragmentação das manchas.

$$MPS = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n_i} \left(\frac{1}{10.000} \right) \quad (2)$$

Patch Size Standard Deviation - Desvio padrão do tamanho da mancha (PSSD): Desvio padrão das áreas das manchas, dado em hectares. $PSSD=0$ quando todas as manchas são do mesmo tamanho ou quando há uma única mancha na paisagem.

$$PSSD = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \left[a_{ij} - \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n_i} \right) \right]^2}{n_i}} \left(\frac{1}{10.000} \right) \quad (3)$$

Patch Size Coefficient of variation - Coeficiente de variação do tamanho da mancha (PSCOV): Este índice é dado em porcentagem, mede a variabilidade do tamanho relativo em relação a média de tamanho.

$$PSCOV = \frac{PSSD}{MPS} (100) \quad (4)$$

2.3 Índices de Forma

Mean Patch Fractal Dimension - Dimensão fractal média da mancha (MPFD): Mede a irregularidade ou complexidade de forma da mancha. MPFD se aproxima de 1, para manchas com formas muito simples, como círculos ou retângulos, e tende a 2 para manchas de formas mais complexas.

$$MPFD = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{2 \ln p_{ij}}{\ln a_{ij}} \right)}{n_i} \quad (5)$$

Area Weight Mean Patch Fractal Dimension - Dimensão fractal média da mancha ponderada pela área (AWMPFD): Mede a irregularidade ou complexidade da forma da mancha. AWMPFD aproxima-se de 1 para manchas com forma mais simples, como círculos ou retângulos e aproxima-se de 2 quando as manchas possuem forma mais complexa.

$$AWMPFD = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{2 \ln p_{ij}}{\ln a_{ij}} \right) \left(\frac{a_{ij}}{A} \right) \right] \quad (6)$$

Mean Perimeter-Area Ratio - Razão perímetro médio-pela área de cada mancha (MPAR): Este índice mede a complexidade do polígono.

$$MPAR = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{p_{ij}}{a_{ij}}}{n_i} \quad (7)$$

Mean Shape Index - Índice de forma média (MSI): razão do perímetro pela área média dividido pelo número de manchas. MSI=1 quando todas as manchas são circulares ou retangulares (dado vetorial). Não há unidade.

$$MSI = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{p_{ij}}{2\sqrt{\pi \circ a_{ij}}} \right)}{n_i} \quad (8)$$

Area Weight Mean Shape Index - Índice de forma médio ponderado pela área (AWMSI): Razão entre o perímetro e a raiz quadrada da área, ponderado pela área da mancha de modo que as manchas maiores pesam mais do que os menores. AWMSI=1 se todas as manchas são circulares ou retangulares. Esse índice aumenta conforme a complexidade dos polígonos aumenta, ou seja, conforme as formas tornam-se mais irregulares.

$$AWMSI = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{p_{ij}}{2\sqrt{\pi \circ a_{ij}}} \right) \left(\frac{a_{ij}}{A} \right) \right] \quad (9)$$

A partir dos valores das métricas, gráficos do tipo *box plots* foram construídos. Estes gráficos apresentam os valores mínimo, máximo, primeiro quartil, mediana e terceiro quartil. Dentre estas estatísticas, a mediana é utilizada para a comparação entre fenômenos de mesma espécie. A mediana é o valor que ocupa exatamente o meio de um conjunto de valores dispostos em ordem crescente ou decrescente; o primeiro quartil e o terceiro quartil abrangem 25% e 75% respectivamente dos termos da série de valores (MOREIRA, 1968).

Após a análise individual de cada tamanho de célula e cada padrão de desmatamento o software *Geographical Data Mining Analyst* (GeoDMA) (Korting et al., 2008) foi utilizado para fazer a mineração dos dados e a classificação das células considerando os padrões definidos na etapa anterior.

O sistema GeoDMA inicialmente foi baseado no protótipo de mineração de dados proposto por Silva et al. (2008) e, a partir de então, ele tem evoluído incluindo diversas ferramentas para segmentação,

extração e seleção de atributos, treinamento, classificação, visualização e validação da classificação e análise de dados temporais. O sistema GeoDMA foi implementado na Linguagem C++, baseado na biblioteca TerraLib (INPE, 2010b), e funciona como um *plugin* para o aplicativo do TerraView (INPE, 2010b), que manipula e visualiza dados armazenados em bancos de dados geográficos. Os dados de entrada do GeoDMA podem ser imagens, objetos provenientes de segmentação e grades celulares.

Para realizar a classificação cinco amostras de treinamento de cada padrão para cada um dos tamanhos de células testados foram utilizadas. A avaliação foi feita utilizando a simulação de Monte Carlo, uma técnica que utiliza experimentos aleatórios para a solução de modelos matemáticos e análise de problemas complexos, na tentativa de simular um sistema real com base na teoria das grandes amostras (RUBISTEIN, 1981; ALMEIDA et al., 2010). No caso do GeoDMA 300 iterações foram realizadas de forma que o simulador escolhesse aleatoriamente amostras de treinamento, gerando assim 300 árvores de decisões e 300 valores de coeficiente Kappa. No final dessa etapa o GeoDMA gerou as árvores de decisão, os valores de coeficiente Kappa e a sua estimativa média. A partir da distribuição dos valores de Kappa é possível determinar um intervalo de credibilidade onde são desprezados 2,5% dos maiores e menores valores, garantindo que 95% dos dados estejam dentro de determinado intervalo. O tamanho da célula que apresentou o melhor desempenho foi selecionado no estudo de caso.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 3 a 11 apresentam os gráficos *box plots* para cada métrica analisada. A métrica MPS estima o tamanho médio dos polígonos de desmatamento. Os maiores valores de MPS, de acordo com a Figura 3, foram obtidos com o padrão de desmatamento consolidado e geométrico regular e os menores para o padrão difuso. Para os padrões consolidado e geométrico regular, o valor de MPS diminuiu conforme aumentou o tamanho da célula. A métrica MPS é afetada pela presença de pequenas manchas que são agregadas quando o tamanho da célula aumenta (FITZSIMMONS, 2003).

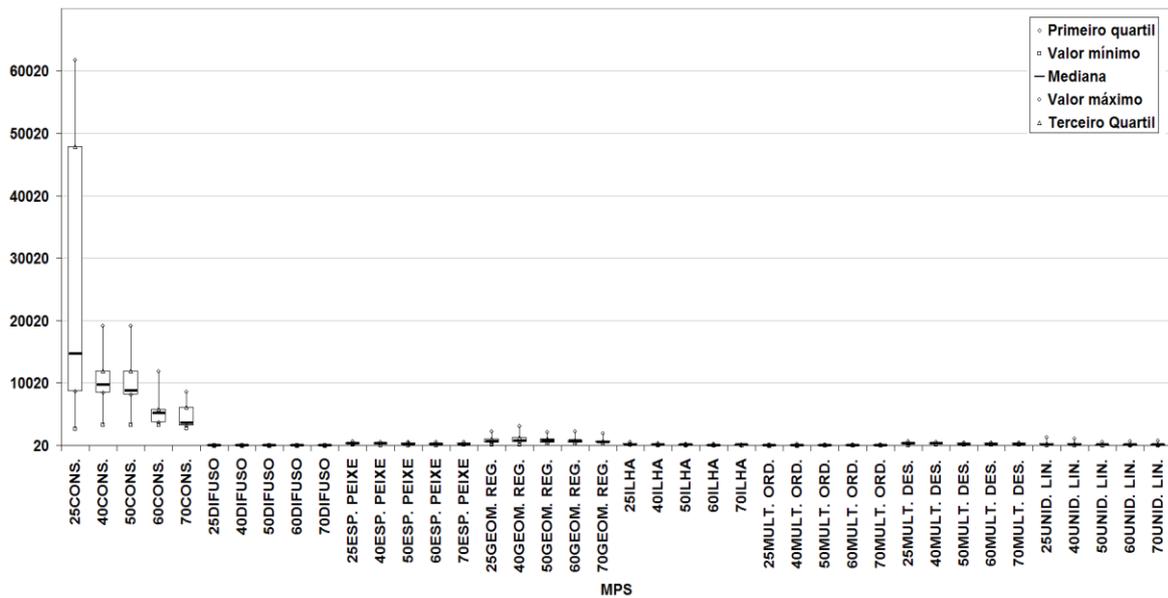


Fig.3 - Métrica MPS.

A métrica ED (Densidade de Borda) apresentada na Figura 4, mostra valores de mediana distintos para alguns dos padrões de desmatamento, como o consolidado, difuso e multidirecional ordenado

e valores similares para os padrões ilha, linear, espinha de peixe e multidirecional desordenado. Essa medida pode ser útil na diferenciação de alguns desses padrões.

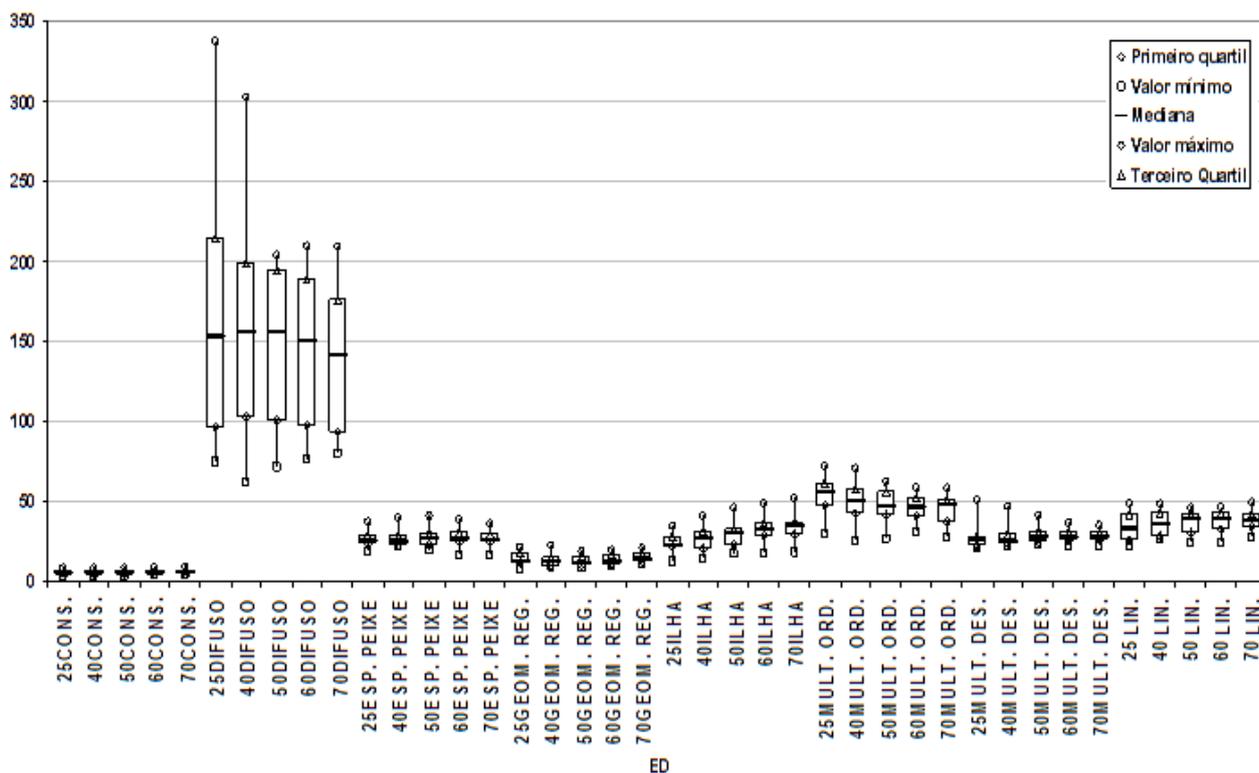


Fig. 4 - Métrica ED.

O padrão que apresentou maior densidade de borda foi o padrão difuso. Embora as manchas de desmatamento sejam pequenas, se considerarmos dois polígonos quadrados com lados medindo 1 km e 10 km, o valor de ED será igual a 40 m/ha para o primeiro

e 4 m/ha para o segundo. Desse modo, polígonos grandes, com forma regular possuem valores menores de ED do que polígonos pequenos com forma regular. Isto pode ser observado no padrão consolidado que apresentou a menor densidade de borda por conter

poucas e grandes manchas compactas. Para este padrão a variação da mediana também foi pequena em relação ao tamanho das células. Estes resultados são consistentes com os de Huang et al. (2006), que verificaram que a métrica ED, que mede densidade de borda, é sensível para a diferenciação de padrões da paisagem.

A mediana da métrica MPFD (Figura 5), que mede complexidade de forma, apresentou menor valor

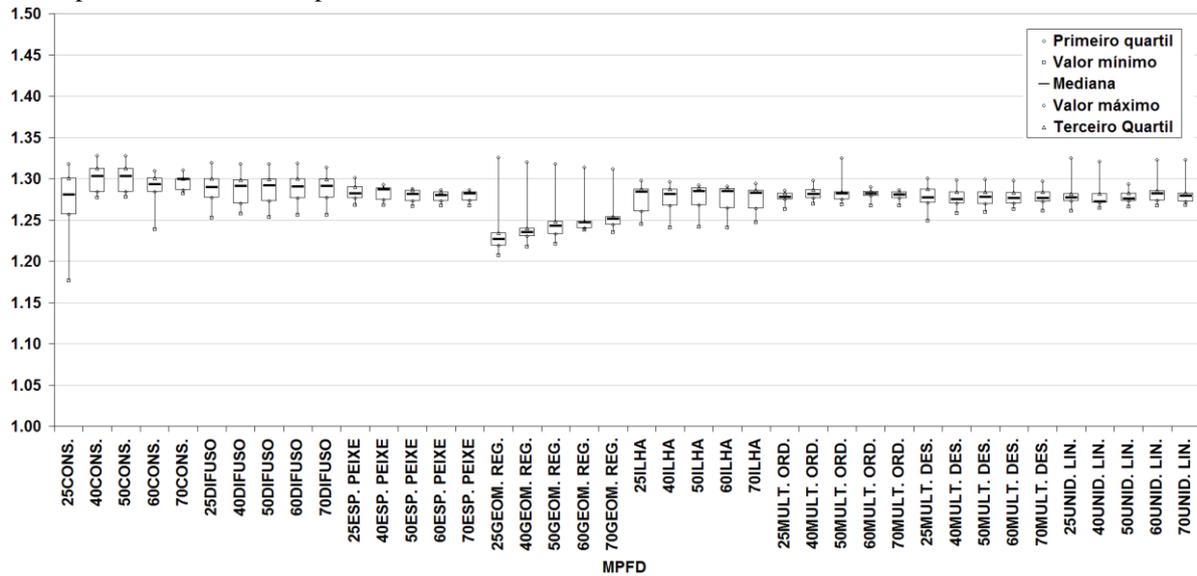


Fig. 5 - Métrica MPFD

O AWMPFD (Figura 6) é uma métrica de forma que também indica a complexidade dos polígonos. Valores baixos de AWMPFD indicam forma regular e pouco complexa, mantendo-se próximo de 1. O valor desta métrica aumenta quando as formas tornam-se mais complexas, como nos padrões do tipo multidirecional desordenado e espinha de peixe. Esta

métrica mostrou ser capaz de distinguir os padrões geométrico regular e difuso dos demais padrões, apresentando valores menores.

Com relação ao tamanho da célula esta métrica mostrou ser independente, haja vista que houve pouca variação do valor de AWMPFD em relação ao tamanho da célula, para todos os padrões analisados.

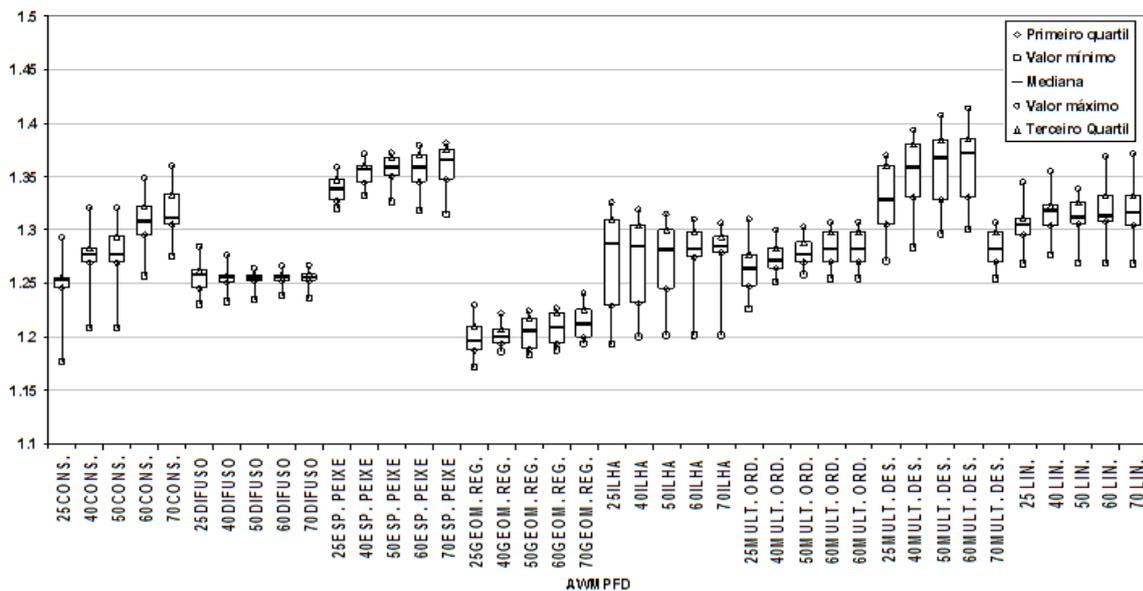


Fig. 6 - Métrica AWMPFD.

O MPAR que mede a complexidade da forma dos polígonos apresenta valores menores para formas mais regulares. O maior valor da mediana para esta métrica, como mostra a Figura 7, foi observado para o padrão consolidado. O menor valor apresentado, como esperado, foi para o padrão geométrico regular que apresenta polígonos com formas mais regulares do que os demais padrões. Seu valor aumenta, conforme o tamanho da célula aumenta, tornando-a mais

heterogênea. O padrão difuso apresentou valores de mediana altos também, pois, embora apresente polígonos com forma regular, sua pequena área faz com que a relação perímetro/área resulte em valores altos. O padrão que se destaca dos demais é o geométrico regular e seu valor aumenta conforme o tamanho da célula aumenta, tornando-a mais heterogênea.

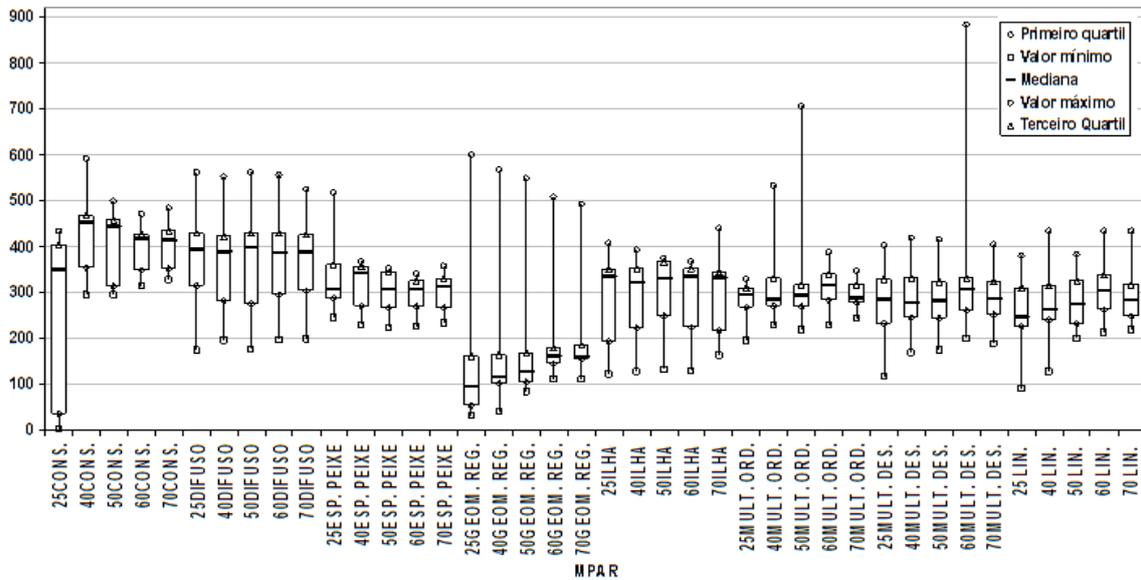


Fig. 7 - Métrica MPAR.

A métrica MSI (Figura 8), que mede a complexidade da forma, apresentou maior valor de mediana para o padrão consolidado para as células de tamanho até 50 km do que para os demais tamanhos. Os menores valores de MSI foram encontrados para o padrão difuso, não ocorrendo variação significativa em relação ao tamanho da célula. As manchas do padrão

difuso têm formas mais simples próximas a círculos, por isso o valor se aproximou de 1. Os outros padrões também não apresentaram variações desse índice com relação ao tamanho da célula. Os valores das medianas encontrados são muito próximos, de forma que essa métrica não apresentou um bom desempenho na diferenciação dos padrões.

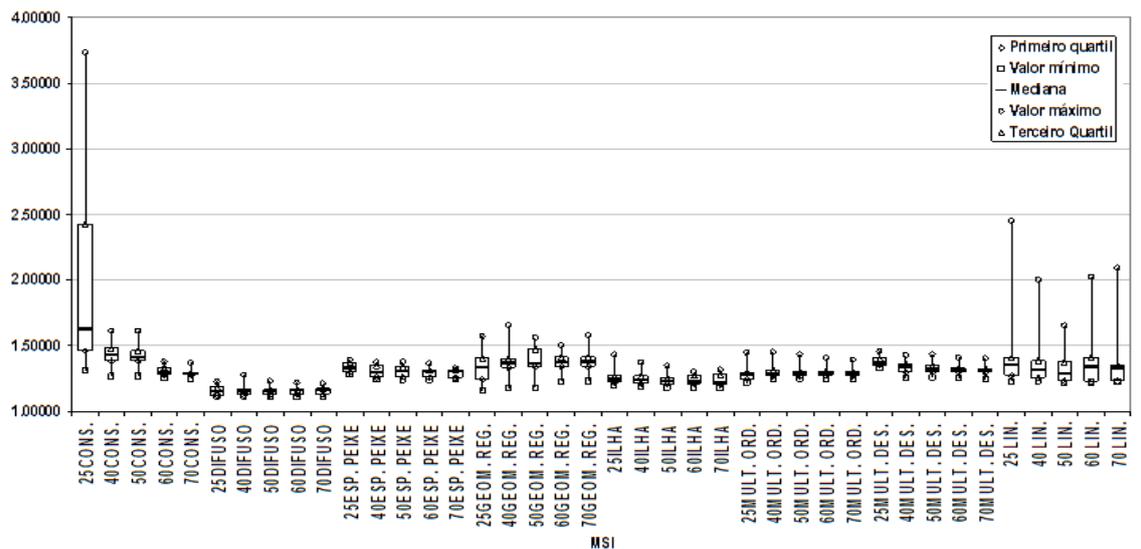


Fig. 8 - Métrica MSI.

A métrica AWMSI é uma variação da MSI, cuja razão é ponderada pela área da mancha, de modo que as manchas maiores têm maior peso do que as menores. Para quase todos os padrões, a mediana da

métrica AWMSI (Figura 9) aumentou com o aumento do tamanho da célula, devido ao aumento da heterogeneidade da mesma.

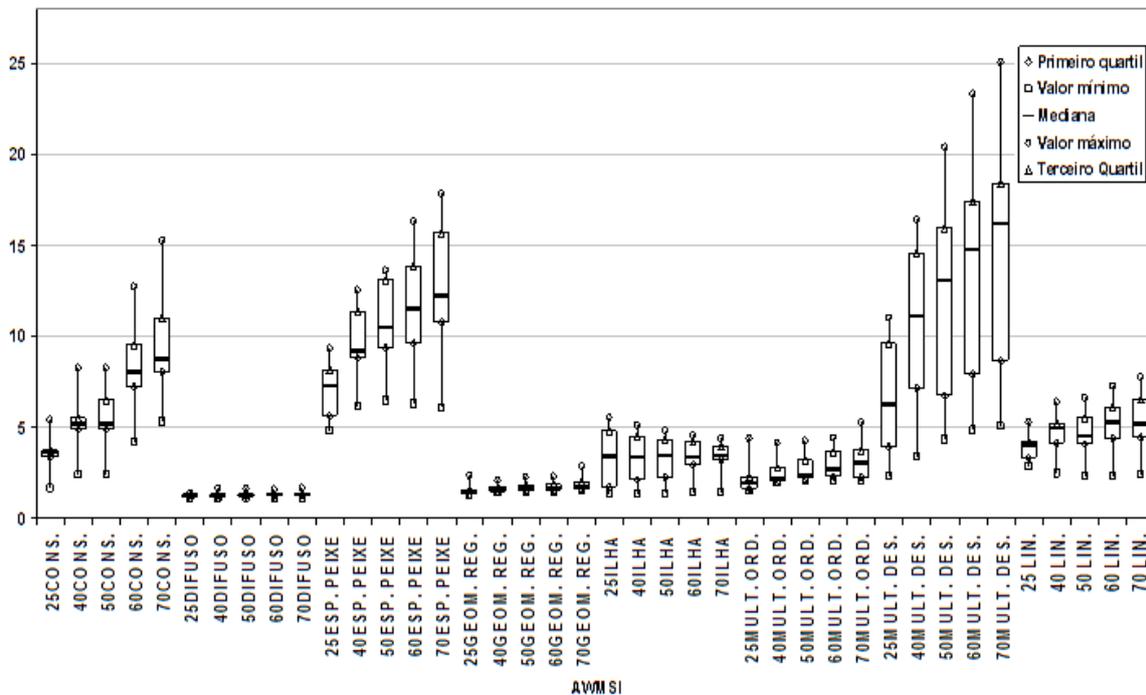


Fig. 9 - Métrica AWMSI.

Os menores valores de AWMSI foram estimados para os padrões difuso e geométrico regular, pois estes apresentam manchas com formas próximas de retângulos e/ou círculos. Conforme aumenta a complexidade da forma das manchas aumenta-se também o valor de AWMSI, como pode ser observado na Figura 9, nos padrões multidirecional desordenado, espinha de peixe, consolidado, multidirecional ordenado e linear. Com relação ao tamanho das células, a tendência geral encontrada foi de aumento nos valores de AWMSI quando as células aumentaram de tamanho, indicando que células de menores dimensões são mais homogêneas e, portanto, mais adequadas para discriminar diferentes padrões. Apenas o padrão difuso manteve o valor da mediana praticamente inalterado com o aumento do tamanho da célula, apresentando um estreito intervalo de variação dos valores estimados.

Esse padrão mostrou ser bastante uniforme quanto à forma para todos os tamanhos de células.

O PSSD é uma medida de desvio padrão da área das manchas. Ele é igual a zero quando todas as manchas são do mesmo tamanho ou quando há uma única mancha na paisagem

O maior valor do PSSD foi observado no padrão consolidado (Figura 10), que pode apresentar uma variação muito alta no tamanho das manchas de desmatamento, pois manchas muito pequenas podem estar próximas de grandes áreas desmatadas. Para os padrões consolidado, multidirecional desordenado e espinha de peixe, o valor dessa métrica aumentou conforme aumentou o tamanho da célula, indicando um aumento na heterogeneidade na célula com relação ao tamanho dos polígonos.

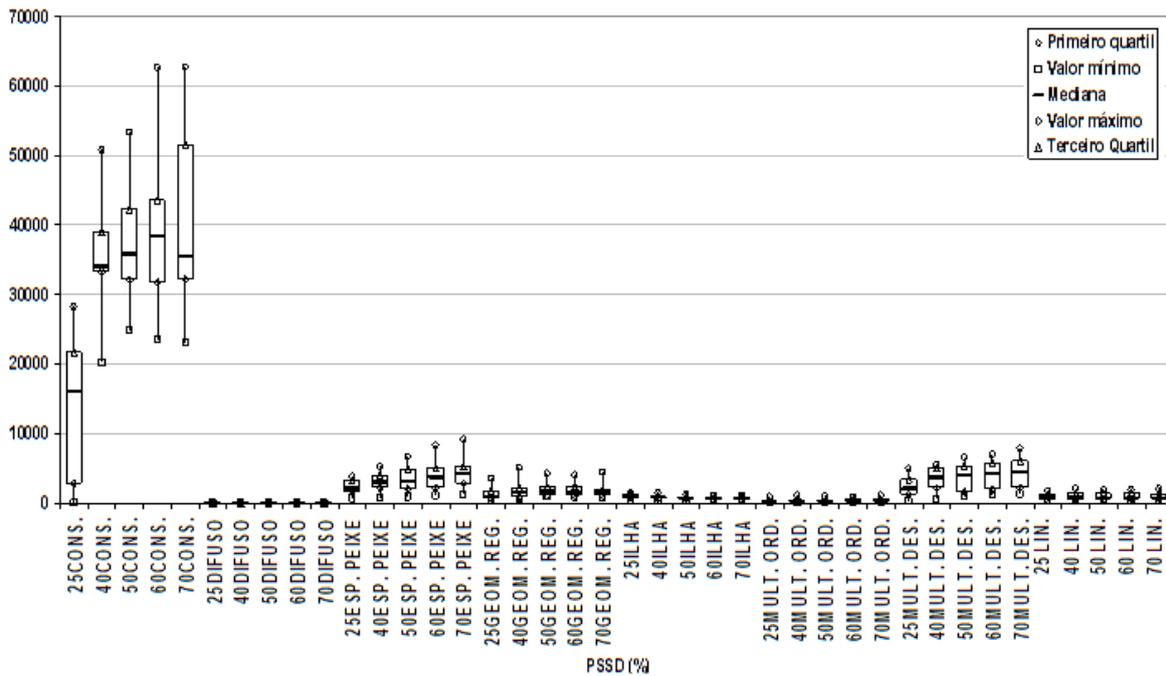


Fig. 10 - Métrica PSSD.

O menor valor de PSSD foi obtido para o padrão difuso, que apresentou pouca variação no tamanho das manchas e maior uniformidade em relação ao tamanho e a forma, como já discutido nos resultados apresentados anteriormente. Observou-se que para alguns padrões como o difuso, consolidado e espinha de peixe os intervalos de valores de PSSD são distintos indicando que essa métrica PSSD pode ser importante para distinguir diferentes padrões de desmatamento.

A métrica PSCOV (Figura 11) mede a variabilidade do tamanho das manchas de

desmatamento em relação ao tamanho médio. Quando o tamanho da célula aumenta as áreas das manchas de desmatamento variam muito provocando uma maior heterogeneidade dos polígonos. Dessa forma, o menor valor de mediana da métrica PSCOV encontrado foi para os padrões de desmatamento difuso e geométrico, onde a paisagem é mais homogênea. Os maiores valores de mediana foram estimados para os padrões multidirecional desordenado e espinha de peixe, por apresentarem maior variação da forma dos polígonos e, portanto, uma paisagem mais heterogênea.

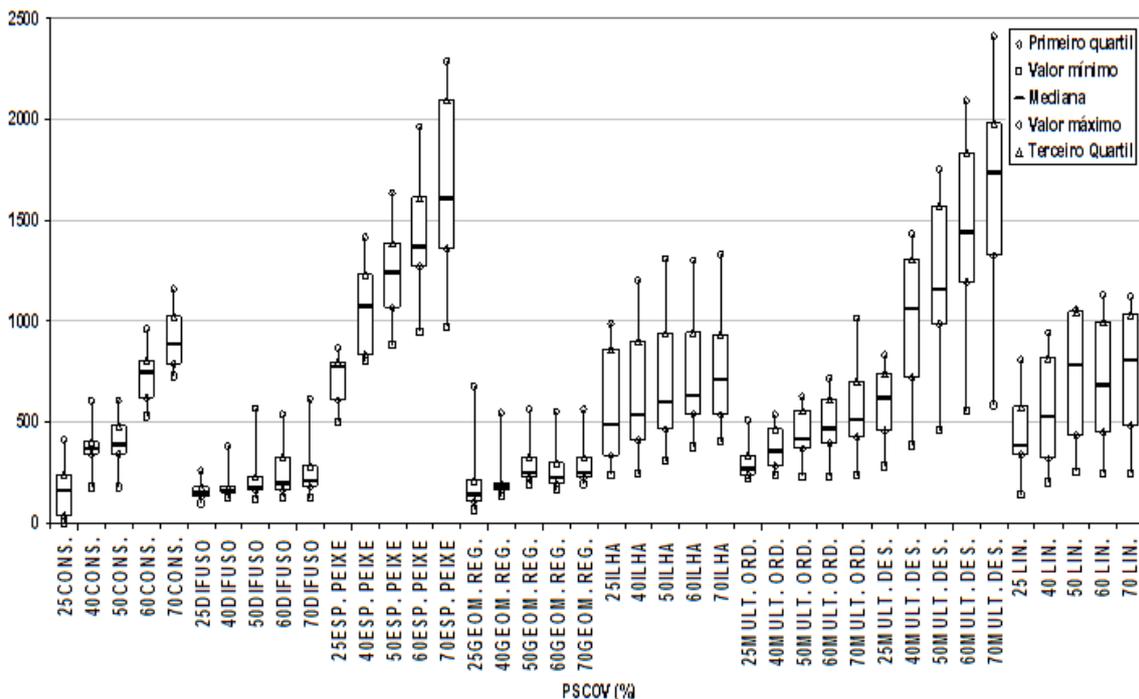


Fig. 11 - Métrica PSCOV.

Com as análises das métricas pôde-se observar que algumas delas não variaram ao se analisar vários tamanhos de célula, como por exemplo, os índices ED e MPS, como já foi observado por Wu et al. (2000) Para analisar diferentes padrões de paisagens, independente da escala, é importante utilizar métricas robustas que apresentem pouca variação com relação ao tamanho da unidade de estudo, possibilitando discriminar e caracterizar os padrões existentes.

Nesse estudo, as métricas ED, MPS e PSSD apresentaram valores de mediana distintos para vários padrões analisados. Esta diferença nos valores é indicativa de que estas métricas podem ser úteis na discriminação dos padrões analisados em um sistema de mineração de dados como o GeoDMA. As métricas AWMSI, MSI, MPFD e AWMPFD demonstraram ser relevantes para distinguir os padrões difuso e geométrico regular de padrões que possuem complexidade espacial maior, como, por exemplo, espinha de peixe e multidirecional desordenado.

Ainda que a formulação matemática dos pares de métricas MSI e MPFD e AWMSI e AWMPFD sejam similares, elas apresentaram comportamentos

diferenciados em relação aos valores de mediana dos padrões analisados, sendo que as métricas de forma que fazem a ponderação por área (AWMSI e AWMPFD) apresentaram melhor capacidade de discriminar os padrões de desmatamento.

A análise das métricas forneceu indicativos de que índices como ED, MPAR, PSCOV e PSSD são importantes na distinção dos padrões de desmatamento. Essas métricas não estavam implementadas no GeoDMA e, a partir desses resultados, foram incluídas.

Para completar a análise, a validação cruzada pelo método de Monte Carlo foi realizada usando as amostras aleatórias e o algoritmo C4.5. Esse algoritmo gerou 300 árvores de decisão para classificar os diferentes padrões de desmatamento. Observou-se que as métricas mais selecionadas foram as seguintes: MPS, AWMSI, AWMPFD, ED, PSCOV e PSSD.

A partir dos valores da distribuição dos valores do coeficiente Kappa, gerados pelo método de validação cruzada de Monte Carlo, o intervalo de credibilidade foi definido de forma que 2,5% dos valores altos e 2,5% dos valores baixos foram desprezados e o *box plot* foi construído como mostra o *box plot* da Figura 12.

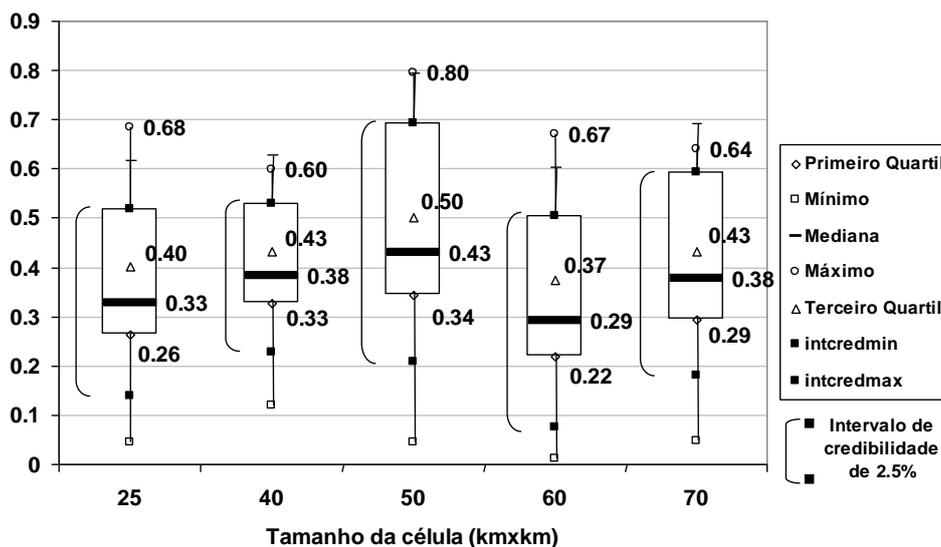


Fig. 12 - Coeficientes Kappa gerados pelo método de validação cruzada de Monte Carlo.

O intervalo de credibilidade observado na célula de 50 km, com valores de Kappa entre 0,21 e 0,69, e mediana 0,43, foram os melhores resultados obtidos com a simulação de Monte Carlo. Entretanto, o coeficiente Kappa e o intervalo de credibilidade obtidos não apresentaram valores altos. Atributos de forma, área e borda podem não ser suficientes para discriminar os oito padrões de desmatamento representados nas células. O arranjo espacial das manchas de desmatamento e a forma como estão organizadas (distribuição e orientação) no espaço celular devem ser consideradas.

Durante a análise dos padrões baseadas nas métricas observou-se que alguns deles são mais facilmente identificados do que outros, como é o caso do padrão difuso, geométrico, consolidado, e algumas vezes o multidirecional desordenado. Assim, pode-se

pensar em uma tipologia mais simplificada para a região, agrupando padrões que apresentem significados similares em relação aos processos que se pretende analisar. É possível agrupar, por exemplo, padrões que representam estágios iniciais (difuso e linear), intermediários (espinha de peixe, multidirecional desordenado, ilha) e avançados (consolidado) de expansão da fronteira agropecuária.

Embora nem todos os padrões definidos na tipologia da Tabela 1, possam ser representados por células menores que 25 km, como é o caso do padrão espinha de peixe, é provável que análises do padrão de desmatamento com células de menores dimensões, como as de 10 km testadas no trabalho de Azeredo et al. (2008), apresentem maior homogeneidade dos polígonos de desmatamento com relação a área, forma e

borda e, conseqüentemente, melhores desempenho na classificação.

4. CONCLUSÃO

Na análise de sensibilidade as células de tamanho 50 km apresentaram o maior valor de mediana na distribuição dos valores do coeficiente Kappa, gerados pelo método de validação cruzada de Monte Carlo. O desempenho não muito alto, ocorreu devido à heterogeneidade das células de tamanho maior. Para melhorar esse desempenho sugere-se utilizar métricas que permitam medir o arranjo espacial, a distribuição espacial e a orientação dos polígonos de desmatamento.

A maioria dos padrões de desmatamento apresentou pouca variação no valor da mediana das métricas AWMSI, MSI, MPAR, MPFD, AWMPFD, ED, MPS, e PSSD. Um importante resultado da análise de sensibilidade das métricas é que algumas delas tais como ED, MSI, AWMSI, MPFD, AWMPFD, MPS, PSCOV e PSSD são importantes na distinção dos padrões de desmatamento.

Os resultados com a simulação de Monte Carlo e as árvores de decisão geradas pelo algoritmo C4.5 mostraram que as métricas mais selecionadas, ou seja, as que melhor discriminaram os padrões foram as mesmas apontadas na análise individual.

A definição do tamanho de célula depende do tipo de processo que se deseja analisar. Para uma análise que exige maior detalhamento, células de menor tamanho podem ser mais adequadas, enquanto que para estudos em escala mais ampla pode-se optar por um tamanho de célula maior. Em ambos os casos, deve-se lembrar que a escolha do tamanho de célula pode favorecer a identificação de alguns padrões de desmatamento em detrimento de outros.

A análise apresentada neste trabalho é importante para subsidiar estudos que necessitam que o espaço geográfico seja diferenciado de acordo com os diferentes processos de ocupação existentes como os estudos que envolvem a modelagem ambiental, o planejamento e o ordenamento territorial.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo agradecem a Capes e CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C. A.; VALERIANO, D. M.; ESCADA, M. I. S.; RENNÓ, C. D. Estimativa de área de vegetação secundária na Amazônia Legal Brasileira. *Acta Amazônica*, v. 40, n. 2, p. 289-302, 2010.

AZEREDO, M.; ESCADA, M. I. S.; CÂMARA, G. **Mineração de dados espaciais utilizando métricas de paisagem**. São José dos Campos: INPE, 2008. Relatório final da disciplina CAP-359.

ASNER, G. P.; KELLER, M.; PEREIRA, R.; ZWEEDE, J. C. Remote sensing of selective logging in Amazonia assessing limitations based on detail field observations, Landsat ETM+, and textural analysis. *Remote Sensing of Environment*, v. 80, p. 483-496, 2002.

BATISTELLA, M.; MORAN, E. F. Dimensões humanas do uso e cobertura das terras na Amazônia: uma contribuição do LBA. *Acta Amazônica*, v. 35, n. 2, 2005, p. 239-247.

BECKER, B. K. **Amazônia: Geopolítica na virada do III milênio**. Rio de Janeiro: Garamond, 2004. 172 p. (ISBN 85-7617-042-6)

BECKER, B. K. Geopolítica da Amazônia. *Estudos Avançados*, v. 19, n. 53, p. 71-86, 2005.

ELKIE, P.C.; REMPEL, R.S.; CARR, A.P. **Patch Analyst user's manual: a tool for quantifying landscape structure** (NWST Technical Manual TM-002). Thunder Bay, Ontario: Ontario Ministry of Natural Resources, Northwest Science & Technology, 1999, 22 p.

ESCADA, M. I. S. **Evolução de padrões de uso e cobertura da terra na região Centro-Norte de Rondônia**. 2003. 264 p. (INPE-10209-TDI/899). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2003. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/06.30.13.31>>. Acesso em: 03 dez. 2010.

ESCADA, M. I. S.; MONTEIRO, A. M. V.; AGUIAR, A. P. D.; CARNEIRO, T. G. S.; CÂMARA, G. Análise de padrões e processos de ocupação para a construção de modelos na Amazônia: experimentos em Rondônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. Anais... São José dos Campos: INPE, 2005. p. 2973-2984. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12707-PRE/7997). Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.22.09.13>>. Acesso em: 14 dez. 2010.

EWERS, R. M.; LAURANCE, W. F. Scale-dependent patterns of deforestation in the Brazilian Amazon. *Environmental Conservation*, v. 33, n.3, p. 203-211, 2006.

FITZSIMMONS, M. Effects of deforestation and reforestation on landscape spatial structure in boreal Saskatchewan, Canadá. *Forest Ecology and Management*, n.174, p. 577-592, 2003.

HUANG, C.; GEIGER, E. L.; KUPFRE, J. A. Sensitivity of landscape metrics to classification

scheme. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 14, p. 2927-2948, 20 jul. 2006.

HUSSON, A.; FONTÈS, J.; JEANJEAN, H.; MIQUEL, C.; PUIG, H.; SOLIER, C. Study of forest non-forest interface: Tipology of fragmentation of tropical forest. TREES Series B, Research Report n.2, European Commission, EUR 16291 EN, 1995.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Relatório PRODES 2008**, 2008b. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/prodes/Relatorio_Prodes2008.pdf>. Acesso em: Fev. 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Banco de dados PRODES**, 2010a. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodes.php>>. Acesso em: Jan. 2010.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **TerraView**, 2010b. Disponível em: <<<http://www.dpi.inpe.br/terraview/>>>. Acesso em: Jul. 2010.

KORTING, T. S.; FONSECA, L. M.; ESCADA, M. I. S.; SILVA, F. C.; SILVA, M. P. S. GeoDMA: a novel system for spatial data mining. **IEEE International Conference on Data Mining Workshops**, 2008.

LUI, G. H.; MOLINA, S. M. G. Ocupação humana e transformação das paisagens na Amazônia brasileira. **Amazônica - Revista de antropologia**, v. 1, n. 1, 2009. Disponível em: <<<http://www.periodicos.ufpa.br/index.php/amazonica/article/view/156/229>>>. Acesso em: set. 2010.

MCGARIGAL, K.; MARKS, B. J. FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Washington: United State Department of Agriculture, **Pacific Northwest Research Station General Technical Report PNW-GTR-351**, 132 p., ag. 1995

MERTENS B.; LAMBIN, E. F. Spatial modeling of deforestation in southern Cameroon. Spatial disaggregation of diverse deforestation processes. **Applied Geography**, v. 17, n.2, p. 143-162, 1997.

MOREIRA, J.S. A. **Elementos de estatística**. São Paulo: Editora Atlas, 170 p., 1968.

OLIVEIRA FILHO, F. J. B.; METZGER, J. P. Threshold in landscape structure for three common deforestation patterns in the Brazilian Amazon. **Landscape Ecology**, n. 21, p. 1061-1073, 2006.

PEDLOWSKI, M. A.; DALE, V. H.; MATRICARDI, E. A. T.; SIVA FILHO, E. P. Patterns and impacts of

deforestation in Rondônia, Brazil. **Landscape and urban planning**, n. 38, p. 149-157, 1997.

RUBISTEIN, R. Y. **Simulation and the Monte Carlo method**. Canada: John Wiley & Sons, 1981, 282 p. (ISBN 0-471-08917-6).

SILVA, M. P. S.; CÂMARA, G.; ESCADA, M. I. S.; SOUZA, R. C. M. Remote-sensing image mining: detecting agents of land-use change in tropical forest areas. **International Journal of Remote Sensing**, v.29, n.16, p. 4803-4822, ag. 2008.

WU, J.; JELINSKI, D. E.; LUCK, M.; TUELLER, P. T. Multiscale analysis of landscape heterogeneity: scale variance and pattern metrics. **Geographic Information Sciences**, v. 6, n.1, p. 6-19, 2000.