

Padrões de desflorestamento na Amazônia Legal: diferenças espaciais e temporais das mudanças na cobertura da terra

Ralph Trancoso ¹
Juliana Schietti ¹
Arnaldo Carneiro Filho ¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA
Laboratório de Geoprocessamento e Análise Espacial - SIGLAB
Caixa Postal 478 - 69011-870 - Manaus - AM, Brasil
{ralph, jusa, carneiro}@inpa.gov.br

Abstract. More than 700000 Km² have already deforested in Brazilian Legal Amazon. Although every year large forested areas have been converted to pasture and agriculture lands, the land cover changes patterns are highly heterogenic in Brazilian Amazonia. Several factors driving the land cover changes patterns, among then: the most important are: access, infra-structure, climate, relief, soil agriculture aptitude, socio-economic, demographic, political and cultural factors. For this reason, the contribution of small and large farms changes according to economy, demographic pressure, environmental and physical features of the region. The aim of this work was detect deforestation patterns and its spatial and temporal variability in Brazilian Amazonia through multivariate analyze of deforested areas metrics. After that, the contribution of three physical variables related to access, relief and climate have tested as driven the deforestation distribution patterns. The sampling scale (50 Km of cell size) selected to show deforestation patterns in Brazilian Amazonia were satisfactory. Principally Components Analyze supported the deforestation patterns detection. Two first axes explained about 90% of total variance contained on deforestation metrics. This strategy afforded the spacialization of deforestation patterns in a grid, showing the spatial and temporal deforestation patterns variability. Selected physical variables explained a low relationship to ordination scores. Total length roads have showed the major explication power.

Palavras-chave: deforestation pattern, Brazilian Amazônia, principally components analize, landscape ecology, padrões de desflorestamento, Amazônia Legal, análise de componentes principais, ecologia da paisagem

1. Introdução

A Amazônia Legal com mais de 700.000 Km² de áreas desflorestadas ao longo de seus nove estados (INPE, 2006), apresenta padrões distintos de ocupação agrária, principalmente em virtude da grande escala de abrangência. A contribuição de pequenos fazendeiros e grandes latifundiários muda continuamente com a economia e pressão demográfica (Fearnside, 2005). Embora as regiões de fronteira agrícola estejam situadas sob a forma de uma frente única (“*arco do desflorestamento*”), uma série de fatores contribui para as diferenças nos processos de colonização e conversão das áreas de floresta em empreendimentos agropecuários. Dentre eles os mais importantes são: acesso, infra-estrutura, clima, relevo, aptidão agrícola do solo, fatores socioeconômicos, demográficos, políticos e culturais (Helmut & Lambin, 2002). Diversos estudos sobre forma e padrões do desflorestamento em áreas tropicais já foram realizados em escala local para regiões específicas, entretanto existem poucas iniciativas que envolvam análise estatística de padrões de ocupação em grande escala (Helmut & Lambin, 2002).

O crescimento econômico (Koop & Tolen, 2001) e populacional (Myers, 1993) vêm sendo reconhecidos como uma das principais forçantes do processo de perda de florestas. Além dos fatores econômicos e da história de colonização das áreas, é provável que o clima e a topografia sejam determinantes na forma, tamanho e padrões espaciais das manchas de desflorestamento. Regiões declivosas e com períodos chuvosos longos e intensos devem ser mais restritivas à prática de desflorestamento. Muitos estudos, principalmente na área de modelagem da cobertura da terra, vem apontando a infra-estrutura de acesso como um dos principais fatores que dirigem o processo de desflorestamento.

Em Rondônia, os atores mais importantes nas mudanças na cobertura da terra são pequenos fazendeiros, criadores de gado, mineradores e madeireiros, que participaram do processo de colonização do estado desde a década de 1950 (Pedlowski et al. 1997). O padrão típico de colonização em espinha de peixe da região vem sendo documentado através de séries históricas de imagens de satélite em diversos estudos (Skole & Tucker, 1993; Frohn & Hao, 2006). Já no Mato Grosso, por exemplo, predominam grandes latifúndios (IBGE, 2006). As características locais de relevo e clima favorecem a mecanização e conseqüentemente a agricultura em larga escala. O acesso também é outro fator determinante para que haja escoamento na produção.

O conceito de padrão por si só é arbitrário e subjetivo. No caso do desflorestamento, deve abranger uma série de atributos das áreas desflorestadas, tais como: número de ocorrências, área, perímetro e a relação entre essas variáveis. Somente dessa forma seria possível ter uma representatividade simultânea das dimensões e da forma das áreas desflorestadas. Entretanto, freqüentemente essas variáveis estão correlacionadas, o que dificulta a escolha e a determinação da contribuição de cada variável. Neste contexto a análise multivariada é uma ferramenta bastante útil, devido a sua capacidade de redução de dimensões em eixos ortogonais.

Neste estudo, o objetivo principal foi detectar a presença de padrões de desflorestamento e sua variabilidade espacial e temporal na escala da Amazônia Legal, no período de 2002 a 2006. Algumas variáveis físicas foram testadas como reguladoras do processo de distribuição dos padrões de desflorestamento.

2. Métodos

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na escala da Amazônia Legal, abrangendo seus nove estados, ao longo da área analisada pelo Programa de Monitoramento da Floresta Amazônica por Satélite - PRODES (INPE, 2006).

2.2 Desflorestamento

Os dados de desflorestamento foram obtidos do Programa de Monitoramento da Floresta Amazônica por Satélite - PRODES (INPE, 2006). O PRODES quantifica o desflorestamento na Amazônia Legal usando sensoriamento remoto através da classificação digital de imagens Landsat ETM⁺. É importante destacar que o PRODES só classifica as áreas de floresta e parte da Amazônia Legal é coberta por cerrado. A área mínima detectada é de 6.25 ha. A metodologia detalhada do PRODES pode ser acessada em <http://www.obt.inpe.br/prodes/metodologia.pdf>.

Para obtenção dos dados cumulativos de deflorestamento no período de 2002 a 2006 foram contruídos mosaicos para Amazônia Legal. O mosaico de 2002 a 2003 é composto por 191 imagens, o de 2003 a 2004 por 207 imagens e o de 2004 a 2005 por 211 imagens. O mosaico de 2005 a 2006 é composto por apenas 34 imagens porque a amostragem neste ano foi reduzida. Porém, as cenas foram selecionadas em áreas onde houve maior ocorrência de desmatamento no ano anterior. A taxa de desmatamento de 2005 a 2006, portanto, é apenas uma estimativa, enquanto que para os anos anteriores as taxas de desflorestamento estão consolidadas.

2.3 Amostragem dos padrões de desflorestamento

Uma grade vetorial com células de 50 x 50 km foi construída para amostragem dos padrões espaciais do desflorestamento na Amazônia Legal. Foi escolhido um tamanho de célula mínimo que captasse padrões em escala regional.

Sete parâmetros foram gerados a partir dos polígonos de desflorestamento. Três deles foram obtidos levando-se em conta as quebras geradas pela intersecção dos polígonos de desflorestamento com a grade de amostragem. São eles: área total desflorestada na célula (ΣA), perímetro total dos polígonos desflorestados na célula (ΣP) e a razão área/perímetro total ($\Sigma A / \Sigma P$) da célula. Outros 4 parâmetros mantiveram os atributos originais dos polígonos de desflorestamento. Ou seja, polígonos pertencentes a duas, ou mais células não tiveram sua área e nem perímetro recalculados. São eles: número de polígonos por célula (N), área média dos polígonos presente na célula (μA), perímetro médio dos polígonos presente na célula (μP) e a razão área/perímetro médios ($\mu A / \mu P$) da célula.

2.4 Ordenação das métricas de desflorestamento

O principal objetivo da análise multivariada é reduzir as dimensões de um problema. Ela pode ser resumida como uma maneira de ver padrões em grupos de dados complexos com mais clareza. A ordenação, por sua vez, distribui os objetos em um espaço multidimensional com menos dimensões que o número de atributos originais, captando a maior variação dos dados e indicando as variáveis mais importantes em sua estrutura (ter Braak, 1987). Neste contexto, a Análise de Componentes Principais (PCA) foi utilizada para conhecer a estrutura espacial das métricas de desflorestamento e compreender como os padrões de desflorestamento estão distribuídos na Amazônia. Além disso, a análise permite avaliar as variáveis mais importantes na estrutura dos dados.

Na análise de ordenação indireta, as informações ambientais são usadas para organizar os objetos no espaço. Somente após a ordenação, a variável preditora é utilizada para interpretar os resultados e testar hipóteses (ter Braak, 1987). Foram extraídos os dois primeiros eixos de ordenação, reduzindo a duas dimensões as métricas de desflorestamento obtidas a partir da grade de amostragem. As coordenadas dos dois primeiros eixos da ordenação (escores) foram extraídas para cada ano separadamente e recuperadas para cada célula da grade. Esta estratégia tornou possível a espacialização das coordenadas da Análise de Componentes Principais em ambiente SIG.

2.5 Variáveis preditoras

Neste estudo, como variáveis preditoras compreende-se as variáveis físicas utilizadas para testar as hipóteses a respeito da estrutura espacial e distribuição dos padrões de desflorestamento. Baseando-se em estudos prévios foram selecionadas três variáveis, são elas: acesso, relevo e clima.

Acesso

Para representar o acesso foi utilizado um arquivo vetorial de estradas digitalizado a partir de imagens Landsat (SIPAM, 2004). Todas as rodovias e estradas asfaltadas e não asfaltadas contidas na Amazônia Legal foram incluídas. Foi calculado o comprimento total das estradas para cada célula da grade.

Relevo

Um mosaico de imagens SRTM na resolução de 90 m foi construído para a Amazônia Legal. Os dados SRTM foram obtidos diretamente do endereço eletrônico da NASA (National Aeronautics and Space Administration), <ftp://e00srp01u.ecs.nasa.gov/srtm/version2/>. A partir deste produto foi gerado um arquivo matricial de declividade na mesma resolução

através da ferramenta “Slope” contida em “Topology” no “Arctoolbox” do programa ARCGIS 9.1. Foi calculada a declividade média por célula da grade.

Clima

Sob o ponto de vista da distribuição dos padrões de desflorestamento, a distribuição da precipitação pode ser considerada mais importante do que a quantidade e chuvas propriamente dita. Com o intuito de representar a intensidade e a duração da estação seca foi calculado o índice de umidade proposto por Walsh (1996). Ele foi calculado através de superfícies mensais de precipitação, obtidas por interpolação de estações pluviométricas na resolução de 30 minutos (Worldclim, 2006; Hijmans et al., 2005). O valor médio dos pixels foi extraído para cada célula da grade de amostragem.

A **Figura 01** demonstra as variáveis físicas selecionadas (acesso, relevo e clima) para testar hipóteses referentes a estruturação dos padrões de distribuição espacial do desflorestamento. As superiores representam os planos de informação originais, e as inferiores são os atributos obtidos para a grade de amostragem.

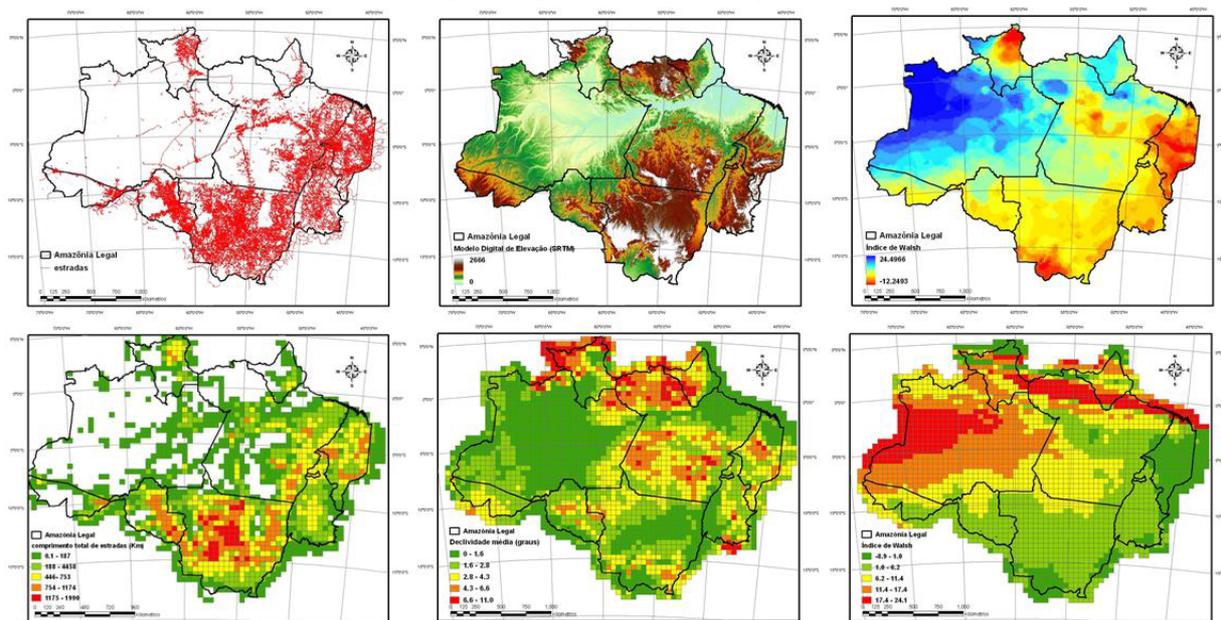


Figura 1. Variáveis predictoras utilizadas na ordenação indireta. Acima acesso, relevo e clima no formato original, e abaixo amostrados para a grade de amostragem com células de 50 Km. Sendo assim, comprimento de estradas, média da declividade e índice médio de duração da estação seca para cada célula.

2.6 Modelagem dos padrões de desflorestamento

A influência das variáveis predictoras como reguladoras do processo de distribuição dos padrões de desflorestamento foi avaliada por modelos de regressões múltiplas. As coordenadas dos dois primeiros eixos da análise de componentes principais (métricas dos polígonos de desflorestamento) foram testadas em função das variáveis predictoras (acesso, relevo e clima).

3. Resultados e Discussão

3.1 Padrões de desflorestamento na Amazônia Legal

A redução da complexidade das métricas de desflorestamento por análise de componentes principais a um plano bidimensional com máxima variância (dois eixos ortogonais) foi

satisfatória. Aproximadamente 90 % da variação total das sete métricas selecionadas foi extraída para os quatro anos analisados. Sendo de 51.9 a 66.8 % da variância total extraída no primeiro eixo e 25.2 a 36.0 % no segundo eixo de ordenação (**Tabela 1**)

Tabela 1: Variância explicada nos dois primeiros eixos de ordenação da Análise de componentes principais das métricas dos polígonos de desflorestamento extraída na grade de amostragem para os anos de 2002 a 2006.

| Ano | Percentual da variância extraída | | |
|-------------|----------------------------------|--------|-----------|
| | Eixo 2 | Eixo 1 | acumulada |
| 2002 - 2003 | 59.013 | 32.419 | 91.432 |
| 2003 - 2004 | 66.863 | 25.211 | 92.075 |
| 2004 - 2005 | 51.919 | 35.415 | 87.334 |
| 2005 - 2006 | 53.252 | 36.047 | 89.299 |

A alta explicação das sete métricas de desflorestamento em dois eixos ortogonais justifica-se em parte pela alta correlação entre elas. Entretanto, apesar de correlacionadas, elas não necessariamente tem o mesmo significado. Apesar de algumas vezes variáveis apresentarem sobreposição na explicação, a fração não sobreposta pode ser importante na estrutura dos dados. Por esta razão a exclusão de variáveis correlacionadas deve ser feita com cautela, principalmente no caso da Análise de Componentes Principais em que os eixos são totalmente independentes entre si. A **Tabela 2** demonstra a correlação das métricas de desflorestamento com os eixos extraídos da Análise de Componentes Principais. Em geral, o eixo 1 apresenta correlação negativa com as variáveis: $\sum A$, $\sum A/\sum P$, μP , $\mu A/\mu P$ e μA . Enquanto que o eixo 2 está correlacionado com N e $\sum P$, exceto para 2003-2004.

A **Figura 2** demonstra as coordenadas dos dois primeiros eixos da ordenação espacializadas na grade de amostragem para o período analisado. A legenda de cores recupera a relação das coordenadas com as métricas dos polígonos de desflorestamento amostrados na grade.

Tabela 2: Correlação dos dois primeiros eixos da análise de componentes principais com as variáveis utilizadas na ordenação no período de 2002 a 2006.

| Ano | Eixos | N | Métricas dos polígonos de desflorestamento | | | | | |
|--------|--------|--------|--|----------|-----------------|---------|---------|---------------|
| | | | $\sum A$ | $\sum P$ | $\sum A/\sum P$ | μA | μP | $\mu A/\mu P$ |
| 2002 - | Eixo 1 | -0.362 | -0.730 | -0.574 | -0.904 | -0.831 | -0.885 | -0.921 |
| 2003 | Eixo 2 | 0.869 | 0.602 | 0.811 | -0.284 | -0.442 | -0.335 | -0.325 |
| 2003 - | Eixo 1 | -0.724 | -0.963 | -0.943 | -0.529 | -0.915 | -0.954 | -0.558 |
| 2004 | Eixo 2 | -0.509 | 0.024 | -0.301 | 0.822 | 0.015 | -0.284 | 0.811 |
| 2004 - | Eixo 1 | -0.332 | -0.676 | -0.491 | -0.876 | -0.759 | -0.823 | -0.897 |
| 2005 | Eixo 2 | -0.886 | -0.660 | -0.863 | 0.259 | 0.453 | 0.378 | 0.314 |
| 2005 - | Eixo 1 | -0.353 | -0.824 | -0.841 | -0.867 | -0.681 | -0.481 | -0.878 |
| 2006 | Eixo 2 | -0.903 | 0.410 | 0.340 | 0.324 | -0.670 | -0.872 | 0.330 |

É importante ressaltar a existência de uma grande variabilidade espacial e temporal dos padrões de desflorestamento para a grade de amostragem com células de 50 Km. Contudo, os resultados observados condizem com algumas informações prévias. Por esta razão, a escala selecionada aparenta ser compatível com os objetivos iniciais do estudo. O eixo 1 em todos os anos analisados demonstrou um padrão específico para cada estado ao longo do arco do desflorestamento e de suas periferias. Verificam-se áreas mais desflorestadas e polígonos com maiores áreas e perímetros na região norte do Mato Grosso. Estes padrões vão perdendo intensidade em dois gradientes: um ao norte em direção ao Pará sobre a região da Terra do meio e outro a oeste em direção a Rondônia passando por porto velho e se estendendo até

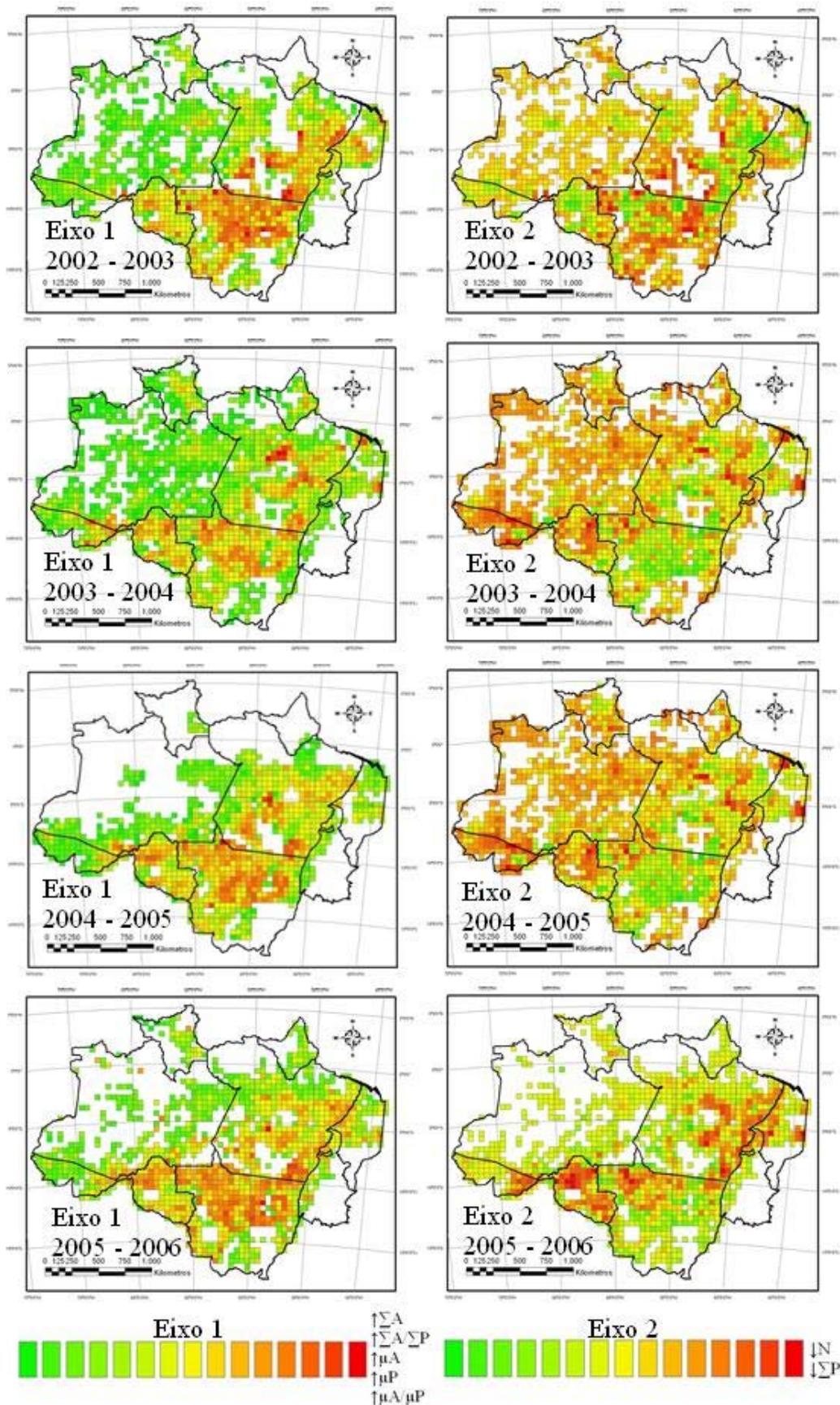


Figura 2: Espacialização das coordenadas dos dois primeiros eixos da análise de componentes principais das métricas dos polígonos de desflorestamento para os anos de 2002 a 2006

Rio Branco. O padrão de pequenas propriedades com menor área desflorestada por célula (em verde no eixo 1) e em menor densidade de polígonos (em laranja e vermelho no eixo 2) aparece ao longo do estado do Amazonas e nas bordas do arco do desflorestamento. Analisando o eixo 2 é possível verificar uma baixa densidade de polígonos no noroeste do Mato Grosso, próximo a região de Aripuanã. Esta mesma região apresenta grandes áreas desflorestadas com grandes polígonos, caracterizando um padrão de grandes fazendas relativamente isoladas.

Observa-se também mudanças inter-anuais nos padrões de desflorestamento tanto nas variáveis representadas pelo eixo 1 quanto nas representadas pelo eixo 2. A frente de expansão do sul do Pará chegou com maior intensidade em Santarém no ano de 2003 - 2004. Grandes fazendas de soja se instalaram na região devido a facilidade de escoamento da produção e mecanização. Este processo continuou, perdendo intensidade gradativamente até 2006. No mesmo período, outra frente de expansão chegou até a região de Rio Branco - AC, vinda de Rondônia. Fazendas de gado se instalaram na região com maior intensidade a partir de 2003 - 2004.

3.2 Relações entre padrões de desflorestamento e variáveis físicas

Em geral as coordenadas dos eixos extraídos da análise de componentes principais (padrões de desflorestamento) não foram bem explicadas pelas variáveis físicas. Os modelos de regressão lineares testados apresentaram baixo coeficiente de determinação (R^2) embora significativos. É importante ressaltar a influencia do tamanho amostral nestes resultados, uma vez que modelos lineares com número de pontos elevados (N) tendem a um menor R^2 , porém frequentemente significativo.

A variável acesso, representada por comprimento total de estradas por célula da grade apresentou maior poder de explicação, seguida do índice de Walsh e declividade. Na **Tabela 3** são apresentados os coeficientes padronizados das regressões múltiplas para as variáveis físicas, assim como os coeficientes de determinação (R^2) e o tamanho amostral (N). Os modelos de regressões múltiplas com as variáveis físicas explicaram melhor o primeiro eixo da ordenação, exceto no ano de 2004-2005, quando o R^2 foi superior para o eixo 2. O modelo para o eixo 1 do ano de 2002- 2003 foi o que apresentou o maior poder de explicação com um $R^2 = 0.269$. A variável comprimento de estradas apresentou os maiores coeficientes padronizados (que indicam a magnitude do efeito das variáveis preditoras) e sua correlação com as coordenadas dos eixos foi negativa.

Tabela 3: Parâmetros das regressões múltiplas (coeficientes padronizados das equações, coeficiente de determinação e tamanho amostral), utilizando as coordenadas dos eixos da ordenação como variáveis independentes e os atributos físicos como variáveis dependentes.

| Ano | Eixo | Coeficientes padronizados | | | R^2 | N |
|-------------|--------|---------------------------|-----------------|-------------------|-------|------|
| | | Comprimento de estradas | Índice de Walsh | Declividade média | | |
| 2002 - 2003 | Eixo 1 | -0.348 | 0.223 | -0.102 | 0.269 | 1238 |
| | Eixo 2 | 0.151 | - | 0.066 | 0.027 | |
| 2003 - 2004 | Eixo 1 | -0.330 | 0.139 | -0.084 | 0.180 | 1475 |
| | Eixo 2 | 0.158 | -0.138 | -0.051 | 0.064 | |
| 2004 - 2005 | Eixo 1 | -0.256 | 0.153 | -0.056 | 0.126 | 1091 |
| | Eixo 2 | -0.388 | -0.092 | -0.135 | 0.133 | |
| 2005 - 2006 | Eixo 1 | -0.224 | 0.187 | - | 0.124 | 1208 |
| | Eixo 2 | -0.246 | - | -0.163 | 0.081 | |

4. Conclusões

A escala de amostragem selecionada para captar padrões de desflorestamento ao longo da Amazônia Legal foi compatível com os objetivos iniciais do estudo. A grade de amostragem com células de 50 Km foi satisfatória para distinção dos padrões de desflorestamento e visualização de sua variabilidade.

A análise de componentes principais, por sua vez, auxiliou a distinção e espacialização dos padrões, captando em torno de 90% da variância total das sete métricas de desflorestamento em apenas dois eixos totalmente independentes.

Existe uma elevada variabilidade espacial e temporal dos padrões de desflorestamento. A contribuição de cada tipo de padrão no desflorestamento de uma dada região muda continuamente, porém outros fatores que não foram analisados neste estudo devem ser responsáveis por este processo.

Existe uma elevada variabilidade espacial e temporal dos padrões de desflorestamento e as variáveis físicas selecionadas apresentaram baixo poder de explicação dos padrões de desflorestamento. Seria importante testar outras variáveis preditoras, ligadas a economia e demografia, para melhor compreender as forças que dirigem o processo distribuição espacial dos padrões de desflorestamento.

5. Referências

- Fearnside, P. Deforestation in Brazilian Amazonia: History, Rates, and Consequences. **Conservation Biology**. v. 19, n. 3, p. 680–688, 2005.
- Frohn, R.C., Hao, Y. Landscape metric performance in analyzing two decades of deforestation in the Amazon basin of Rondônia, Brazil. **Remote Sensing of Environment**, V.100, p.237-251, 2006.
- Geist, H.J., Lambin, E.F., Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation, **BioScience**, V. 52, N. 2, p.143-50, 2002.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra J.L., Jones, P.G., Jarvis, A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 25, p.1965-1978, 2005.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Disponível em: < www.ibge.gov.br/home/default.php> Acesso em: outubro de 2006.
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite, Projeto PRODES. Disponível em: <www.dpi.inpe.br/prodesdigital> Acesso em: outubro de 2006.
- Koop, G., Tone, L. Deforestation, distribution and development. **Global Environmental Change**, 11, p. 193-202, 2001.
- Myers, N. Population, environment, and development. **Environmental Conservation**, 20, p. 205-216, 1993.
- Pedlowski a, M. A., Dale, V. H., Matricardi, E. A.T., da Silva Filho, E.P. Patterns and impacts of deforestation in Rondônia, Brazil. **Landscape and Urban Planning**. v. 38, p. 149-157, 1997.
- Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM). Bases cartográficas digitais para a Amazônia Legal na escala de 1:250.000, 2004.
- Skole, D. L., & Tucker, C. J. Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. **Science**, 260, p.1905-1910, 1993.
- ter Braak, Ordination, In: Jongman, R.H., ter Braak, C.J.F., Tongeren, O.F.R. (Eds.), *Data Analysis in Community and Landscape Ecology*. Pudoc, Wagenigen, p.91–173, 1987.
- Walsh, R.P.D. The climate, In: P.W. Richards (ed). *The Tropical Rain Forest: an ecological study*. Cambridge University Press pp 159-255, 1996.
- WorldClim - a set of global climate layers (climate grids) with a spatial resolution of a square kilometer. Disponível em: <www.worldclim.org/> Acessado em: julho de 2006