

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

RICARDO MENDES MORAES DE JESUS

**EVOLUÇÃO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL NA  
AMAZÔNIA BRASILEIRA**

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

RICARDO MENDES MORAES DE JESUS

**EVOLUÇÃO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL NA  
AMAZÔNIA BRASILEIRA**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para a disciplina Trabalho de Conclusão de Curso.

Orientador: Prof. Dr. Nilton César Fiedler

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2017

RICARDO MENDES MORAES DE JESUS

EVOLUÇÃO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL NA AMAZÔNIA  
BRASILEIRA

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais  
e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como  
requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Florestal

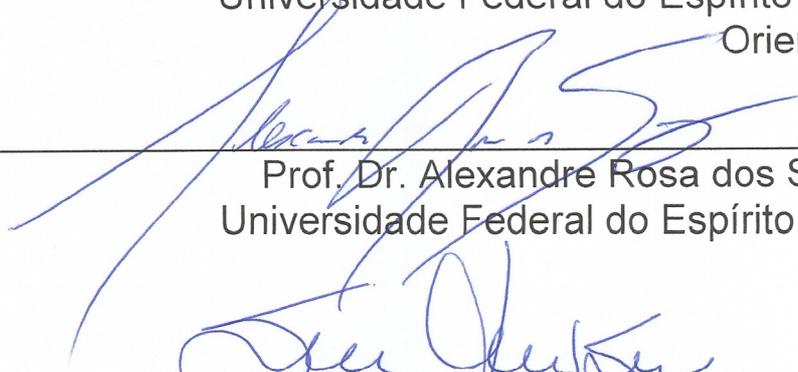
Aprovada em ..... 27 de dezembro ..... de 2017

COMISSÃO EXAMINADORA



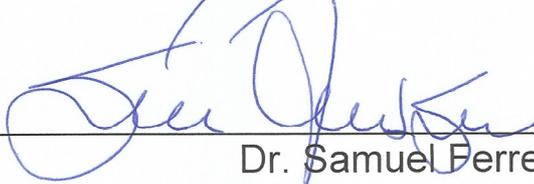
---

Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador



---

Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos  
Universidade Federal do Espírito Santo



---

Dr. Samuel Ferreira da Silva  
Universidade Federal do Espírito Santo

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ricardo e Leila, por sempre estarem ao meu lado, mesmos nas adversidades, também me apoiando nas minhas decisões e ao mesmo tempo, puxando minha orelha nos momentos em que tomei alguma decisão precipitada sem pensar, por nunca ter me deixado desanimar, me inspirando sempre e por todo carinho e dedicação, MUITO OBRIGADO!!

Ao meu irmão, Arthur, por me apoiar e ficar ao lado dos nossos pais.

Aos meus avós (*in memoriam*) por todos os momentos e ensinamentos, e por ventura não estarem presentes para presenciar esse grande passo em minha vida.

Aos Professores Alexandre Rosa dos Santos e Nilton César Fiedler, por toda orientação na confecção desse trabalho, também por confiarem em mim e em transmitir todo o conhecimento.

À equipe de pesquisa do Geotechnology Applied to Global Environment (GAGEN), pela amizade e toda ajuda na produção desse trabalho.

Ao Dr. Samuel Ferreira da Silva pela disposição de participar da banca avaliadora desse trabalho de conclusão de curso.

À Universidade Federal do Espírito Santo, pelo suporte e aprendizado ao longo dessa caminhada.

Ao meu companheiro de trabalho Felipe Zampirolli, pela ajuda e toda amizade durante esses anos de faculdade.

À minha namorada, Natália, por estar sempre ao meu lado, não me deixando desanimar quando tudo dava errado e por toda ajuda em tudo.

À Msc. Kaíse Barbosa de Souza, pela ajuda na confecção desse trabalho.

À Engenheira Florestal Isabela Dias Reboleto, pela ajuda na confecção do presente trabalho e pela grande amizade durante esses longos anos de graduação.

Aos meus grandes amigos que fiz durante esse tempo em Alegre, Luan, Felipe, Maikon, Pedra Azul, Dudu, James, Chupeta, Capitólio, Richard, Giovanni, Bianca, Isabela, Mayra e todos os outros que por ventura me esqueci de citar aqui, foram grandes histórias, que certamente dariam um livro, obrigado!

Aos membros atuais e os antigos da República Fenda do Bikini, foram 3 anos de amizade, história e companheirismo. Muito obrigado. Essa república vai ficar marcada por todo sempre em minha vida. E ao XXMV, por tudo!

A cidade de Alegre, que me ensinou indiretamente, a viver longe da minha família, me fez criar responsabilidades e por ter me feito feliz durante toda essa trajetória.

*“[...]I planned each chartered course  
Each careful step along the by way  
And more, much more than this  
I did it my way[...].”*

**Francis Albert Frank Sinatra em *My Way*.**

## RESUMO

As ações antrópicas nos dias atuais são intensas e degradantes ao meio ambiente. Assim, com posse de um mapa de vulnerabilidade, pode-se pensar em medidas para mitigar os seus danos. Objetivou-se com a realização desse trabalho gerar um mapa de vulnerabilidade ambiental para o Bioma Amazônia usando imagens geradas pelo produto MCD12Q1 do sensor MODIS. Dentre as classes mostradas pelo sensor, foram escolhidas 5 classes como ações antrópicas: Áreas Urbanas, Solo exposto, Áreas Agrícolas, Gramíneas e áreas de Mosaicos áreas agrícolas/vegetação. Para a geração dos mapas de evolução da vulnerabilidade ambiental nos anos de 2001 e 2013 na área da Amazônia Brasileira foram utilizadas as técnicas de *Land Cover Modeler*; de cálculo de distância euclidiana; função de pertinência linear *fuzzy*; definição de pesos matemáticos pelo modelo de AHP de Saaty (1977) para o ajustamento da equação de vulnerabilidade ambiental no Bioma Amazônia e reclassificação das imagens em 5 classes de vulnerabilidade: baixa-baixíssima, baixa, média, alta e alta-altíssima de acordo com os postos de Jenks. Por meio dos mapas de vulnerabilidade foi observado um grande e avançado processo de savanização do Bioma e alta-altíssima vulnerabilidade ambiental próximo aos cursos d'água, e resultados mostrando o fenômeno de “savanização” da Amazônia em alto nível de degradação do ambiente, algo muito preocupante para o cenário atual e futuro do Bioma.

Palavras chave: Sistemas de Informações Geográficas, geotecnologias, antropismo; evolução ambiental; MODIS; vulnerabilidade ambiental.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
2. OBJETIVOS .....	14
2.1 Objetivo Geral .....	14
2.2. Objetivos específicos.....	14
3. REVISÃO DE LITERATURA .....	14
3.1 Bioma Amazônia.....	14
3.2. Ações antrópicas .....	16
3.3. Sensoriamento remoto-SIG.....	16
3.3.1. Sensoriamento remoto aplicado à análise ambiental do Bioma Amazônia .....	17
3.4. MODIS .....	18
Órbita .....	19
705 km sol-síncrono, 10:30 a.m. descendente e 1:30 p.m. ascendente.....	19
Taxa de varredura .....	19
20,3 rpm .....	19
Cobertura espectral.....	19
2330 km a uma varredura de $\pm 55^\circ$ .....	19
Resolução espacial .....	19
250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas), 1000 m (29 bandas).....	19
Quantização .....	19
12 bits.....	19

Taxa de dados.....	19
10,6 Mbps (pico de dia); 6.1 Mbps (média orbital).....	19
Potência.....	19
162,5 W .....	19
3.5. Ótica <i>Fuzzy</i> .....	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	21
4.1. Área de estudo .....	21
4.2. Etapas Metodológicas .....	22
4.3 Materiais utilizados .....	25
4.4. Pré-processamento das imagens .....	27
4.5. Determinação das classes responsáveis por ações antrópicas.....	27
4.6. Módulo Land Cover Modeler (LCM).....	28
4.7. Determinação da distância euclidiana .....	28
4.8. Ótica nebulosa <i>fuzzy</i> .....	29
4.9. Determinação dos pesos matemáticos .....	29
4.10. “Mapemática” .....	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
5.1 Análise da mudança de uso e ocupação da terra .....	33
5.2. Distância euclidiana.....	37
5.3. Função de pertinência <i>fuzzy</i> .....	40
5.4. Lógica <i>fuzzy</i> .....	41
5.5. Definição dos pesos matemáticos e ajuste na equação de vulnerabilidade ambiental .....	46

5.6. Geração do mapa de Vulnerabilidade Ambiental a ações antrópicas no Bioma Amazônia .....	47
6. CONCLUSÕES.....	50
7. REFERÊNCIAS.....	52
LOUZADA, F. L. R. O; SANTOS, A. R. SILVA, A. G. <b>Delimitação nos corredores ecológicos no ArcGIS</b>	
<b>9.3. Gráfica F &amp;M, Alegre-CAUFES, 2010. ....</b>	<b>53</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> --Faixas imageadas.Fonte: Figueiredo, 2005. ....	17
<b>Figura 2</b> – Área de estudo - Bioma Amazônia. ....	21
<b>Figura 3</b> – Fluxograma da primeira etapa metodológica.....	23
<b>Figura 4</b> – Fluxograma da segunda etapa metodológica .....	25
<b>Figura 5</b> – Exemplo de como calcular distância euclidiana .....	29
<b>Figura 6</b> – Análise gráfica e tabular global comparando os anos de 2001 e 2013. ....	34
<b>Figura 7</b> – Análise gráfica e tabular líquida entre os respectivos anos de 2001 e 2013. ....	35
<b>Figura 8</b> – Contribuição de cada classe de ação antrópica no bioma Amazônia em km <sup>2</sup> . ....	36
<b>Figura 9</b> – Distâncias euclidianas do ano de 2001. ....	37
<b>Figura 10</b> – Distâncias euclidianas do ano de 2013. ....	39
<b>Figura 11</b> – Gráficos e funções lineares fuzzy para as classes de ações antrópicas no ano de 2001. Onde (a) – Áreas Urbanas, (b) – Solo Exposto, (c) – Áreas agrícolas, (d) – Gramíneas e (e) – Mosaico de áreas agrícolas /vegetação. ....	40
<b>Figura 12</b> – Gráficos e funções lineares fuzzy para as classes de ações antrópicas no ano de 2001. Onde (a) – Áreas Urbanas, (b) – Solo Exposto, (c) – Áreas agrícolas, (d) – Gramíneas e (e) – Mosaico de áreas agrícolas /vegetação. ....	41
<b>Figura 13</b> – Lógica fuzzy ano do ano de 2001. ....	42
<b>Figura 14</b> – Lógica fuzzy ano do ano de 2013. ....	43
<b>Figura 15</b> – Frequências fuzzy ano de 2001. Sendo, (a) – Áreas Urbanas, (b) – Solo Exposto, (c) – Áreas agrícolas, (d) – Gramíneas e (e) – Mosaico de áreas agrícolas/vegetação. ....	44
<b>Figura 16</b> – Frequências fuzzy ano de 2013. Onde (a) – Áreas Urbanas, (b) – Solo Exposto, (c) – Áreas agrícolas, (d) – Gramíneas e (e) – Mosaico de áreas agrícolas /vegetação. ....	45
<b>Figura 17</b> – Mapa de Vulnerabilidade ambiental a ações antrópicas no ano de 2001.....	47

**Figura 18** – Mapa de Vulnerabilidade ambiental a ações antrópicas para o ano de 2013..... 48

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Especificações do sensor MODIS .....	19
<b>Tabela 2</b> - Tipos de classificação quanto a cobertura de superfície. ....	26
<b>Tabela 3</b> - Escala de comparadores. ....	30
<b>Tabela 4</b> - Matriz de comparação. ....	30
<b>Tabela 5</b> - Pesos calculados.....	31
<b>Tabela 6</b> - Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n. ....	32
<b>Tabela 7</b> - Pesos matemáticos para a equação de vulnerabilidade ambiental. Sendo, VAR 01– Áreas Urbanas, VAR 02 – Solo Exposto, VAR 03 – Áreas agrícolas, VAR 04 – Gramíneas e VAR 05 – Áreas Urbanas Mosaico de áreas agrícolas /vegetação Áreas Urbanas.....	46

## 1. INTRODUÇÃO

O Bioma Amazônia é considerado o maior bioma do Brasil, apresentando uma área de 4.196.943 km<sup>2</sup>, o que representa cerca de 49% do território nacional (IBGE, 2012) e destaca-se por conter uma grande biodiversidade e influência sobre o clima regional e global (MALHI et al., 2008). Este bioma comporta a maior extensão de área com floresta tropical do mundo. Entretanto, vêm sofrendo significativas mudanças nos padrões de uso e ocupação da terra resultantes do desmatamento.

O desmatamento origina diversos impactos, como a perda de importantes serviços ecossistêmicos os quais incluem a manutenção da biodiversidade, equilíbrio climático e hidrológico, manutenção dos estoques de carbono na biomassa florestal e no solo (FEARNSIDE, 2006; FOLEY et al., 2007). Dentre os principais fatores diretos responsáveis pelo desmatamento em florestas tropicais estão a expansão de terras agrícolas, exploração madeireira, sobrepastoreio, incêndios, mineração, urbanização/industrialização e infraestrutura (CHAKRAVARTY *et al.*, 2012).

Em relação a urbanização, esta provoca uma maior pressão sobre os recursos ambientais, pois a expansão das cidades demanda terrenos para estabelecer as infraestruturas necessárias para amparar o crescimento populacional que é conduzida pelo desmatamento. Assim, estas atividades antrópicas têm sido então grandes responsáveis por mudanças no uso e ocupação da terra neste bioma.

Percebe-se então que as ações antropogênicas por meio da expansão das cidades e mudanças no uso e ocupação da terra podem gerar uma maior vulnerabilidade ambiental nos recursos naturais, sendo está definida, conforme Figueirêdo *et al.*, (2007), como a susceptibilidade de uma área em sofrer danos quando submetida a uma determinada ação.

Neste sentido, o controle, a fiscalização e o gerenciamento do uso e ocupação da terra dependem do conhecimento espacial da área em questão. Isto possibilita adquirir informações para conservação e preservação de uma determinada área. Dessa forma, o sensoriamento remoto é uma ferramenta que oferece a possibilidade de monitorar

grandes áreas da superfície terrestre de forma rápida, econômica e abrangendo áreas extensas (ZHU *et al.*, 2015).

Informações referentes ao uso e ocupação da terra podem ser obtidas pelo sensor MODIS, por meio do produto MCD12Q1, o qual abordam 17 classes de uso e ocupação da terra e contempla cinco tipos de classificação (SCHULZ *et al.*, 2017). Este sensor apresenta alta periodicidade em uma escala global, correção atmosférica e geométrica, o que facilita a aplicabilidade dados e aumenta a confiabilidade dos resultados (SAITO, 2015).

Assim, diante das informações que o sensoriamento remoto possibilita concomitante a importância local e global do bioma Amazônia torna-se relevante estudos que verificam a vulnerabilidade ambiental frente às diversas ações antrópicas a fim de que se possa monitorar e direcionar políticas de sustentabilidade que visem prioritariamente a redução do desmatamento e degradação ambiental neste bioma.

Neste contexto, objetivou-se com este trabalho analisar a evolução da vulnerabilidade ambiental da Amazônia brasileira por meio de imagens de uso e ocupação da terra proveniente do sensor MODIS nos anos de 2001 e 2013.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Analisar a evolução da vulnerabilidade ambiental do bioma Amazônia por meio de imagens de uso e ocupação da terra proveniente do sensor MODIS nos anos de 2001 e 2013.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Identificar as variáveis responsáveis pelas ações antrópicas dentre as classes observadas;
- Gerar imagens matriciais de distância euclidiana, em quilômetros, das variáveis antrópicas;
- Padronizar as imagens utilizando a ótica nebulosa (*fuzzy*);
- Determinar o modelo hierárquico de AHP para a vulnerabilidade ambiental a ações antrópicas;
- Análise de agrupamento da vulnerabilidade ambiental no Bioma Amazônia.

## **3. REVISÃO DE LITERATURA**

### **3.1 Bioma Amazônia**

O Bioma Amazônia contém parte de nove países da América do Sul, onde 69 % da área é pertencente ao Brasil (AB'SABER, 1977). De acordo com Inpe (2004), esse bioma abrange os estados do Pará, Amazonas, Maranhão, Goiás, Mato Grosso, Acre, Amapá, Rondônia, Roraima e Tocantins, totalizando 4.871.000 km<sup>2</sup> e uma população em torno de vinte milhões de habitantes, 60 % dela vivendo em áreas urbanas.

O bioma apresenta uma quantidade de espécies animais e vegetais muito elevada, com mais de 2.500 tipos de árvores e 30 mil tipos diferentes de plantas e demais vegetais.

Sua fauna também é bastante significativa, ampla e diversificada, possuindo cerca de 20 % das espécies catalogadas em todo o planeta. Com uma grande quantidade de anfíbios, répteis, mamíferos, peixes e árvores, apresenta uma complexa cadeia alimentar, composta por mais de 30 milhões de espécies (PENA, 2016).

O bioma se insere na zona climática tropical. O clima é quente e úmido, sua temperatura média é de 25 °C e chuvas torrenciais bem distribuídas durante todo o ano apresentando a média anual de 1.290 mm. Os solos apresentam altos níveis de acidez e baixa fertilidade, possuindo apenas 10 % de solos férteis.

Segundo Brazil Adventure International (2015), a vegetação se compõe de formações pioneiras, floresta ombrófila densa e aberta, savana e vegetação secundária.

Um aumento considerável do desmatamento na Amazônia legal vem sendo consequência do modelo tradicional da ocupação, um fenômeno de natureza complicada que não é atribuído a um único fator (ALENCAR *et al.*, 2004).

De acordo com Cerri *et al.* (2007b), estimativas indicam que a taxa de desmatamento na Amazônia brasileira é de 1,1 a 2,9 Mha ano<sup>-1</sup>. Mesmo apresentando essa elevada taxa de desmatamento, a Amazônia, no Brasil, ainda tem aproximadamente 40 % da área remanescente de floresta tropical no mundo (LAURANCE *et al.*, 2001).

A perda de funções da Amazônia frente ao avanço do desmatamento, está ligada às políticas de desenvolvimento, como especulação de terras, crescimento das cidades, aumento da pecuária bovina, aumento da exploração madeireira e agricultura familiar e mecanizada, principalmente ligada ao cultivo da soja e algodão (ALENCAR *et al.*, 2004).

Devido a tais mudanças do uso do solo, a floresta tende a ficar cada dia mais suscetível a incêndios florestais, aumentando a inflamabilidade e a taxa de queimadas (ANDREAE *et al.*, 2004).

A alteração dos ciclos da água, carbono e nutrientes, que são oriundos da mudança no uso da terra na Amazônia provocam consequências climáticas e ambientais em escalas local, regional e até mesmo global (NOBRE *et al.*, 2004).

Dentro desse cenário, estima-se um clima de até 6 °C mais quente para a Amazônia até o final desse século, de modo que tal aquecimento gera impactos sobre o bioma amazônico (COHEN *et al.*, 2007).

Atualmente devido a situação estar cada vez mais crítica, houve a criação do Grupo Interministerial com o intuito de combater o desmatamento e também criar soluções para minimizar os efeitos na Amazônia (MMA, 2004).

### 3.2. Ações antrópicas

A palavra antrópica, vem do grego *anthropos*, e tem por significado, homem, ou seja, ação antrópica é uma ação do homem, portanto, uma ação gerada pelo homem.

Segundo Aparecido (2013), o aproveitamento dos recursos naturais, sem o devido saber de suas reais interações, vem acelerando a eminência dos impactos ambientais negativos nos ambientes rurais e urbanos, com influência direta e indireta na qualidade de vida das pessoas, totalmente fora de harmonia com os princípios de sustentabilidade.

A necessidade do homem em gerar mais conforto e riquezas faz com que, cada vez mais, ele vá degradando o ambiente em que vive, gerando assim, mais e maiores impactos negativos ao meio ambiente.

Com isso, a principal ação antrópica nos dias de hoje, e no bioma Amazônia, é o desmatamento, pois o mesmo, além de gerar morte de árvores, ocasiona supressão de fauna, perda de solo, gerando assim assoreamento aos cursos d'água, perda de água no sistema, entre outros. Um exemplo de ação antrópica muito comum ao Bioma Amazônia é o desmatamento de uma determinada região em função da expansão urbana, o que ocasiona além de perda de indivíduos arbóreos e animais uma impermeabilização de solo, fazendo com que a água pluvial esorra e não sendo absorvida pelo solo.

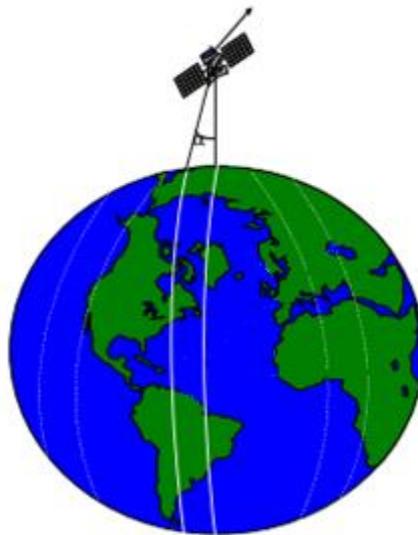
### 3.3. Sensoriamento remoto-SIG

O sensoriamento remoto é uma tecnologia que utiliza sensores na coleta automática de dados variáveis de uma superfície, como por exemplo, temperatura, relevo, cores, dentre outros. Desse modo, permite realizar o levantamento e monitoramento dos recursos terrestres em escala global (MENESES *et al.*, 2012).

A primeira invenção que utilizou o princípio do sensoriamento remoto foi a câmera fotográfica para tomadas de fotos aéreas. Posteriormente, a inteligência militar foi sendo desenvolvida com base nessa tecnologia e na década de 70 foram lançados os primeiros satélites de recursos naturais terrestres (FIGUEIREDO, 2005).

As ondas eletromagnéticas são responsáveis por captar as informações relativas aos atributos terrestres e levarem-nas até os satélites. As interações entre a radiação eletromagnética, tal como a luz solar, com os objetos, geram a obtenção das imagens da superfície terrestre (MENESES *et al.*, 2012).

As imagens obtidas pelos satélites de sensoriamento remoto são decorrentes do movimento que eles realizam entre os polos terrestres combinados aos movimentos de rotação da Terra em torno de seu eixo (FIGUEIREDO, 2005). A Figura 1 ilustra o posicionamento de um satélite em relação à superfície terrestre.



**Figura 1** - Faixas imageadas. Fonte: Figueiredo, 2005.

### 3.3.1. Sensoriamento remoto aplicado à análise ambiental do Bioma Amazônia

O sensoriamento remoto vem apresentando um papel determinante na geração de informações a respeito do Bioma Amazônia. Ao longo dos anos são captadas imagens que apresentam informações sobre os índices de vegetação, degradação florestal, interferência humana e outros fatores em relação a épocas anteriores. Desse modo, essa técnica permite o desenvolvimento de políticas e ações de controle para atenuar os impactos negativos da ocupação humana na Amazônia (MARTINS *et al.*, 2006).

Muitos estudos sobre a vulnerabilidade ambiental vêm sendo desenvolvidos com base em métodos de análise multicritério utilizando álgebra de mapas. Nessa técnica os níveis de vulnerabilidade são medidos por meio de pesos associados a cada classe definida a cada variável relacionada como ação antrópica. Desse modo, analisa-se simultaneamente a atuação de múltiplas variáveis em um problema complexo (SANTOS, 2014).

Segundo Martins e Souza Filho (2006), por meio da análise ambiental a partir das imagens geradas pelo sensoriamento, é possível obter informações úteis para estudar as tendências do meio ambiente, além da conservação e monitoramento de áreas de Reserva Legal, delimitação de Áreas de Preservação Permanente (APPs), criação de novas Unidades de Conservação (UCs), fiscalização de concessões florestais, demarcação de áreas mais sucessíveis a desastres naturais, dentre outros.

### 3.4. MODIS

O sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) é um dos cinco elementos do satélite Terra, formalmente chamado EOS-MA, lançado em 1999, e do satélite Aqua, lançado em 2002. Os sensores CERES, ASTER, MISR e MOPITT também estão a bordo desse satélite. O MODIS foi desenvolvido para monitorar os campos de estudo oceano, terra e atmosfera, fornecendo uma cobertura global quase diariamente (JUSTICE *et al.*, 2002).

O sensor MODIS capta imagens de toda a superfície terrestre a cada 1 ou 2 dias, atuando com 36 bandas espectrais que variam em comprimentos de onda de 0,4 a 14,4  $\mu\text{m}$  (NASA, 2010). Suas especificações estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1** - Especificações do sensor MODIS

Órbita	705 km sol-síncrono, 10:30 a.m. descendente e 1:30 p.m. ascendente
Taxa de varredura	20,3 rpm
Cobertura espectral	2330 km a uma varredura de $\pm 55^\circ$
Resolução espacial	250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas), 1000 m (29 bandas)
Quantização	12 bits
Taxa de dados	10,6 Mbps (pico de dia); 6.1 Mbps (média orbital)
Potência	162,5 W

Fonte: NASA, 2010.

Esse sensor possui elevada praticidade, o que faz com que seja altamente reconhecido diante de diversos outros sensores. As imagens geradas por ele são corrigidas geograficamente e radio metricamente, diminuindo a interferência de elementos como nuvens e aerossóis. Além disso, as configurações moderada e global de resolução podem ser escolhidas, ou seja, é possível selecionar os setores onde encontra-se somente a área de estudo ou toda a área de mapeamento do sensor (PAULA; PAI, 2016). As imagens captadas pelo sensor MODIS são disponibilizadas gratuita e ininterruptamente, o que faz com que elas possam ser utilizadas em diversos setores (RIZZI; RUDORF, 2007).

O MODIS vem desempenhando um papel imprescindível no desenvolvimento de modelo relacionados à prevenção de mudanças globais ao longo dos anos. Diante disso, torna-se possível tomar precauções antes que ocorram danos ambientais ou até mesmo desastres naturais (NASA, 2010).

### 3.5. Ótica *Fuzzy*

Segundo Gomide e Gudwin (1994), a lógica *fuzzy* é uma lógica nebulosa baseada na teoria dos conjuntos *fuzzy*, onde estuda-se casos de incertezas. A lógica nebulosa

converte informações vagas para o trabalho, geralmente comuns na comunicação humana, em um formato numérico facilmente manipulável (SAMPAIO *et al.*, 2007).

Na teoria de conjuntos clássica, a associação ou não de um elemento a um conjunto é avaliada em variáveis lógicas binárias, ou seja, só pode assumir dois valores: (0) caso não pertença ao conjunto e (1) caso pertença (GOMIDE *et al.*, 1994).

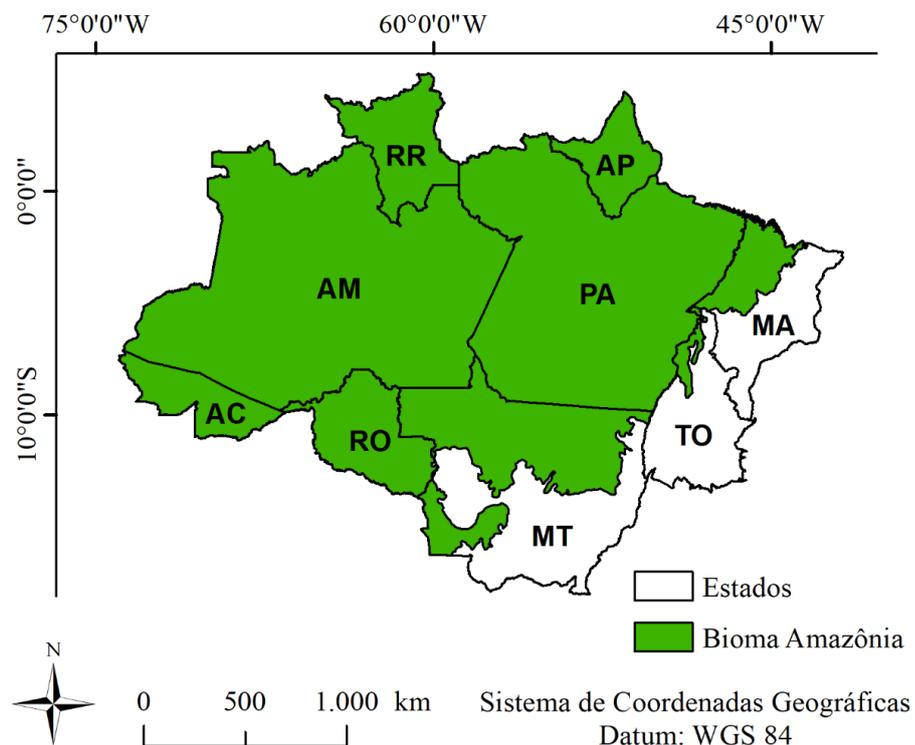
Zadeh (1965) sugeriu uma caracterização mais ampla em relação à teoria de conjuntos clássica, a qual permitiu avaliar gradualmente a participação de membros em um conjunto. A lógica *fuzzy* utiliza probabilidades linguísticas, tais como “verdade, muito verdade, não verdade, falso, muito falso”, e as interpreta como um subconjunto *fuzzy* por meio do manuseio dos valores presentes no intervalo de 0 a 1, tomando esses valores como limites (GOMIDE; GUDWIN, 1994).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção expõe detalhadamente a descrição de todas as etapas realizadas durante o trabalho proposto como a delimitação da área de estudo, além de todos os materiais, métodos e procedimentos utilizados.

### 4.1. Área de estudo

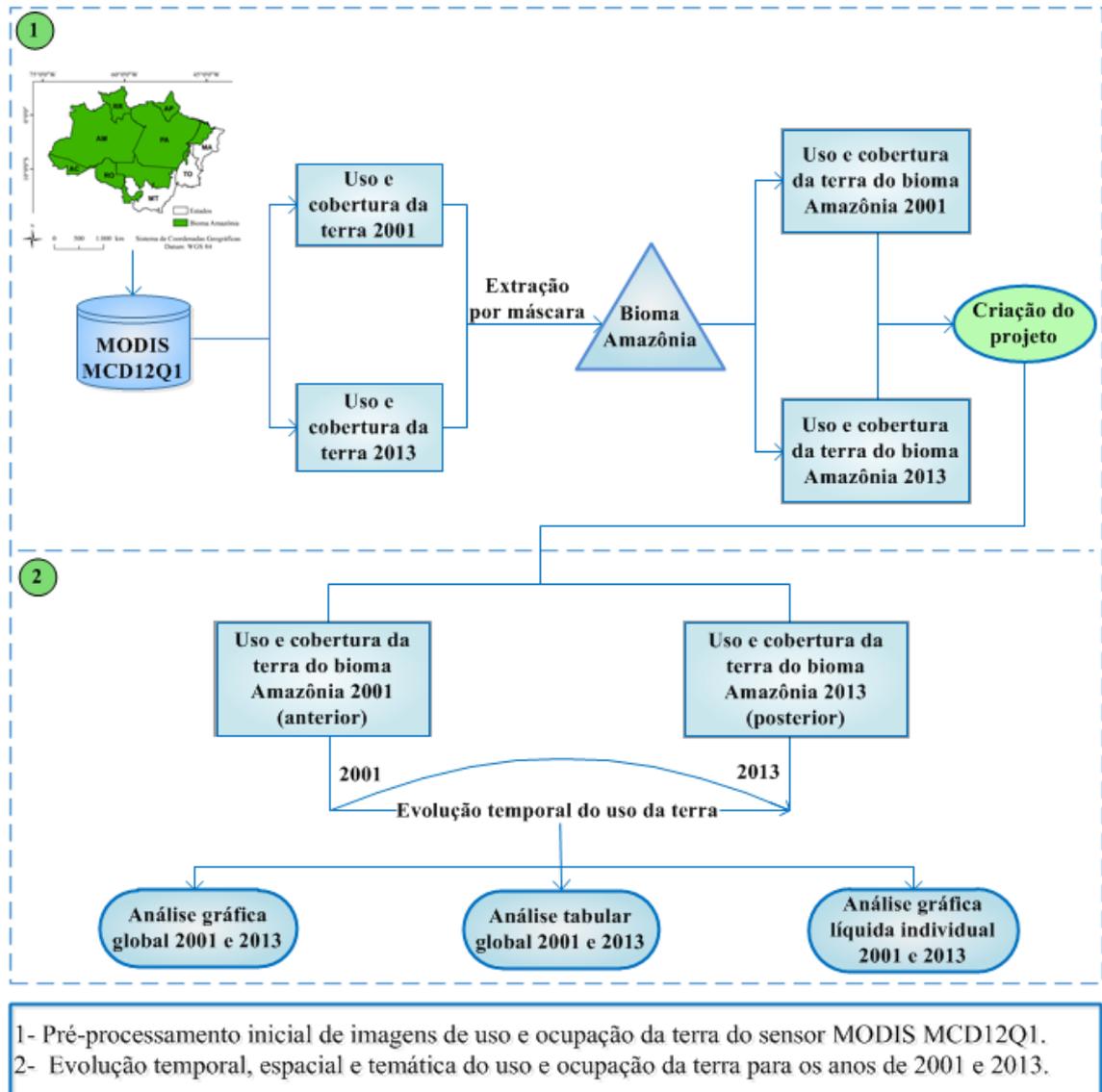
A área de estudo é o Bioma Amazônia no Brasil, que compreende os estados: Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Rondônia, Roraima e Tocantins, conforme apresentado na Figura 2. As áreas em verde correspondem à área do Bioma Amazônia.



**Figura 2** - Área de estudo - Bioma Amazônia.

## 4.2. Etapas Metodológicas

A metodologia é formada por duas partes. A primeira delas foi definida pelo pré-processamento inicial das imagens de uso e ocupação da terra do sensor MODIS nos anos de 2001 e 2013, juntamente com a análise temporal, espacial e temática do uso e ocupação da terra nos respectivos anos. Para essa primeira etapa foi utilizado o módulo *Land Change Modeler* (LCM), que utiliza como dados iniciais os mapas anterior e posterior, já feitos com extração de máscara do Bioma Amazônia, referentes aos anos de 2001 e 2013. Após a entrada dos mapas no LCM, o projeto é criado. Assim, com o auxílio do aplicativo computacional, fez-se a análise de evolução temporal do uso e ocupação da terra. Dessa forma, obteve-se a análise gráfica global, a análise tabular global e a análise gráfica líquida individual dos anos 2001 e 2013, conforme a Figura 3.



**Figura 3** – Fluxograma da primeira etapa metodológica.

A segunda etapa foi subdividida em 7 etapas, conforme apresentado na Figura 4.

São elas:

- a) Conversão das imagens matriciais de uso e ocupação da terra de 2001 e 2013 em polígonos;
- b) Cálculo da distância euclidiana das variáveis antrópicas no Bioma Amazônia;
- c) Geração das funções de pertinência *fuzzy* linear;
- d) Lógica nebulosa *fuzzy*, onde atribuiu-se distância mínima=0 e distância máxima = 1;
- e) Determinação dos pesos estatísticos do modelo pelo método AHP proposto por Saaty (1977) e geração da equação ajustada para o modelo de vulnerabilidade a ações

antrópicas no Bioma Amazônia. O cálculo da vulnerabilidade a ações antrópicas foi realizado por meio da Equação 1.

$$VAA = \beta_1 \cdot fuzzy\ 1 + \beta_2 \cdot fuzzy\ 2 + \beta_3 \cdot fuzzy\ 3 + \beta_4 \cdot fuzzy\ 4 + \beta_5 \cdot fuzzy\ 5 \quad (1)$$

Onde:

VAA - Vulnerabilidade a ações antrópicas;

$\beta_1$  – Peso definido pelo modelo de AHP respectivo a variável 1;

*fuzzy 1* – Mapa gerado por lógica nebulosa fuzzy da variável 1;

$\beta_2$  – Peso definido pelo modelo de AHP respectivo a variável 2;

*fuzzy 2* – Mapa gerado por lógica nebulosa fuzzy da variável 2;

$\beta_3$  – Peso definido pelo modelo de AHP respectivo a variável 3;

*fuzzy 3* – Mapa gerado por lógica nebulosa fuzzy da variável 3;

$\beta_4$  – Peso definido pelo modelo de AHP respectivo a variável 4;

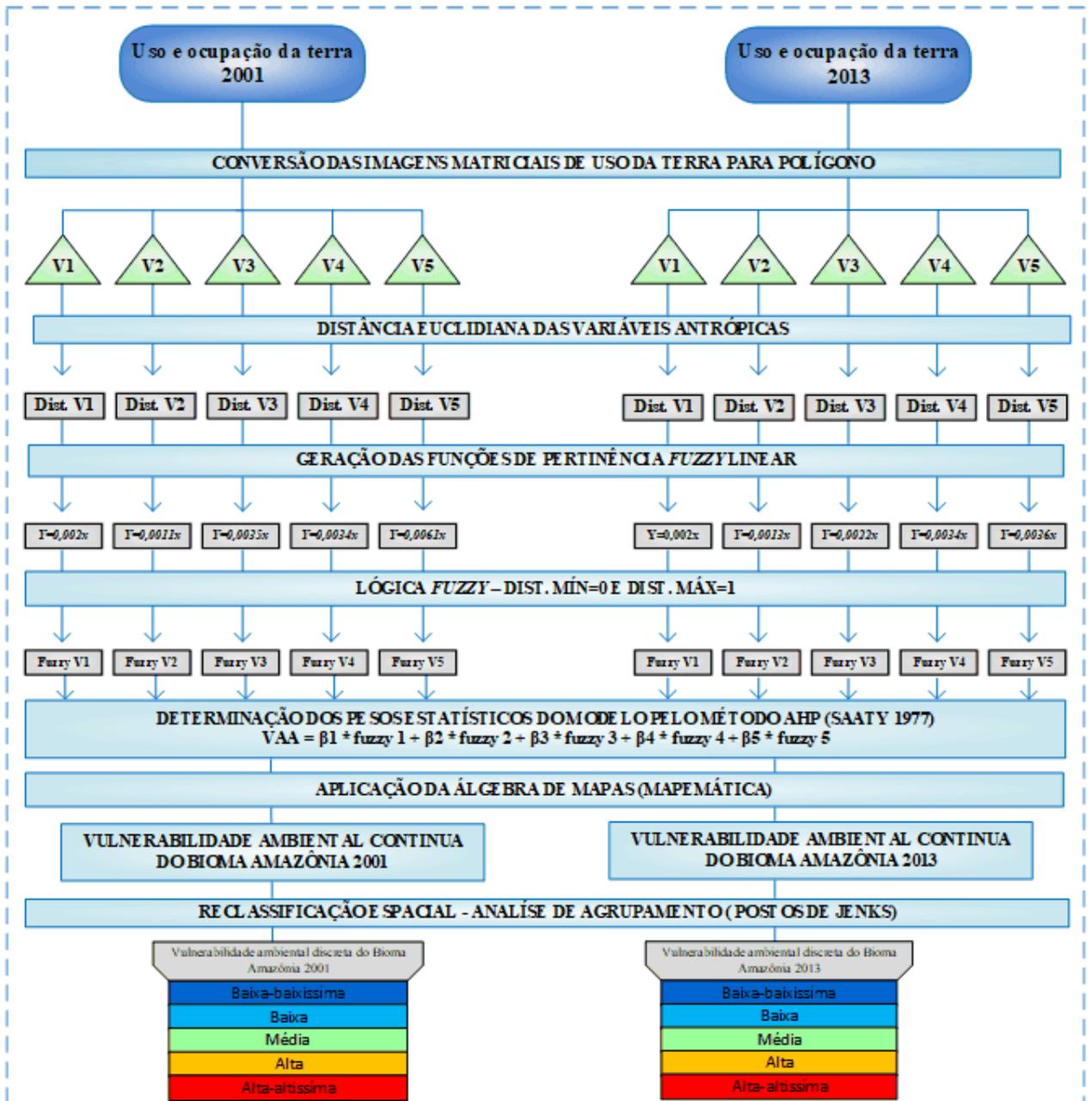
*fuzzy 4* – Mapa gerado por lógica nebulosa fuzzy da variável 4;

$\beta_5$  – Peso definido pelo modelo de AHP respectivo a variável 5;

*fuzzy 5* – Mapa gerado pelo modelo de AHP respectivo a variável 5;

f) Aplicação da álgebra de mapas (“mapemática”);

g) Reclassificação espacial – análise de agrupamento (postos de Jenks).



**Figura 4** - Fluxograma da segunda etapa metodológica

### 4.3 Materiais utilizados

Para a confecção desse trabalho foram utilizadas imagens de uso e ocupação da terra do produto MCD12Q1 procedente do satélite Terra, o sensor MODIS, dos anos de 2001 e 2013.

Foi empregada a classificação do tipo 1, apresentada na Tabela 2, estabelecida pelo Programa Internacional de Biosfera e Geosfera (IPGB), representando assim, a classificação mais completa do produto. A escolha do produto MCD12Q1 foi feita tendo em vista os dados de uso e ocupação do solo gerados pelo mesmo.

Também para a confecção do presente trabalho foi utilizada a máscara do Bioma Amazônia obtida através do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para extrair a área de estudo das imagens geradas pelo sensor MODIS.

**Tabela 2** - Tipos de classificação quanto a cobertura de superfície.

<b>Classe</b>	<b>Nome da Classe (IPGB)</b>
0	Água
1	Floresta de coníferas
2	Floresta Ombrófila Densa
3	Floresta de coníferas decidual
4	Floresta Estacional Decidual
5	Floresta mista
6	Vegetação arbustiva fechada
7	Vegetação arbustiva aberta
8	Savana lenhosa
9	Savana
10	Gramíneas
11	Áreas alagadas permanentemente
12	Predominância Agrícola
13	Áreas Urbanas
14	Mosaico de Áreas Agrícolas / Vegetação
15	Gelo / Neve
16	Solo exposto ou vegetação rala

Fonte: Adaptado de LPDAAC-TEAM (2008).

#### 4.4. Pré-processamento das imagens

As imagens do produto MCD12Q1 do sensor MODIS foram obtidas em formato .hdf. Posteriormente, fez-se a correção das mesmas, do sistema de referência, da localização e do formato compatível com o programa computacional ARCGIS 10.4. O *download* e conversão das imagens foi realizado pelo aplicativos *MODISsp*.

O *MODISsp* é um pacote “R”, que possibilita automatizar a criação de séries temporais de imagens matriciais derivadas do sensor MODIS. Esse pacote facilita executar várias etapas de pré-processamento, tais como *download*, mosaico, re-projeção e redimensionamento dos produtos MODIS em um determinado período de tempo. As áreas pré-selecionados podem ser obtidas de forma gratuita pelo endereço <https://github.com/lbusett/MODISsp> (BUSETTO; RANGHETTI, 2016).

De acordo com Rudorff *et al.* (2007), as imagens do sensor MODIS, apesar de apresentarem baixa resolução espacial, demonstram informações com alta periodicidade em uma escala global.

Não foi possível realizar a correção atmosférica e geométrica das imagens, pois quando se aplicou a correção houve desaparecimento de grande parte dos *pixels* de interesse.

#### 4.5. Determinação das classes responsáveis por ações antrópicas

Essa etapa teve como finalidade definir quais classes do produto MODIS são responsáveis pelo resultado do uso e ocupação humana na área de estudo, ou seja, as ações antrópicas.

O aplicativo computacional Google *Earth Pro* foi utilizado para fazer a justificativa dos pixels das classes das imagens do MODIS.

Feitos esses passos, as classes de ações antrópicas no Bioma Amazônia foram definidas como:

- Áreas Urbanas;
- Solo exposto;

- Gramíneas;
- Áreas agrícolas;
- Áreas de mosaicos agrícolas / vegetação.

#### 4.6. Módulo Land Cover Modeler (LCM)

O LCM, é uma ferramenta pertencente ao ambiente Sistema de Informação Geográfico (SIG) IDRISI, um aplicativo computacional criado pela *Clark University, Massachusetts*, EUA, e desenvolvido pelo Dr. J. Ronald Eastman, atualmente disponível em sua décima sexta versão. O aplicativo, além do LCM, possui mais de 300 outros módulos de análise e de geração de informações espaciais (ABREU, 2014).

O módulo LCM, também está presente e acessível no aplicativo TERRSET. Esse aplicativo computacional é a evolução dos programas do projeto IDRISI desenvolvido no ano de 2015 e está disponível como uma ferramenta de extensão para o software ARCGIS da ESRI (TAGLIARINI, 2017; CLARK LABS, 2015)

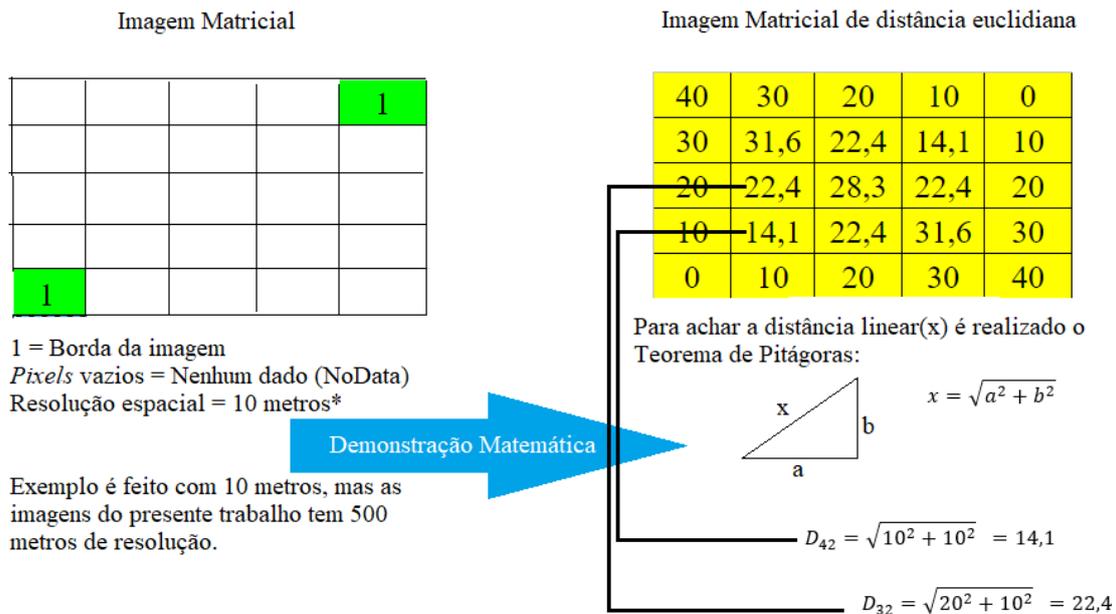
As imagens dos anos de 2001 e 2013, já extraídas por máscara, foram rodadas no software TERRSET sob o módulo LCM para obtenção das análises gráfica e tabular global no comparativo dos anos citados. Desse modo, analisou-se quanto cada classe ganhou e perdeu em quilômetros quadrados na comparação, fez-se a análise gráfica líquida comparando os anos, isto é, o saldo entre perdas e ganhos e também se analisou graficamente quanto cada classe de ações antrópicas perdeu ou ganhou perante as demais.

#### 4.7. Determinação da distância euclidiana

A determinação da distância euclidiana de cada classe, que neste caso representa a distância entre o centro do pixel e o ponto onde a ação antrópica não faz mais efeito ao ambiente, foi realizada com auxílio do aplicativo computacional ARCGIS 10.4. Para os cálculos, após a extração de máscara do Bioma Amazônia, as imagens foram

vetorizadas e dissolvidas nas classes de interesse. Assim, foi possível aplicar a ferramenta do aplicativo citado para o cálculo das distâncias euclidianas.

A distância euclidiana é a distância em linha reta do pixel até a delimitação das imagens(borda). Para exemplificar bem isso, a Figura 5 mostra o cálculo através do Teorema de Pitágoras.



**Figura 5** - Exemplo de como calcular distância euclidiana

#### 4.8. Ótica nebulosa *fuzzy*

Também com o auxílio do aplicativo computacional ARCGIS 10.4, foram aplicadas às imagens as funções de pertinência linear *fuzzy*, para que todas as imagens tivessem uma respectiva função linear e fossem geradas com a mesma legenda, no caso, 0 a 1.

#### 4.9. Determinação dos pesos matemáticos

Para os mapas representarem os valores reais, ou o mais próximo possível dos condizentes com a realidade, foi preciso ponderar os dados das variáveis antrópicas de

acordo com a metodologia de Louzada, Santos e Silva (2010). Tendo isso em vista, foi utilizado o método de Saaty (1977), o qual leva em consideração as variáveis em níveis de importância. Para isso foi estabelecida uma tabela de importância (Tabela 3).

**Tabela 3** - Escala de comparadores.

<b>Valores</b>	<b>Importância mútua</b>
1/9	Extremamente menos importante que
1/7	Muito fortemente menos importante que
1/5	Fortemente menos importante que
1/3	Moderadamente menos importante que
1	Igualmente importante que
3	Moderadamente mais importante que
5	Fortemente mais importante que
7	Muito fortemente mais importante que
9	Extremamente mais importante que

Fonte: Saaty (1977), apud Rosot (2000), adaptado.

Com base nessa classificação proposta na Tabela 3 fez-se uma matriz de comparação entre as variáveis, conforme a Tabela 4.

**Tabela 4** - Matriz de comparação.

<b>FATORES</b>	<b>VAR 05</b>	<b>VAR 04</b>	<b>VAR 03</b>	<b>VAR 02</b>	<b>VAR 01</b>
<b>VAR 05</b>	1	1/3	1/5	1/7	1/9
<b>VAR 04</b>	3	1	1/3	1/5	1/7
<b>VAR 03</b>	5	3	1	1/3	1/5
<b>VAR 02</b>	7	5	3	1	1/3
<b>VAR 01</b>	9	7	5	3	1

Para obter-se os pesos para cada variável (Tabela 5), dividiu-se cada elemento da Tabela 4 pelo somatório dos elementos da cada coluna da qual ele faz parte e, posteriormente, calculou-se a média aritmética dos valores pertencentes a cada linha.

<b>FATORES</b>	<b>Pesos</b>
<b>VAR 05</b>	$\beta_5$
<b>VAR 04</b>	$\beta_4$
<b>VAR 03</b>	$\beta_3$
<b>VAR 02</b>	$\beta_2$
<b>VAR 01</b>	$\beta_1$

**Tabela 5** - Pesos calculados.

Foi necessário fazer uma avaliação para saber se realmente os pesos calculados são reais. Para tal, realizou-se o cálculo da Razão de Consistência (RC) pela Equação 2. Para o peso ser consistente ele deve apresentar um valor de RC menor do que 0,10.

$$RC = IC \div IR \quad (2)$$

Onde:

RC - Razão de consistência;

IR - Índice aleatório que é definido pela Tabela 6;

IC - Índice de Consistência, calculado pela Equação 3:

$$IC = (\lambda_{max} - n) \div (n - 1) \quad (3)$$

Em que:

n - Número de variáveis testadas, que correspondem ao número de linhas e colunas da Tabela 4;

$\lambda_{max}$  - Autovetor calculado pela Equação 4:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{\{Aw\}i}{w} \quad (4)$$

Onde:

{Aw}i - Matriz resultante do produto da matriz de comparação pareada (Tabela 4), pela matriz dos pesos calculados (Tabela 5);

W - Pesos calculados.

**Tabela 6** - Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n.

<b>n</b>	2	3	4	5	6	7
<b>IR</b>	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32

Fonte: *Laboratório Nacional de Oak Ridge, EUA.*

Para calcular a RC, foram feitos os seguintes passos:

1. Multiplicação da matriz de comparação pela matriz dos pesos;
2. Cálculo do autovetor  $\lambda$  max;
3. Cálculo do IC;
4. Cálculo do IR;
5. Por fim, calculou-se a razão de consistência para o modelo, tendo em vista que esse valor deve ser menor que 0,10.

#### 4.10. “Mapemática”

Aplicou-se a técnica de álgebra aos mapas de 2001 e 2013 gerados pela lógica *fuzzy*, utilizando-se a ferramenta *Raster Calculator* no aplicativo computacional ArcGis 10.4 para a geração dos mapas dos anos de 2001 e 2013 correspondentes a vulnerabilidade a ações antrópicas para o Bioma Amazônia.

Esses mapas gerados foram reclassificados em 5 categorias de vulnerabilidade (baixo-baixíssimo, baixo, médio, alto e alto-altíssimo) definidas por meio de postos de Jenks.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

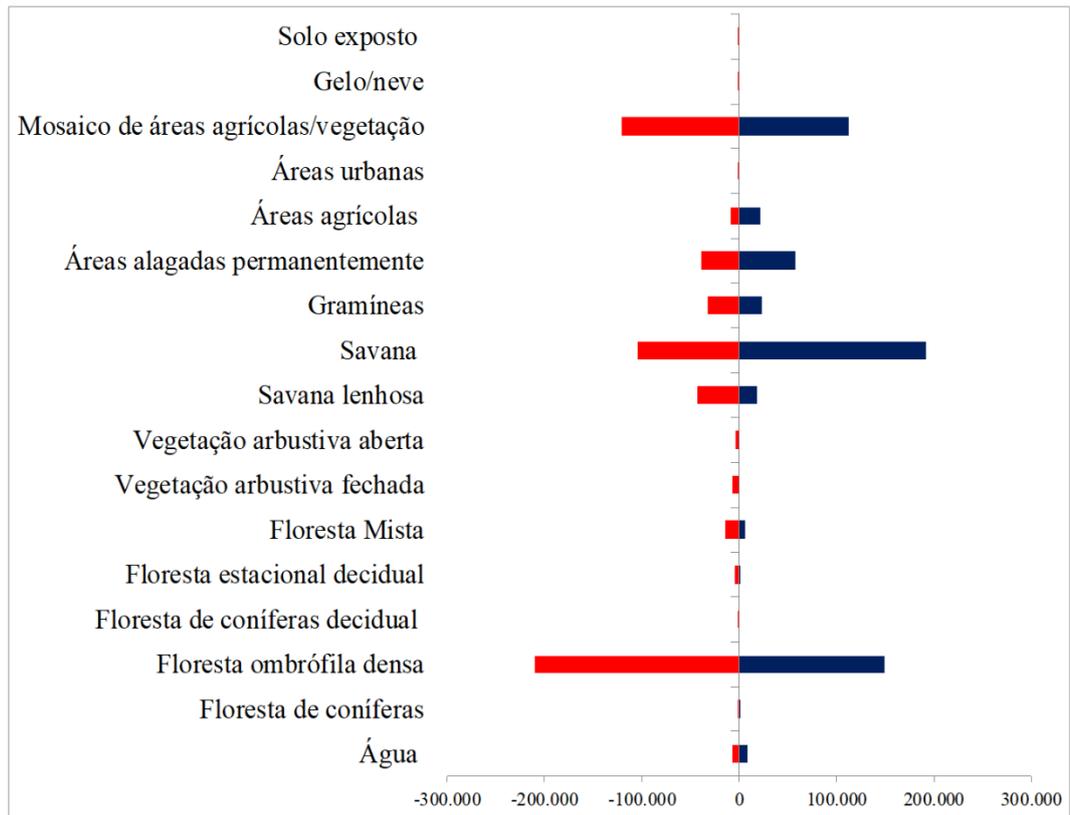
### 5.1 Análise da mudança de uso e ocupação da terra

O comparativo dos dados referentes aos anos de 2001 e 2013, realizado no LCM, produziu gráficos que ajudaram a entender a mudança espacial e temporal na área do Bioma Amazônia. Na Figura 5 é apresentada uma análise gráfica global, ou seja, um comparativo entre os presentes anos, sendo os Ganhos (AZUL) e as Perdas (VERMELHO) por cada classe de uso e ocupação da terra gerada pelo produto MODIS. A Figura 6 apresenta a análise gráfica líquida (ROXO) por classe.

Era esperado que a classe Áreas Urbanas ganhasse território ao longo dos anos, porém tendo como base os dados dos valores líquidos apresentados na Figura 6, essa classe perdeu território, algo que vai na contramão do último senso realizado pelo IBGE, que cita que no Brasil 19 cidades dobraram de tamanho, e dessas, 10 estão presentes no Bioma Amazônia. Isso pode ter ocorrido devido a alguma falha de projeção do sensor ou até mesmo pela falta de aplicação de alguma ferramenta para a correção das imagens geradas pelo mesmo.

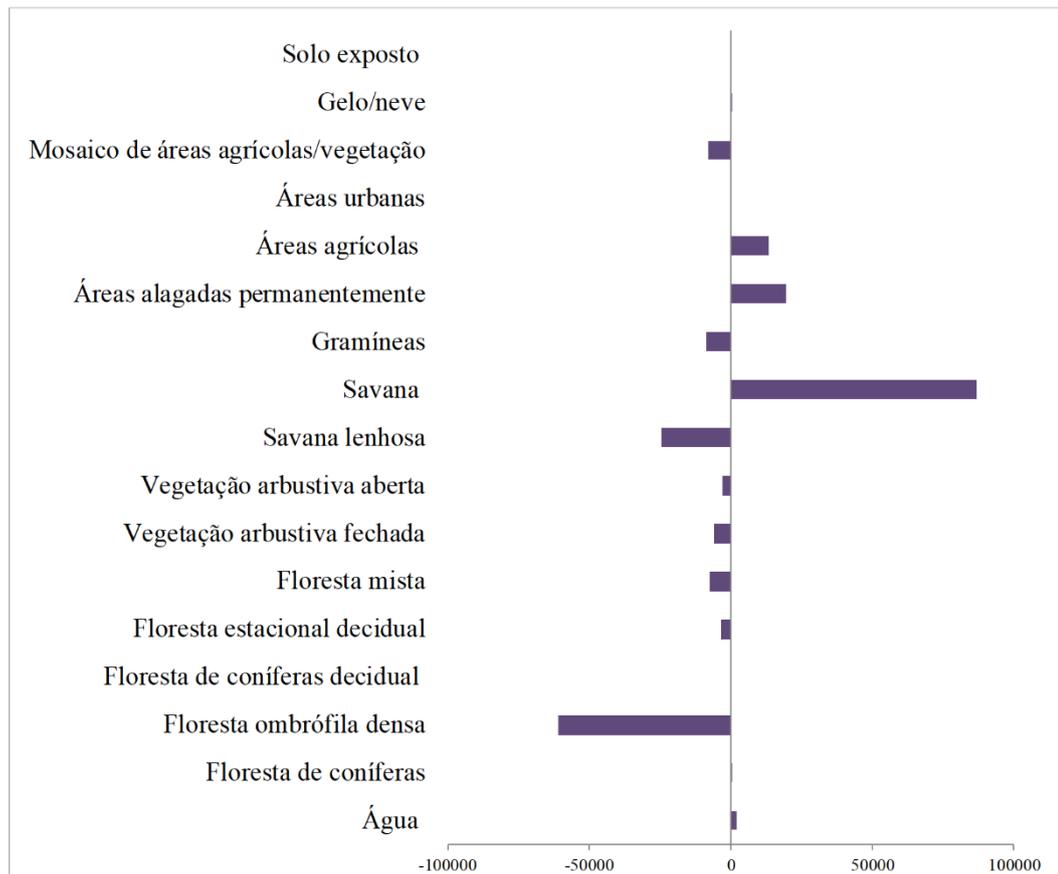
Um fato importante a se levar em consideração é o expressivo ganho de território da classe Savanas, explicado pelo fenômeno de “savanização” da Amazônia. Esse fato é muito preocupante para o momento atual e para o futuro do Bioma, pois deixa a vegetação altamente sucessível a incêndios florestais.

Pode-se também observar nas Figuras 5 e 6 que houve grande quantidade de perda da classe Floresta Ombrófila Densa, gerando uma grande fragilização da flora do Bioma, podendo até colocar espécies endêmicas em extinção.



Classes	Perdas (km²)	Ganhos (km²)	Classes	Perdas (km²)	Ganhos (km²)
Água	6.385,36	8.366,19	Savana	104.666,16	191.730,11
Floresta de coníferas	1.513,45	1.869,91	Gramíneas	32.388,01	23.569,18
Floresta ombrófila densa	209.650,15	148.691,80	Áreas alagadas permanentemente	38.406,76	58.062,28
Floresta de coníferas decidual	228,01	135,41	Áreas agrícolas	8.469,14	21.635,75
Floresta estacional decidual	4.953,56	1.626,56	Áreas urbanas	602,59	587,06
Floresta Mista	13.608,10	6.209,32	Mosaico de áreas agrícolas/vegetação	120.954,66	112.932,18
Vegetação arbustiva fechada	6.746,20	745,97	Gelo/neve	33,65	98,77
Vegetação arbustiva aberta	3.161,32	371,59	Solo exposto	954,27	766,28
Savana lenhosa	42.964,83	18.287,84			

**Figura 6** - Análise gráfica e tabular global comparando os anos de 2001 e 2013.



Classes	Mudança líquida (km <sup>2</sup> )	Classes	Mudança líquida (km <sup>2</sup> )
Água	1.980,83	Savana	87.063,95
Floresta de coníferas	356,46	Gramíneas	-8.818,83
Floresta ombrófila densa	-60.958,35	Áreas alagadas permanentemente	19.655,52
Floresta de coníferas decidual	-92,60	Áreas agrícolas	13.166,61
Floresta estacional decidual	-3.327,00	Áreas urbanas	-15,53
Floresta mista	-7.398,78	Mosaico de áreas agrícolas/vegetação	-8.022,48
Vegetação arbustiva fechada	-6.000,23	Gelo/neve	65,12
Vegetação arbustiva aberta	-2.789,72	Solo exposto	-187,99
Savana lenhosa	-24.676,99		

**Figura 7** - Análise gráfica e tabular líquida entre os respectivos anos de 2001 e 2013.

A Figura 7 ilustra a contribuição das classes determinadas como ações antrópicas para o Bioma Amazônia, mostrando a grande perda de Floresta Ombrófila Densa para Áreas agrícolas e a perda de áreas das Gramíneas e da classe Mosaico de áreas agrícolas / vegetação para a classe Savana, mais uma vez justificando o processo de “savanização”, que é caracterizado tanto pela degradação do ambiente, quanto pela junção da degradação com as mudanças climáticas no planeta.

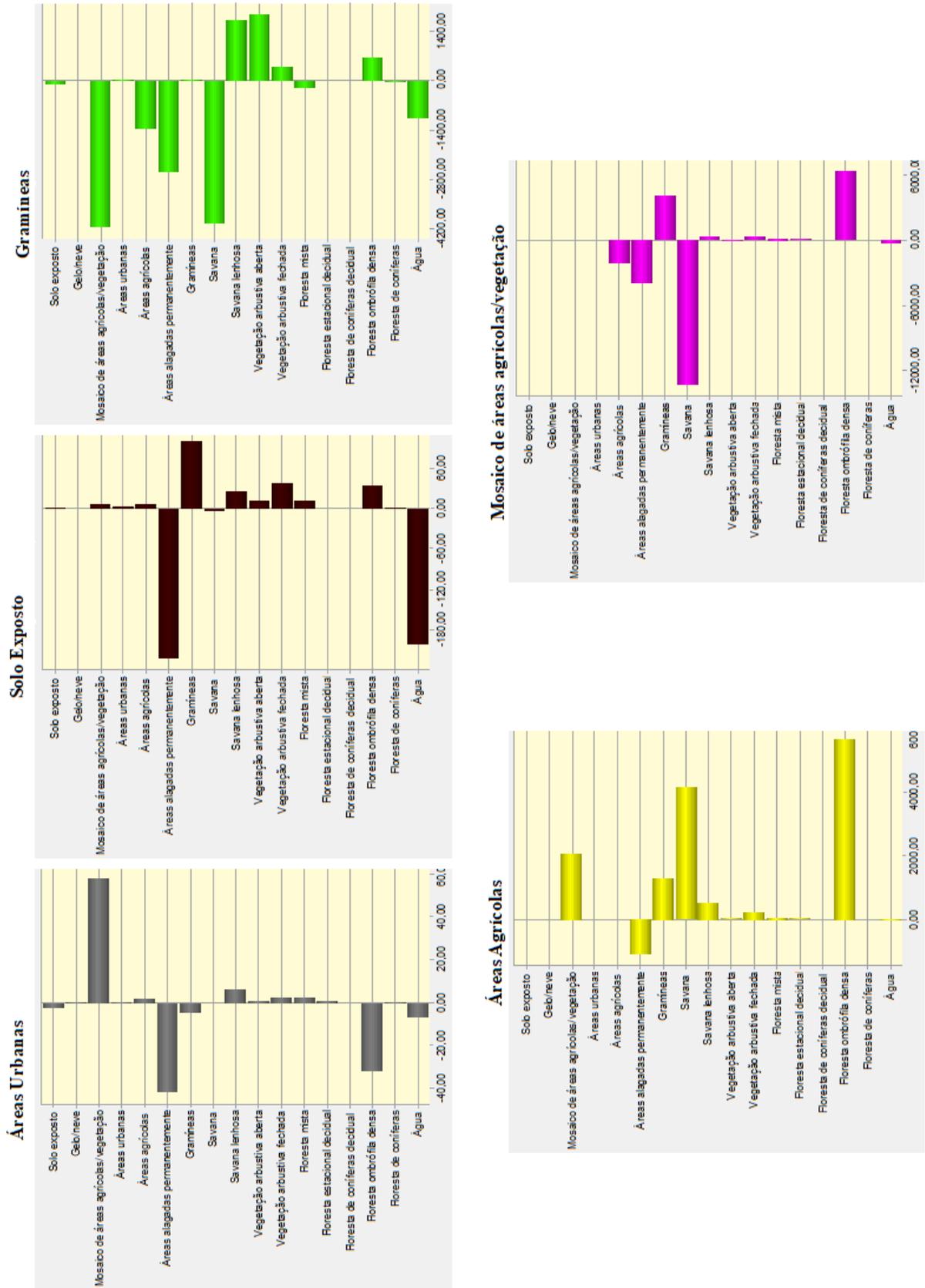
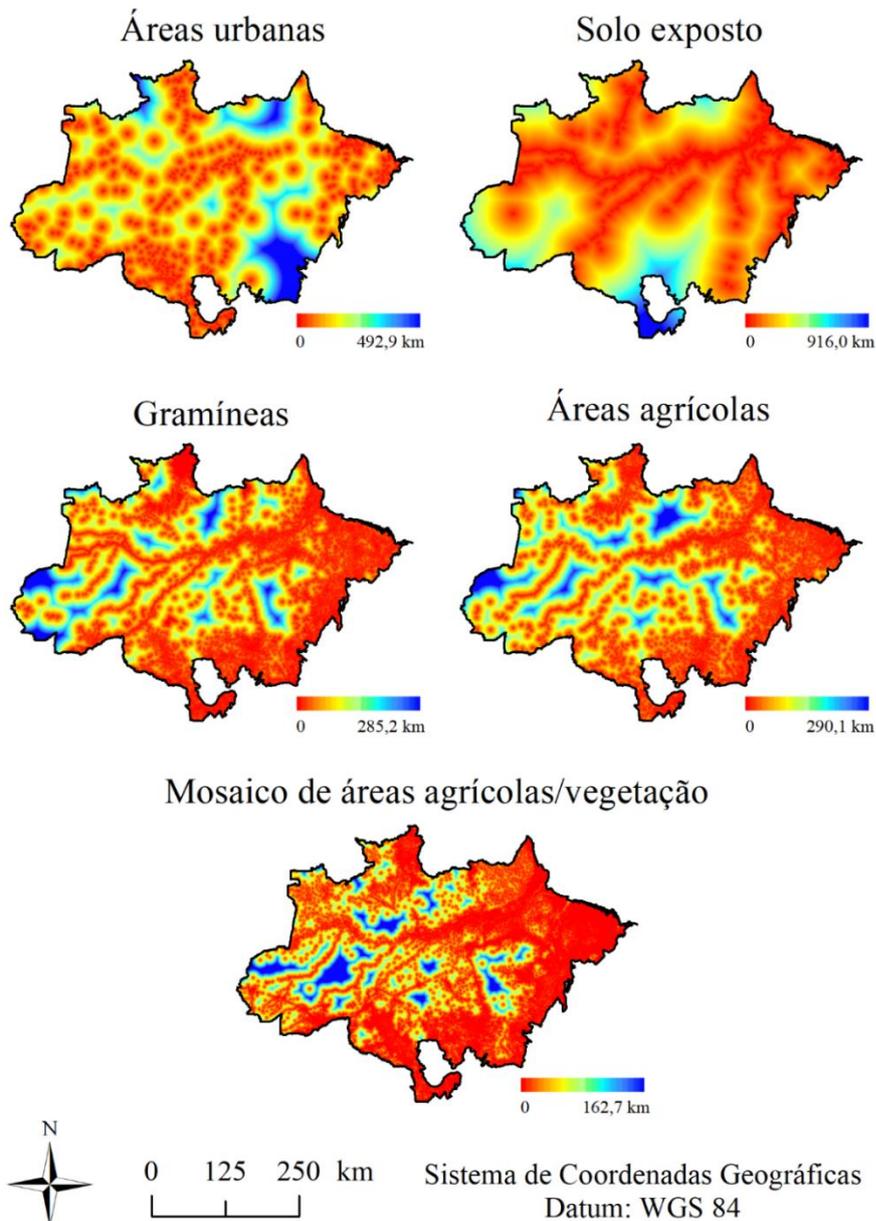


Figura 8 – Contribuição de cada classe de ação antrópica no bioma Amazônia em km².

## 5.2. Distância euclidiana

A distância euclidiana corresponde a distância do pixel de ocorrência até o local onde não ocorre vulnerabilidade à ação antrópica. As distâncias euclidianas das classes Áreas Urbanas, Solo Exposto, Gramíneas, Áreas Agrícolas e Mosaico de áreas agrícolas/vegetação para os anos de 2001 e 2013, estão dispostas nas Figuras 8 e 9, respectivamente. As regiões em vermelho correspondem ao centro do pixel e as regiões em azul se referem às regiões onde não ocorre vulnerabilidade a ação antrópica, sendo o tamanho do *pixel* igual a 500 m.



**Figura 9** – Distâncias euclidianas do ano de 2001.

Pode-se observar por meio da Figura 8, que para o ano de 2001, a distância euclidiana máxima foi de 492,2 km na classe de Áreas Urbanas, 916 km para Solo Exposto, 285,2 km para a classe Gramíneas, 290,1 km para Áreas Agrícolas e 162,7 km para a classe Mosaico de áreas agrícolas/vegetação. Isso quer dizer, quanto maior a distância euclidiana máxima, a classe vai ter muito mais áreas sem a influência dessa classe para a vulnerabilidade a ações antrópicas pela mesma. Com isso, podemos concluir que a classe de Solo exposto é que menor influência.

Já para o ano de 2013, de acordo com a Figura 9, na classe Áreas Urbanas a distância euclidiana máxima foi de 492,8 km, na de Solo Exposto 756,1 km, 449,9 km para a classe Gramíneas, 290,7 km para Áreas Agrícolas e para a classe Mosaico de áreas agrícolas/vegetação a distância foi de 274,5 km. Tendo em vista a mesma discussão para o ano de 2001, a classe que menos influência no ano de 2013 também é a Solo Exposto.

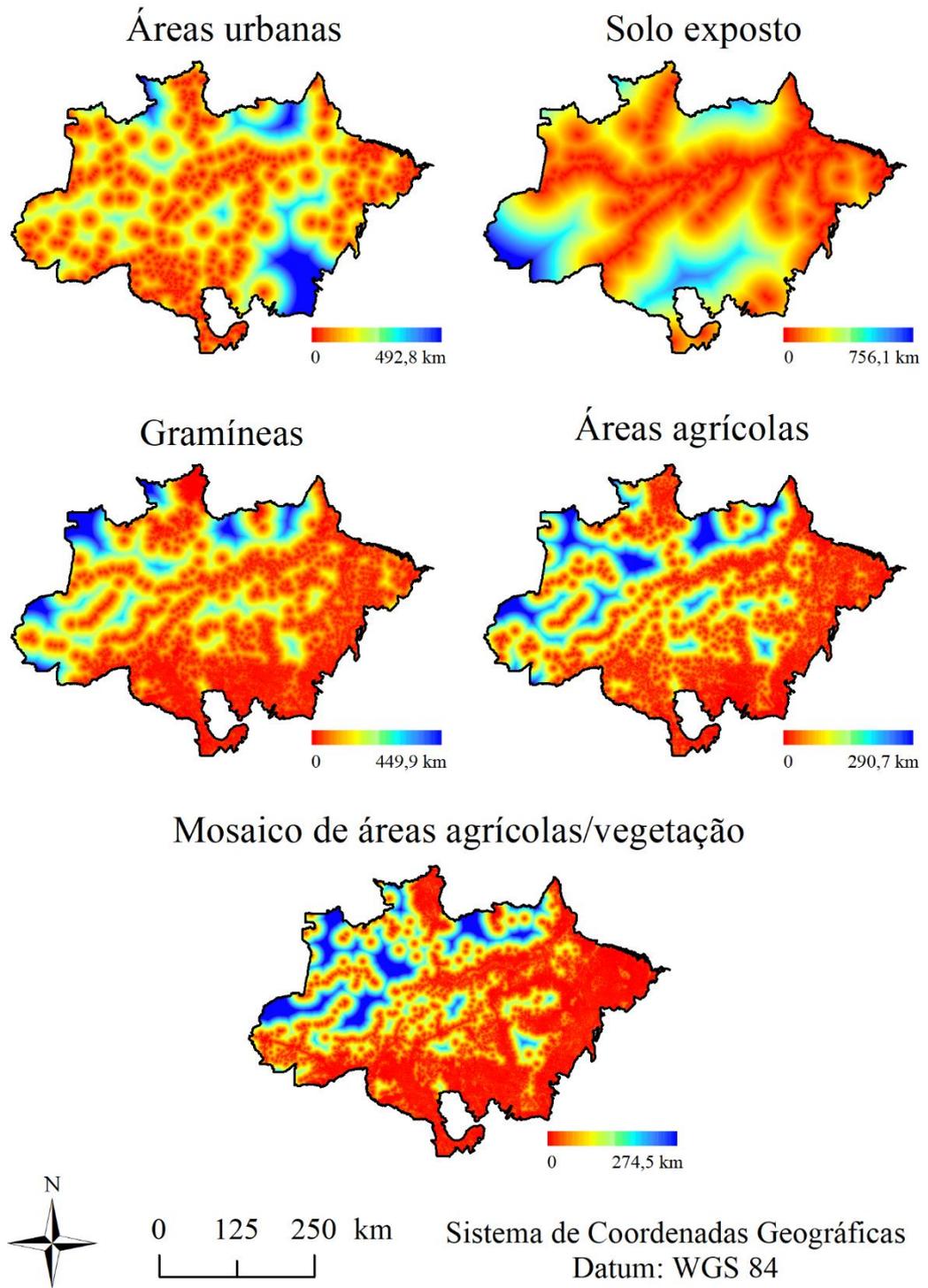
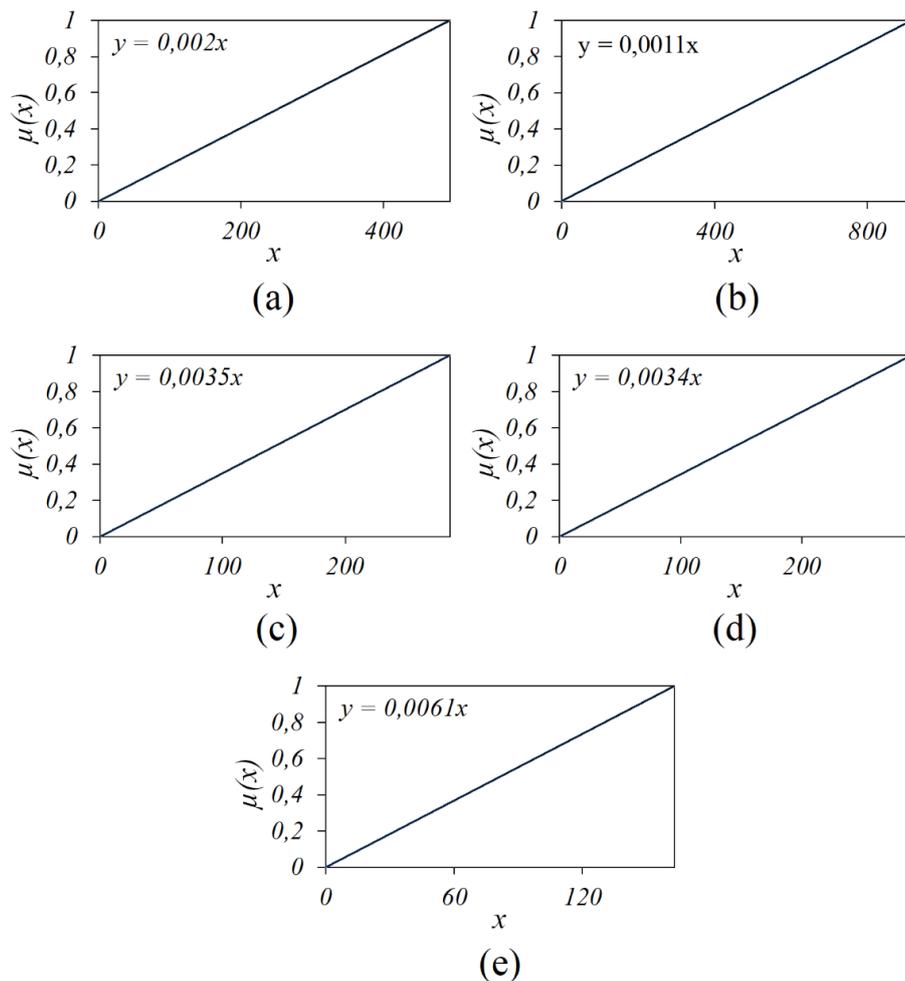


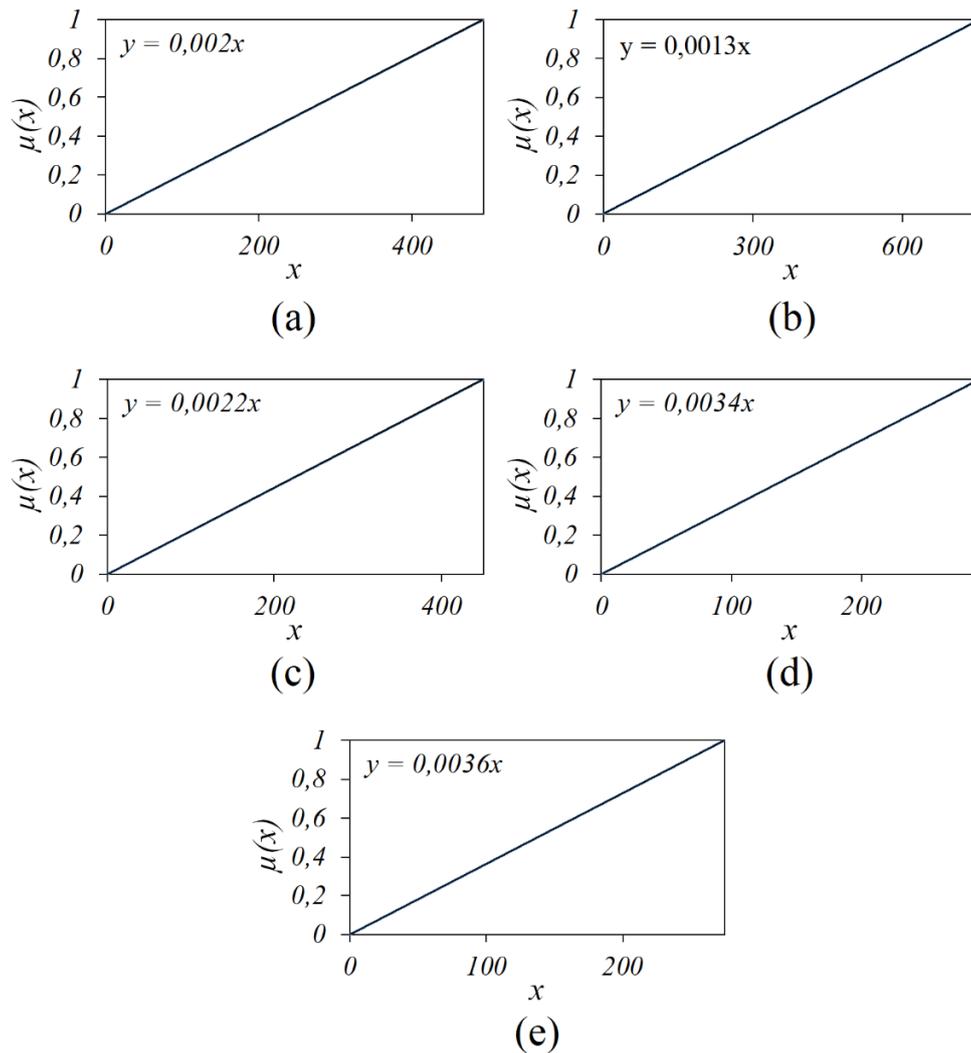
Figura 10 - Distâncias euclidianas do ano de 2013.

### 5.3. Função de pertinência *fuzzy*

As funções lineares *fuzzy* foram calculadas para as classes e gerou-se os respectivos gráficos, tendo como base a distância máxima euclidiana de cada classe para cada ano. As Figuras 10 e 11 representam as funções lineares *fuzzy* e os gráficos gerados para as classes estudadas nos anos de 2001 e 2013, respectivamente, onde  $x$  é a distância euclidiana e  $\mu(x)$  corresponde à distância *fuzzy*.



**Figura 11** – Gráficos e funções lineares fuzzy para as classes de ações antrópicas no ano de 2001. Onde (a) – Áreas Urbanas, (b) – Solo Exposto, (c) – Áreas agrícolas, (d) – Gramíneas e (e) – Mosaico de áreas agrícolas /vegetação.



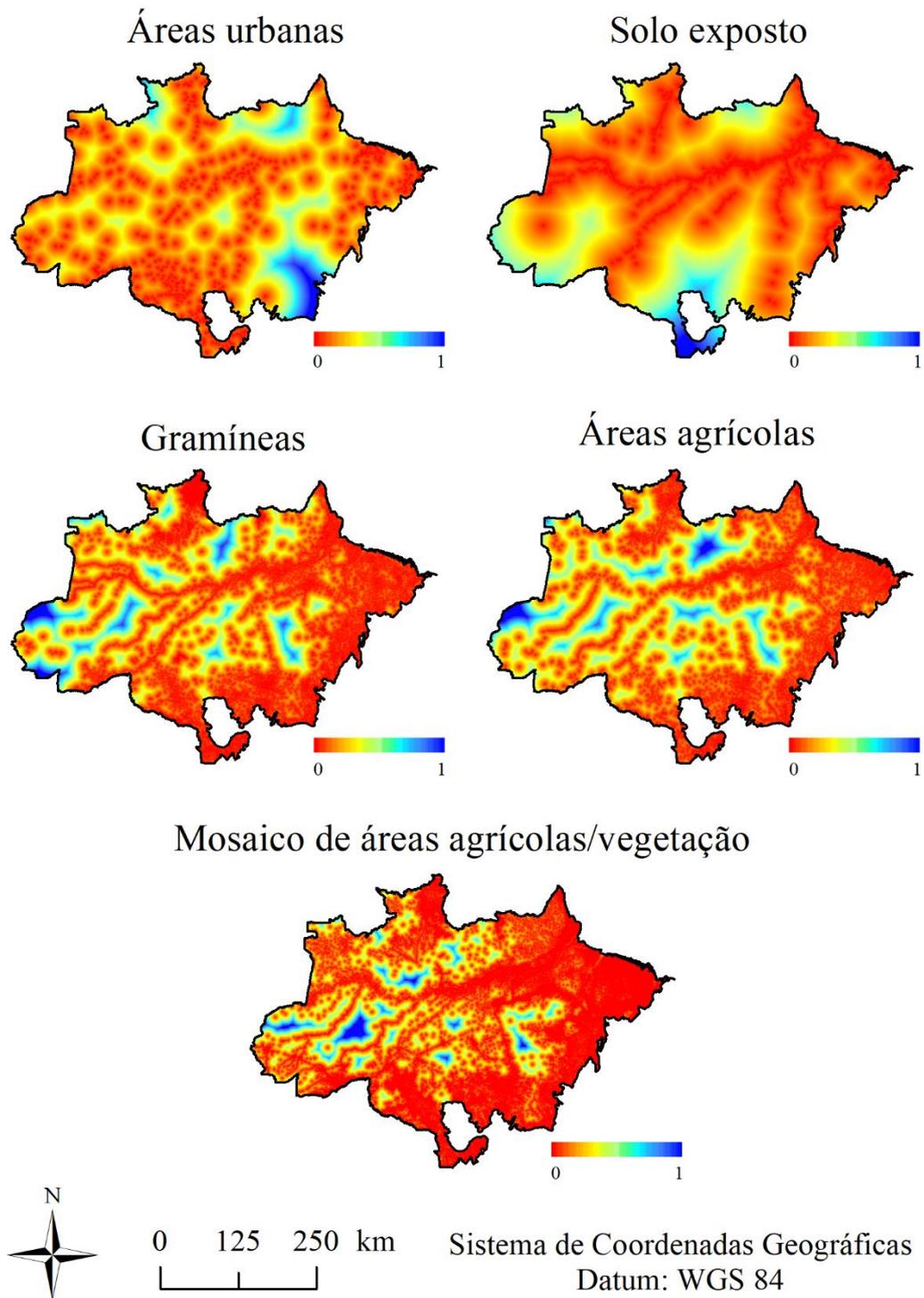
**Figura 12** – Gráficos e funções lineares fuzzy para as classes de ações antrópicas no ano de 2001. Onde (a) – Áreas Urbanas, (b) – Solo Exposto, (c) – Áreas agrícolas, (d) – Gramíneas e (e) – Mosaico de áreas agrícolas /vegetação.

Portanto quanto maior a distância em quilômetros, maior será o valor de *fuzzy*, ou seja, próximo a 1, sendo assim menor vulnerabilidade ambiental para a respectiva ação antrópica.

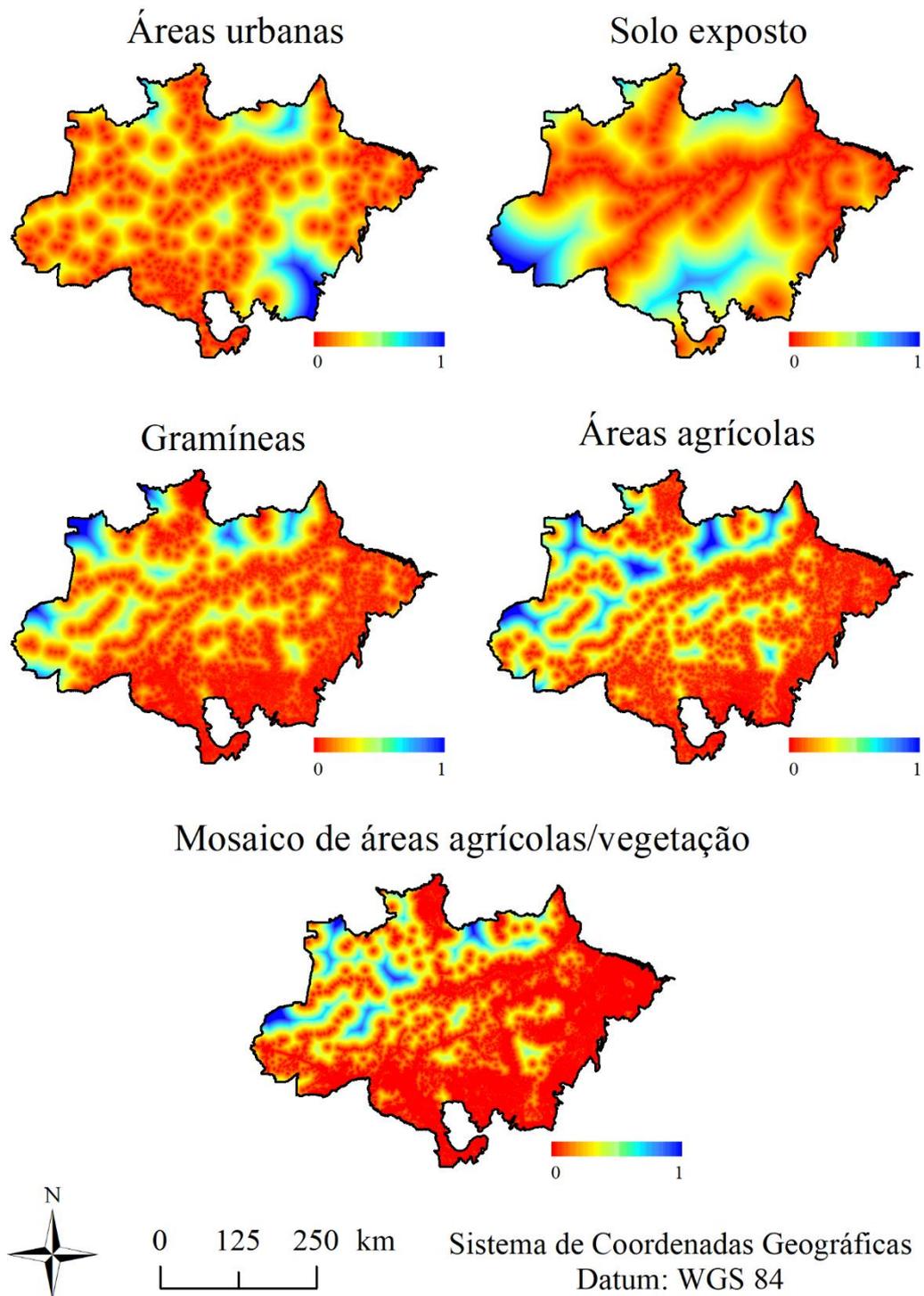
#### 5.4. Lógica *fuzzy*

A geração do mapa final de vulnerabilidade ambiental de 2001 (Figura 16) e do ano de 2013 (Figura 17) foram feitas com base nas imagens formadas por ótica *fuzzy* de

2001 (Figura 12) e 2013 (Figura 13), para a padronização da legenda, onde 0 = maior vulnerabilidade ambiental, ou seja, centro do *pixel* da classe e 1 = menor vulnerabilidade, portanto, ponto mais distante do centro do *pixel*.

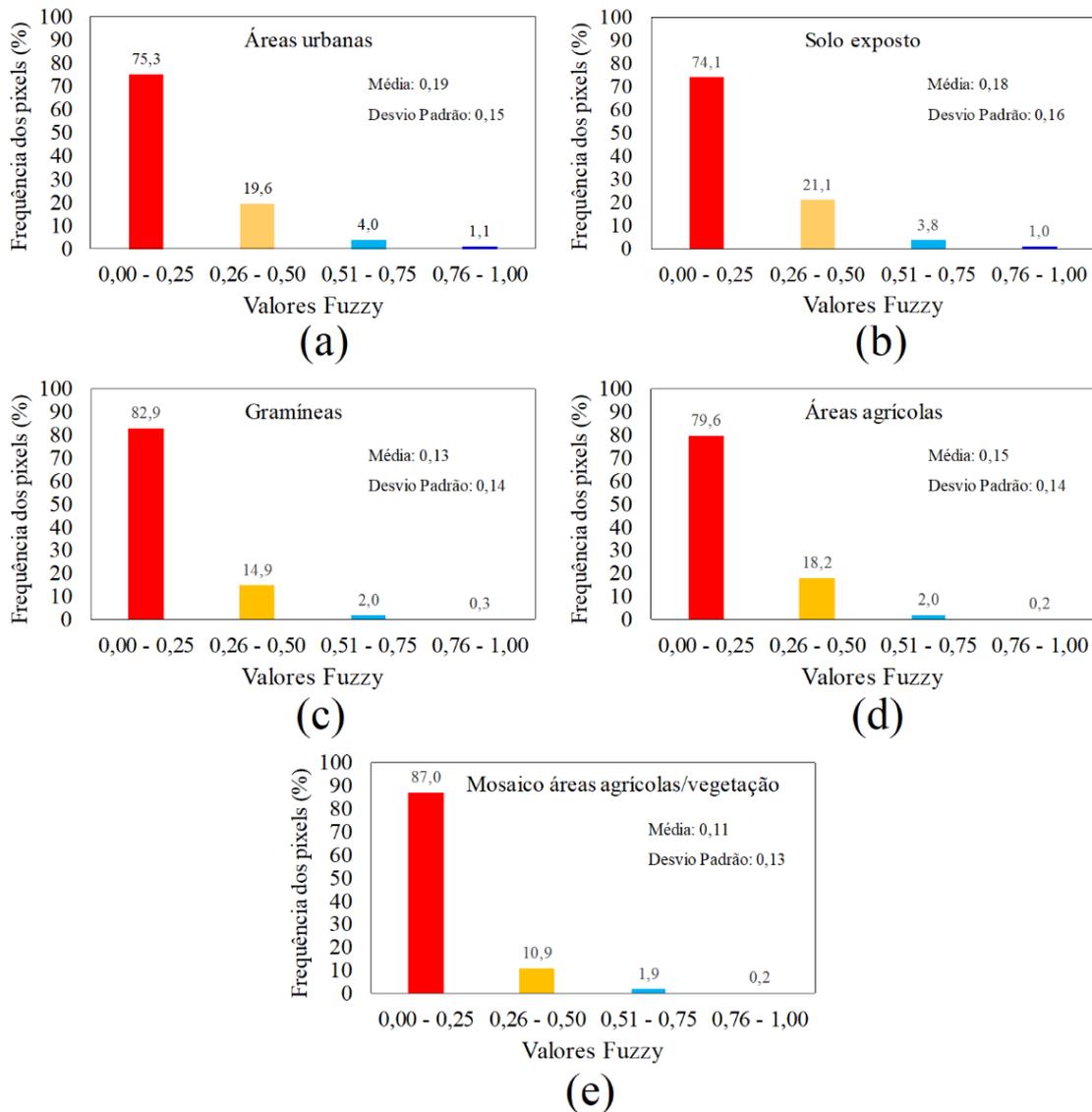


**Figura 13**– Lógica fuzzy ano do ano de 2001.



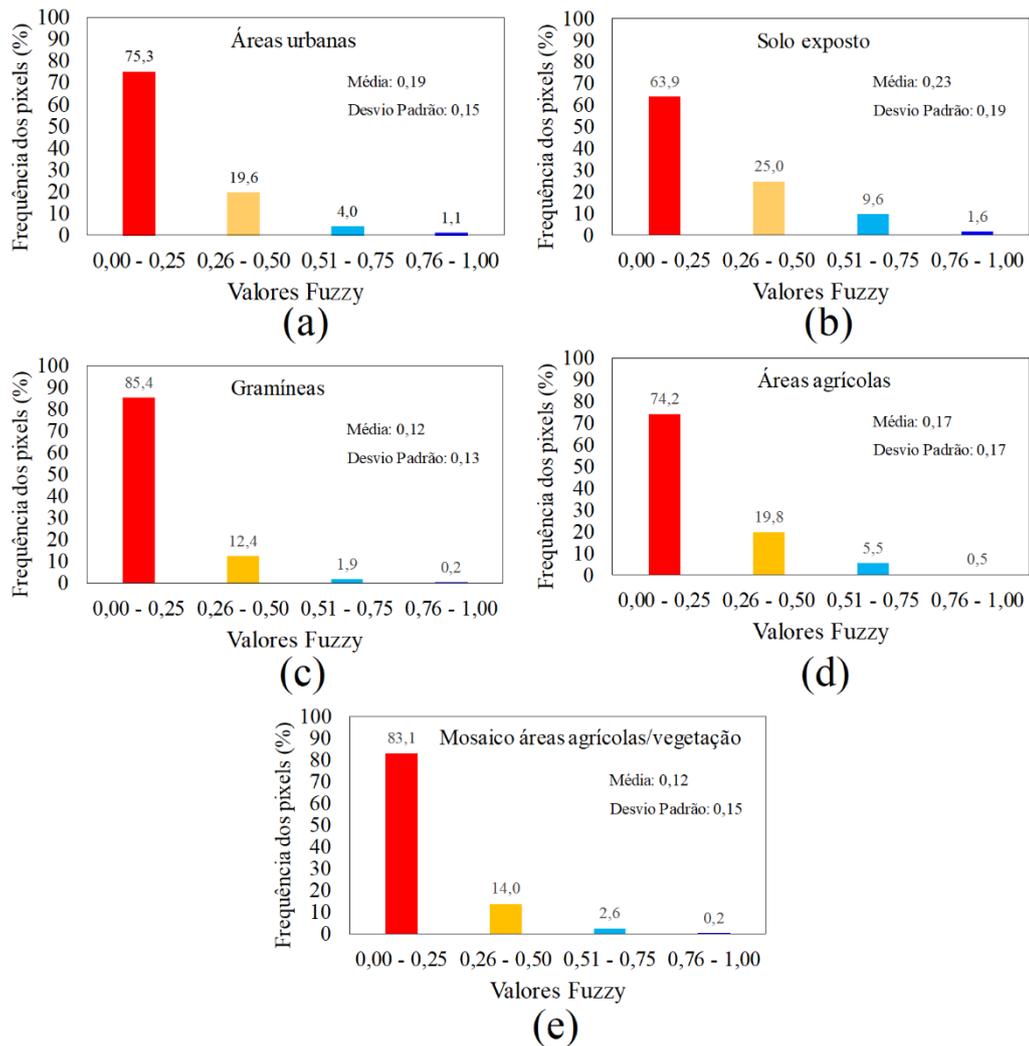
**Figura 14** – Lógica fuzzy ano do ano de 2013.

As frequências *fuzzy* dos *pixels* foram calculadas para cada classe de ação antrópica nos anos de 2001 e 2013, conforme ilustrado nas Figuras 14 e 15, respectivamente.



**Figura 15**– Frequências fuzzy ano de 2001. Sendo, (a) – Áreas Urbanas, (b) – Solo Exposto, (c) – Áreas agrícolas, (d) – Gramíneas e (e) – Mosaico de áreas agrícolas/vegetação.

Com base na Figura 14, pode-se afirmar que em todas as classes no ano de 2001 a frequência dos *pixels* é superior a 70 % na faixa de 0,0 – 0,25 de distância dos pontos mais vulneráveis do Bioma Amazônia, o que significa que em 2001 mais de 70 % do território desse Bioma estava muito vulnerável a ações antrópicas.



**Figura 16**– Frequências fuzzy ano de 2013. Onde (a) – Áreas Urbanas, (b) – Solo Exposto, (c) – Áreas agrícolas, (d) – Gramíneas e (e) – Mosaico de áreas agrícolas /vegetação.

Com base na Figura 15 pode-se afirmar que no ano de 2013 a frequência na faixa 0,00 – 0,25 dos *pixels* aumentou na classes Gramíneas, ou seja, áreas em que apresenta pastagem degradada, e diminuiu em nas classes Solo Exposto, Áreas agrícolas e Áreas de mosaicos de áreas agrícolas/vegetação em relação ao ano de 2001. Esses fatos são justificados que o uso das áreas agrícolas foram exaustivamente usados até se tornarem tal fisionomia (pastagem degradada).

As áreas que correspondem a não sofrer com as ações antrópicas (0,76-1,00) não ultrapassam 1,2 % em nenhuma das classes nos respectivos anos. Por tanto, pode-se dizer, que o Bioma amazônico apresenta áreas extremamente vulneráveis as ações antrópicas

## 5.5. Definição dos pesos matemáticos e ajuste na equação de vulnerabilidade ambiental

O cálculo dos pesos para as classes de acordo com o modelo de AHP apresentou os resultados contidos na Tabela 7.

**Tabela 7** - Pesos matemáticos para a equação de vulnerabilidade ambiental. Sendo, VAR 01– Áreas Urbanas, VAR 02 – Solo Exposto, VAR 03 – Áreas agrícolas, VAR 04 – Gramíneas e VAR 05 – Áreas Urbanas Mosaico de áreas agrícolas /vegetação Áreas Urbanas.

FATORES	Pesos
VAR 05	0,0333
VAR 04	0,0634
VAR 03	0,1290
VAR 02	0,2615
VAR 01	0,5128

A soma dos pesos dever ser igual a 100%, ou seja, 1.

Esses valores são os multiplicadores para o ajustamento da Equação (5) de mapa *fuzzy* para a construção do mapa final de vulnerabilidade ambiental para o Bioma Amazônia

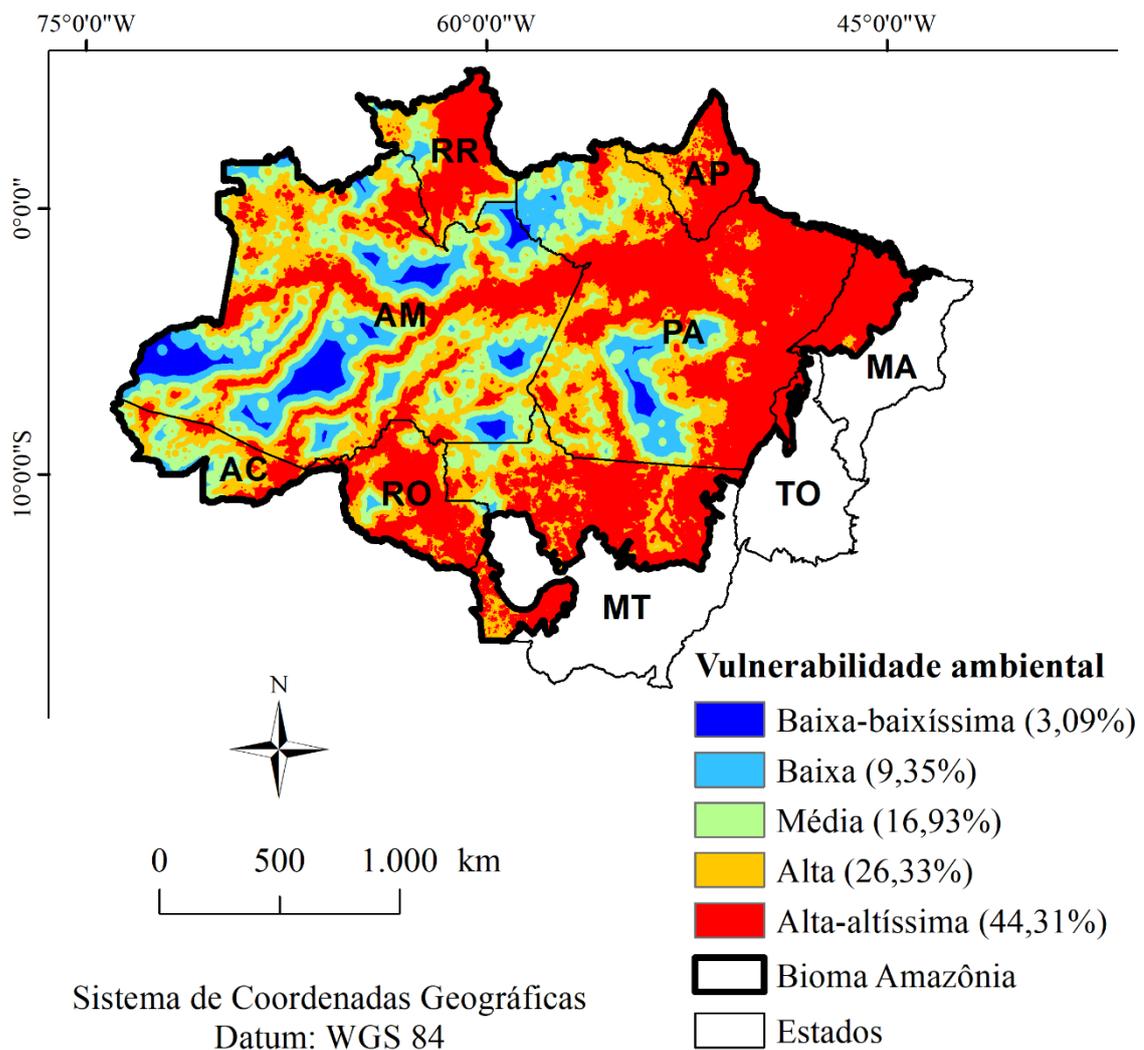
A Razão de Consistência calculada foi de 0,05, estando dentro do limite imposto pelo modelo utilizado que é  $<0,10$ , ou seja,  $<10\%$ . Portanto, o modelo de equação para a vulnerabilidade ambiental é aceitável. Desse modo, a equação ajustada para a Vulnerabilidade Ambiental no Bioma Amazônia (Equação 5) é:

$$VAA = 0,5128. \textit{fuzzy VAR 01} + 0,2615. \textit{fuzzy VAR 02} + 0,1290. \textit{fuzzy VAR 03} + 0,0634. \textit{fuzzy VAR 04} + 0,0333. \textit{fuzzy VAR 05} \quad (5)$$

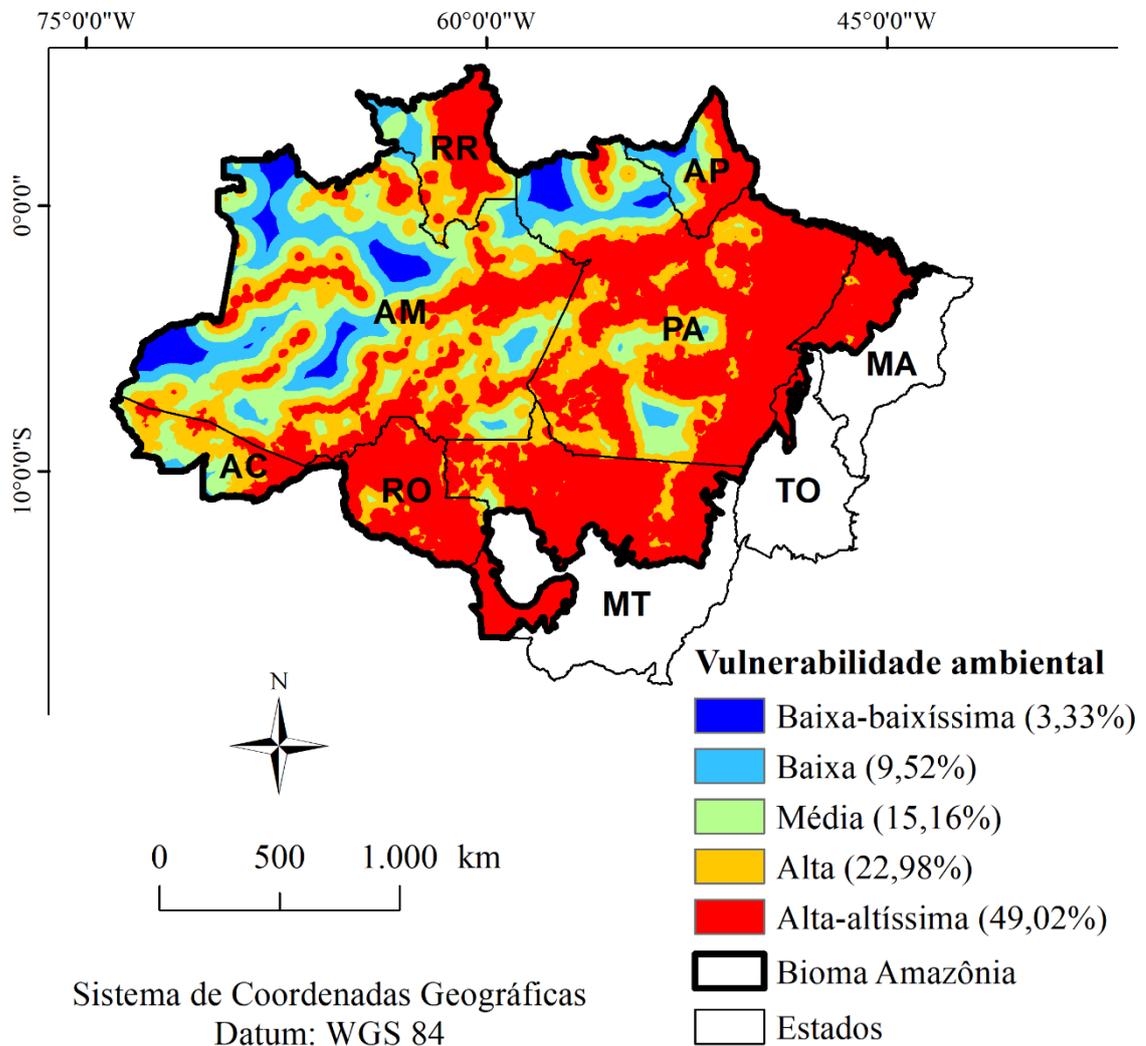
Em posse dessa equação ajustada, é realizada a matemática de mapas para a geração do mapa de vulnerabilidade ambiental para o Bioma, multiplicando os mapas das classes *fuzzy* pelos pesos calculados pelo modelo AHP.

## 5.6. Geração do mapa de Vulnerabilidade Ambiental a ações antrópicas no Bioma Amazônia

Para geração dos mapas, foi aplicado a matemática de mapas utilizando a Equação 5, gerando dois mapas, o de 2001 (Figura 16) e de 2013 (Figura 17). Esses mapas, foram reclassificados pelos postos de Jenks, gerando 5 novas classes de classificação: Baixa -baixíssima, baixa, média, alta e alta-altíssima.



**Figura 17** – Mapa de Vulnerabilidade ambiental a ações antrópicas no ano de 2001.



**Figura 18-** Mapa de Vulnerabilidade ambiental a ações antrópicas para o ano de 2013.

É importante notar que entre os anos de 2001 e 2013 a maior vulnerabilidade ambiental ocorreu nos contornos dos cursos d'água, visto que na região amazônica, o desenvolvimento gira em torno dos rios.

Os estados de Rondônia, Mato grosso, Tocantins e Maranhão, são praticamente pertencentes a classe de alta-altíssima vulnerabilidade às ações antrópicas, tanto em 2001 quanto em 2013, o que pode ser explicado por esses estados serem altamente explorados pela pecuária e pelos cultivos agrícolas.

O estado do Pará, teve sua taxa de vulnerabilidade aumentada de 2001 para 2013, o que é também facilmente justificado pelo fato do mesmo ser um estado muito explorado pelos seus recursos minerais e também por sua alta atividade pecuarista.

A categoria Alta-altíssima em relação ao ano de 2001, teve um aumento de aproximadamente 5 %, valor considerado substancial em tão pouco tempo.

## 6. CONCLUSÕES

De acordo com o presente trabalho, conclui-se que a Amazônia brasileira vem se tornando cada vez mais vulnerável a ações antrópicas. Porém também deve-se levar em consideração o fenômeno de savanização, pois o mesmo na Amazônia vem afetando negativamente a área de estudo

As variáveis antrópicas foram:

- Áreas urbanas
- Solo exposto
- Gramíneas
- Áreas agrícolas
- Mosaico de áreas agrícolas/vegetação

As imagens foram todas padronizadas com lógica *fuzzy* com escala de 0=local em que existe a maior vulnerabilidade ambiental a ações antrópicas e 1= local onde não ocorre vulnerabilidade ambiental a ações antrópicas.

Modelo hierárquico de AHP, foi realizado com sucesso, determinando os pesos para as classes das variáveis antrópicas com o ajustamento de equação de vulnerabilidade ambiental a ações antrópicas.

Também foi realizada a análise de agrupamento proposta pelos postos de Jenks, agrupamento feito em 5 classificações 0,00-0,20(alta-altíssima vulnerabilidade),0,21-0,40(alta vulnerabilidade), 0,41-0,60(média vulnerabilidade), 0,61-0,80(baixa vulnerabilidade) e 0,81-1,00(baixa-baixíssima vulnerabilidade).

A presença de áreas altamente vulneráveis nas proximidades dos cursos d'água se dá por conta principalmente das áreas urbanas, visto que na região amazônica parte das cidades se localiza nas regiões marginais dos rios por conta da facilidade do transporte entre os locais, além disso, as áreas agrícolas também são instaladas nesses locais pela necessidade de água para o cultivo e também pela facilidade no transporte da produção e de insumos para as áreas de cultivo.

Em relação a área de cultivo em Mosaico áreas agrícolas/vegetação, pode-se concluir pelos números apresentados que a mesma foi usada exaustivamente, tornando-se uma região de Gramíneas, ou seja, região de pastagem degradada.

As Áreas de solo exposto, que podem ser consideradas bancos de areia próximos aos rios, foram diminuídas no ano de 2013 por conta das áreas da classe Água, o que ocorreu pelo acréscimo de pluviosidade na região Amazônica nesse período, o que fez com que os cursos d'água aumentassem de volume, diminuindo assim as áreas de banco de areia.

## 7. REFERÊNCIAS

- ALENCAR, A.; NEPSTAD, N.; MCGRATH, D.; MOUTINHO, P.; PACHECO, P.; DIAZ, M. D. C. V e FILHO, B. S. *Desmatamento na Amazônia: indo além da emergência crônica*. Manaus, Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (Ipam), 2004, 89 p.
- Andreae, M.O.; Rosenfeld, D.; Artaxo, P.; Costa, A.A.; Frank, G. P.; Longo, K.M.; Silva-Dias, M.A.F. "Smoking rain clouds over the Amazon". *Science*, Vol 303, 1342-1345, 2004.
- APARECIDO, L. E. O. et al. Ações antrópicas no ambiente onde vivemos. Revista Agrogeoambiental, Pouso Alegre, Edição Especial n. 1, p. 67-71, ago. 2013. Brazil Adventure International. **Roteiros de Ecoturismo**, 2006. Disponível em: <<http://www.ecoturismoaventura.com.br/brasil-biomas/amazonia.htm>>. Acesso em: 11 de dezembro de 2017.
- CERRI, C.E.P.; EASTER, M.; PAUSTIAN, K.; KILLIAN, K.; COLEMAN, K.; BERNOUX, M.; POWLSON, D.S.; BATJES, N.H.; MILNE, E. & CERRI, C.C. **Predicted soil organic carbon stocks and changes in the Brazilian Amazon Between 2000 and 2030**. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 122:58-72, 2007b.
- CHAKRAVARTY, S. et al. Deforestation: causes, effects and control strategies. In: AKAIS, O. C. **Global perspectives on sustainable forest management**. Croatia: InTech, 2012. p. 3-28.
- COHEN, J. C. P.; BELTRÃO, J. C.; GANDU, A. W.; SILVA, R. R. **Influência do desmatamento sobre o ciclo hidrológico na Amazônia**. *Cienc. Cult.* vol.59, no.3, 2007.
- FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. *Acta Amazônica*, v. 36, n. 3, p. 395-400, 2006.
- FIGEIREDO, D. **Conceitos básicos de sensoriamento remoto**. 2005. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos\\_sm.pdf](http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf)>. Acesso em: 25 de novembro, 2017.
- FIGUEIRÊDO, M. C. B. et al. Avaliação da Vulnerabilidade Ambiental de Reservatórios à Eutrofização. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 12, n. 4, p. 399-409, out. 2007.
- FOLEY, J. A. et al. Amazonia revealed: forest degradation and loss of ecosystem goods and services in the Amazon Basin. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 5, n. 1, p. 25-32, 2007.
- GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica *fuzzy*. *SBA Controle & Automação*, v.4, n. 3, p. 97-115, 1994.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (Inpe). *Monitoramento da Floresta*, São José dos Campos 2004.

JUSTICE, C.O.; GIGLIO, B.; KORONTZI, S.; OWENS, J.; MORISETTE, J.T.; ROY, D.P.; DESCLOITRES, J.; ALLEAUME, S.; PETITCOLIN, F.; KAUFMAN, Y. The MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, v.83, p.244-262, 2002.

LAURANCE, W. F.; COCHRANE, M. A.; BERGEN, S.; FEARNSIDE, P. M.; DELAMÔNICA, P.; BARBER, C.; D'ANGELO, S. & FERNANDES. T. **The future of Brazilian Amazon. Science**, 291:438-439, 2001.

LOUZADA, F. L. R. O; SANTOS, A. R. SILVA, A. G. **Delimitação nos corredores ecológicos no ArcGIS 9.3**. Gráfica F &M, Alegre-CAUFES, 2010.

MALHI, Y.; ROBERTS, J. .; BETTS, R. .; KILLEEN, T. .; LI, W.; NOBRE, C. A. Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon. **Science**, v. 319, n. 169, p. 168–172, 2008.

MARTINS E SOUZA FILHO, P. W. *et al.* Sensoriamento remoto e recursos naturais da Amazônia. **Cienc. Cult.**, São Paulo, v. 58, n. 3, p. 37-41, 2006.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília, 276 p., 2012. Disponível em: <<http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>>. Acesso em: 20 de novembro, 2017.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Plano de ação para a prevenção e controle do desmatamento na Amazônia legal**, Brasília, 2004.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **MODIS design**. 2010. Disponível em:< <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/design.php>>. Acesso em: 01 de dezembro, 2017.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Specifications**. 2010. Disponível em <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>>. Acesso em: 01 de dezembro, 2017.

NOBRE, C. A.; OYAMA, M. D.; OLIVEIRA, G. S.; MARENGO, J. A.; SALATI, E. **"Impact of climate change scenarios for 2100 on the biomes of South America. First International"** - CLIVAR Conference, Baltimore, USA, 21-25, 2004.

PAULA, V. H.; PAI, A. D. Descrição dos produtos do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) embarcados nos satélites Terra e Aqua. **5ª JORNACITEC – Jornada Científica e Tecnológica da FATEC de Botucatu**, Botucatu, 2016.

PENA, Rodolfo F. Alves. **"Bioma Amazônia"; Brasil Escola**. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/brasil/amazonia.htm>>. Acesso em 11 de dezembro de 2017.

RIZZI, R. RUDORF, B. F. T. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo agrônômico para estimar a produtividade de soja. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.42, n.1, p.73-80, 2007.

SAITO, N. S. **Identificação de áreas com tendência a desertificação no estado do Espírito Santo com o auxílio de geotecnologias**. 2015. 122p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) -Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

SAMPAIO, L. M. D.; OLIVEIRA, M. J. F.; IGNACIO, A. A. V. Lógica Nebulosa: aplicações e tendências. **Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha (SPOLM)**, Rio de Janeiro, 2007.

SANTOS, M. F. S. **Geoprocessamento aplicado ao estudo da vulnerabilidade ambiental da Serra Calçada – MG**. Monografia – Curso de especialização em Geoprocessamento, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SCHULZ, C. et al. Land change and loss of landscape diversity at the Caatinga phytogeographical domain—Analysis of pattern-process relationships with MODIS land cover products (2001–2012). **Journal of Arid Environments**, v. 136, p. 54-74, 2017.

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.

ZHU, X.; LIU, D. L. Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 112, p. 222-231, 2015.

## APÊNDICE

Cálculo de determinação dos pesos matemáticos AHP.

1) Matriz de comparação

FATORES	VAR 05	VAR 04	VAR 03	VAR 02	VAR 01
VAR 05	1	1/3	1/5	1/7	1/9
VAR 04	3	1	1/3	1/5	1/7
VAR 03	5	3	1	1/3	1/5
VAR 02	7	5	3	1	1/3
VAR 01	9	7	5	3	1

2) Determinação dos pesos matemáticos

a) Dividir cada elemento pela somatória dos elementos da coluna

FATORES	VAR 05	VAR 04	VAR 03	VAR 02	VAR 01
VAR 05	1/25 = 0,04	0,333/16,33 = 0,020	0,2/9,533 = 0,021	0,143/4,676 = 0,031	0,111/1,787 = 0,062
VAR 04	3/25 = 0,12	1/16,33 = 0,061	0,333/9,533 = 0,035	0,2/4,676 = 0,043	0,143/1,787 = 0,080
VAR 03	5/25 = 0,2	3/16,33 = 0,184	1/9,533 = 0,105	0,333/4,676 = 0,071	0,2/1,787 = 0,112
VAR 02	7/25 = 0,28	5/16,33 = 0,306	3/9,533 = 0,315	1/4,676 = 0,214	0,333/1,787 = 0,186
VAR 01	9/15 = 0,36	7/16,33 = 0,429	5/9,533 = 0,524	3/4,676 = 0,642	1/1,787 = 0,650

b) Média entre as colunas chega-se aos pesos.

Pesos
0.0333
0.0634
0.1290
0.2615
0.5128

3) Cálculo do  $\lambda_{max}$

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{\{Aw\}i}{w}$$

$$Aw 1 = (1 \times 0,033 + 1/3 \times 0,0634 + 1/5 \times 0,1290 + 1/7 \times 0,2615 + 1/9 \times 0,5128) = 0,14457$$

$$Aw 2 = (3 \times 0,033 + 3 \times 0,0634 + 1/3 \times 0,1290 + 1/5 \times 0,2615 + 1/7 \times 0,5128) = 0,45776$$

$$Aw 3 = (5 \times 0,033 + 3 \times 0,0634 + 1 \times 0,1290 + 1/3 \times 0,2615 + 1/5 \times 0,5128) = 0,54493$$

$$Aw 4 = (7 \times 0,033 + 5 \times 0,0634 + 3 \times 0,1290 + 1 \times 0,2615 + 1/3 \times 0,5128) = 1,36473$$

$$Aw 5 = (9 \times 0,033 + 7 \times 0,0634 + 5 \times 0,1290 + 7 \times 0,2615 + 9 \times 0,5128) = 7,83150$$

$$\begin{aligned} \lambda_{max} &= \frac{1}{5} \times \left( \frac{0,14457}{0,0333} + \frac{0,45776}{0,0634} + \frac{0,54493}{0,1290} + \frac{1,36473}{0,2615} + \frac{7,83150}{0,5128} \right) \\ &= 0,725536 \end{aligned}$$

4) Cálculo do IC

$$IC = (0,725536 - 5) \div (5 - 1) = 0,056384$$

5) Cálculo da Razão de Consistência

$$RC = 0,056384 \div 1,12 = 0,050$$

Portanto IC menor que 10%, modelo aprovado.