



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



Inferência fuzzy para o suporte ao mapeamento de intensidade de degradação florestal

Maria Antônia Falcão de Oliveira

Trabalho Final da disciplina de
Introdução ao Geoprocessamento
ministrada pelo Professor Dr. Antônio
Miguel Monteiro.

INPE
São José dos Campos
2022

RESUMO

A degradação é um dos fatores que contribui significativamente para as emissões globais de carbono. É um processo que ocorre a longo prazo e está associado a extração seletiva de madeira, fogo florestal e por consequência, ao efeito de borda. Com a observação crescente desses processos, ferramentas capazes de gerar subsídios no processo de mapeamento dessas áreas são cada vez mais necessárias. Nesse sentido, esse trabalho teve como objetivo, identificar áreas com diferentes níveis de intensidade de degradação florestal com uso de técnicas de inferência geográfica (*Fuzzy*), aplicadas a uma área localizada entre os municípios Santa Carmem e Feliz Natal no estado Mato Grosso - MT. Para compor os mapas indicadores da intensidade de degradação, foram utilizados os dados do PRODE mapeados até 2017 e uma classificação da cobertura da terra correspondendo às classes Solo Exposto, Degradação, Queimada, Floresta e Regeneração. Dentre as classes que compõe o mapa classificado, a classe floresta e a classe solo exposto foram utilizadas como principais variáveis para indicar a baixa ou a alta intensidade de degradação na área de estudo. A máscara de desmatamento do PRODES, foi utilizada como parâmetro para indicar o efeito de borda a partir de faixas de distância juntamente com a classe solo exposto. Para compor os diferentes mapas associados aos fatores de intensidade de degradação, utilizou-se a lógica *fuzzy* e o operador espacial *gamma*. Dentre os cenários de intensidade de degradação obtidos, a classe Alta degradação variou de 0,09% a 0,77% para os *gammas* com intervalos de 0.91 a 0.96. e a classe Nenhuma/Baixa degradação é a classe que representa maior proporção de área em todos os cenários, variando de 73,27% em um cenário mais otimista e 60,84% em um cenário mais pessimista. Dentre os cenários escolhido para ser avaliado pelo DETER e PMFs o cenário de *gamma* 0.91 representa o que poderia ser esperado para uma área que está sob manejo florestal, supondo que as normas para extração seletiva são seguidas. No cenário representado pelo *gamma* 0.93, observa-se uma maior ocorrência da classe de Média intensidade de degradação, tanto nas áreas do DETER quanto dos PMFs. No cenário que corresponde ao *gamma* 0.96, indica que grande parte das áreas em PMFs estão sob forte intensidade de degradação, onde as classes Baixa/Média e Média intensidade ocorreram em maior quantidade, indicando que as normas não estão sendo seguidas.

Palavras-chave: Degradação. Inferência fuzzy. Operador gamma.

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| Figura 1 – Localização da área de estudo. | 9 |
| Figura 2 – Etapas do trabalho em representação OMT-G. | 12 |
| Figura 3 – Grade celular preenchida com as proporções de área como parâmetro de entrada e os gradientes de saída em intervalos [0,1]. | 14 |
| Figura 4 – Atribuição dos valores de pertinência obtidos a partir da função sigmóide e aplicados para as diferentes faixas de distância. | 14 |
| Figura 5 – Atribuição dos valores de pertinência obtidos a partir da função sigmóide e aplicados para as diferentes classes de cobertura. | 15 |
| Figura 6 – Grades numéricas: (A) distância classe solo exposto; (B) proporção de floresta por célula; (C) proporção de solo exposto por célula; (D) distância da borda da máscara PRODES e (E) pertinência por classe. | 16 |
| Figura 7 – Cenário de intensidade de degradação com diferentes valores <i>gamma</i> , variando de 0 a 1. | 19 |
| Figura 8 – Mapa de referência. | 21 |
| Figura 9 – Distribuição das classes de intensidade de degradação ocorridas no DETER e PMFs obtidas pelos <i>gammas</i> 0.91, 0.93 e 0.96. | 21 |

LISTA DE TABELAS

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| Tabela 1. Conjunto de dados utilizados. | 10 |
| Tabela 2 – Fatores associados a intensidade de degradação e seus indicadores na construção das variáveis e funções aplicadas na atribuição de pesos para cada mapa..... | 12 |
| Tabela 3 – Classes consideradas no fatiamento dos mapas obtidos pelo operador <i>fuzzy gamma</i> | 18 |
| Tabela 4 – Distribuição das classes de intensidade de degradação para os <i>gammas</i> entre 0.91 e 0.96 comparadas aos valores do mapa de média. | 20 |

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 7 |
| 2 MATERIAL E MÉTODOS | 9 |
| 2.1 Área de estudo | 9 |
| 2.2 Base de dados utilizadas | 9 |
| 2.3 Tratamento dos dados | 11 |
| 2.4 Logica <i>fuzzy</i> e indicadores de intensidade de degradação..... | 11 |
| 2.5 Procedimento metodológico | 12 |
| 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 19 |
| 3.1 Mapas de intensidade da degradação a partir da operação <i>fuzzy gamma</i> | 19 |
| 3.2 Avaliação de cenários a partir de dados de Planos de Manejo Florestal e dados do DETER | 21 |
| 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 24 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 26 |

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, grande parte da cobertura florestal da Amazônia vem sendo modificada por desmatamento e processos de degradação florestal (Matricardi et al., 2020). A degradação florestal é uma forma crescente e gradual de perturbação florestal a longo prazo (Matricardi, 2020; Inpe, 2019; Pinheiro et al., 2016) que envolve eventos de extração seletiva e fogo florestal, podendo ocorrer tanto em áreas de planos de manejo quanto fora dessas áreas.

Em áreas de Planos de Manejo Florestal - PMFs, as feições relativas ao corte seletivo, tais como pátios e trilhas não são computadas nas estimativas de emissão de carbono para fins de REDD+, pois considera-se que a perda de biomassa no momento da exploração é compensada ao longo do ciclo de corte, que é em média de 28 anos, pelos processos de regeneração.

Em áreas fora de PMFs, os processos que ocasionam a degradação ocorrem em sua maioria de forma desordenada e ilegal, apresentando grandes modificações da paisagem, permitindo a suscetibilidade a outros processos de degradação, tais como o fogo florestal (Asner et al 2009).

O fogo florestal, tanto natural quanto induzido por atividades humanas, também é uma das principais causas da degradação florestal (Nepstad et al 1999). A suscetibilidade a incêndios florestais geralmente aumenta substancialmente após atividades madeireiras desordenadas que criam aberturas de dossel, tornando o microclima mais seco e aumentando a quantidade de material seco, propício a combustão (Cochrane 2003, Asner et al 2006).

As aberturas de dossel geradas pelos diversos processos de degradação, principalmente quando intensificadas e de grandes extensões, produzem efeito de borda que influenciam na dinâmica e na composição biológica das florestas. Os fenômenos de borda são notavelmente diversos, e incluem o aumento do estresse de dessecação que elevam acentuadamente as taxas de mortalidade e danos às árvores (Laurance et al., 1998). A distância em que diferentes efeitos de borda atravessam os fragmentos podem ser observados em pelo menos 400 m de distância conforme há aumento da perturbação florestal, (Laurance et al., 2018).

Para compreender como a intensidade de degradação ocorre tanto em áreas de menor degradação (áreas manejadas) quanto em áreas fora de manejo, é importante compreender como os fatores associados a esse processo podem ser utilizados na construção de diferentes cenários com a atribuição de indicadores para os diferentes contextos de degradação.

Esses indicadores quando integrados a ferramentas de geoprocessamento fornecem variadas possibilidades de análises espaciais a partir da extração de informações pertinentes ao utilizar técnicas, tais como a inferência geográfica (Moreira et al., 2001), em que é possível criar diferentes cenários ao atribuir pesos a cada indicador do processo.

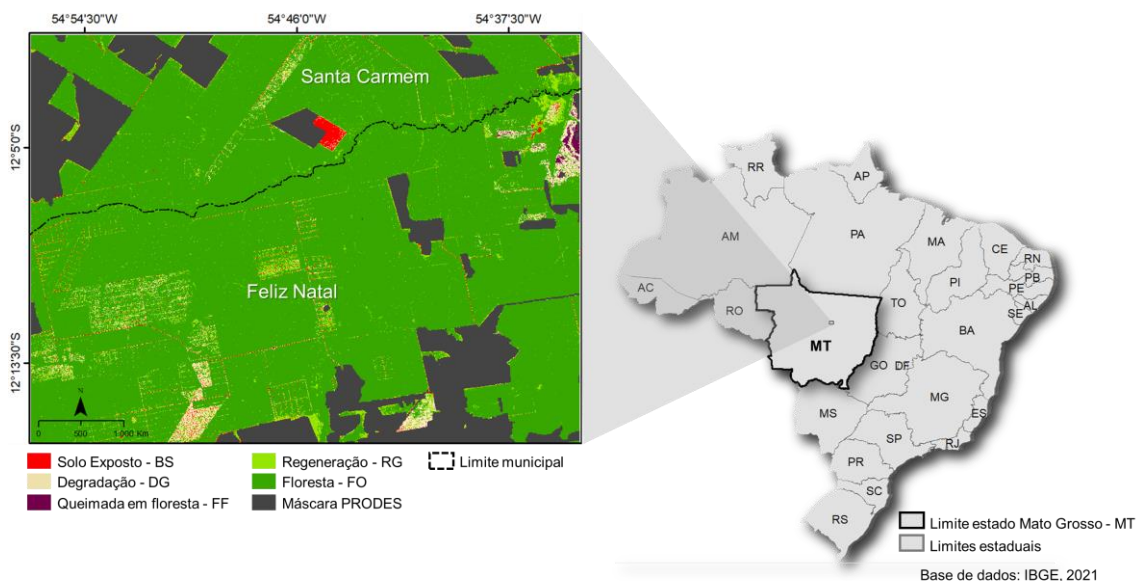
Baseado nessas informações, esse trabalho tem como objetivo, identificar áreas com diferentes níveis de intensidade de degradação florestal com uso de técnicas de inferência geográfica (*Fuzzy*). A partir da identificação dessas áreas, busca-se avaliar os diferentes cenários utilizando dados de Planos de Manejo Florestal - PMFs e dados do sistema de Detecção em Tempo Real - DETER.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada entre os municípios Santa Carmem e Feliz Natal no Estado do Mato Grosso – MT, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora.

A área é caracterizada pela ocorrência de diferentes processos de degradação, relacionadas principalmente ao corte seletivo de madeira.

2.2 Base de dados utilizadas

Para compor os mapas indicadores da intensidade de degradação, foram utilizados os dados do Projeto de Monitoramento do Desflorestamento da Amazônia – PRODES, referente ao desmatamento mapeados até 2017 e um mapa da perda florestal em áreas de extração seletiva de madeira, obtidos a partir da classificação de uma imagem Sentinel-2 referente ao ano de 2017.

Foram utilizados dados do Sistema de Detecção em Tempo Real – DETER, detectados no ano de 2017 e dados de Planos de Manejo Florestal – PMFs do Estado de Mato Grosso também referentes ao ano de 2017. Os PMFs foram obtidos por meio da Secretaria de Meio Ambiente do Estado de Mato Grosso –

SEMA/MT e os dados do DETER e PRODES foram obtidos por meio da Plataforma de dados geográficos TerraBrasilis (INPE, 2020).

O conjunto e a fonte de dados utilizados estão descritos na Tabela 1, e suas finalidades serão detalhadas a seguir.

Tabela 1. Conjunto de dados utilizados.

| Base de dados | Ano | Fonte de dados |
|---|------------|--|
| Classificação de áreas de corte seletivo | 2017 | Oliveira, (2021) |
| Dados de Desmatamento | 2017 | PRODES - INPE http://terrabilis.dpi.inpe.br/downloads/ |
| Alertas de desmatamento e degradação florestal | 2017 | DETER - INPE http://terrabilis.dpi.inpe.br/downloads/ |
| Planos de Manejo Florestal do Estado de Mato Grosso | 2017 | SEMA – MT |

Fonte: Elaborado pela autora.

Classificação: A classificação utilizada foi gerada a partir de uma imagem Sentinel-2, com resolução espacial de 10m, referente a data de 14 de outubro de 2017 e obtida a partir de um estudo anterior desenvolvido por Oliveira (2021), em que foi verificado o seu potencial uso para o mapeamento da perda florestal por corte seletivo utilizando o algoritmo Random Forest – RF. Esse estudo consistiu no mapeamento de 5 classes de cobertura: Solo Exposto (BS), Degradação (DG), Queimada em áreas de floresta (FF), Floresta (FO) e Regeneração (RG).

Dentre as classes que compõe o mapa classificado, a classe floresta e a classe solo exposto foram utilizadas como principais variáveis para indicar a baixa ou a alta intensidade de degradação nesse estudo.

Dados de desmatamento: A máscara de desmatamento do PRODES foi utilizada para indicar o efeito de borda a partir de faixas de distância.

Os dados do DETER e os PMFs foram utilizados para avaliar os cenários escolhidos para representar os diferentes níveis de intensidade da degradação florestal.

Alertas de desmatamento: O DETER detecta diferentes classes de cobertura que estão associados aos processos degradação. As classes detectadas são: queimada, degradação, corte seletivo geométrico, corte seletivo desordenado e

mineração. Para este trabalho foram consideradas as classes degradação, queimada e as duas classes de corte seletivo.

Planos de Manejo Florestal: Os dados dos Planos de Manejo Florestal – PMFs correspondem a áreas mapeadas de PMFs aprovados para exploração no estado de Mato Grosso – MT, em que foram selecionadas as áreas correspondentes ao ano de 2017.

2.3 Tratamento dos dados

Essa foi uma etapa preliminar que consistiu na preparação dos dados de entrada. O primeiro passo foi realizar o recorte da classificação utilizada, com a finalidade de otimização na fase de processamento dos dados. Para o recorte foi atribuído um tamanho de 3000 x 4000 pixels. Esse processo foi realizado nos demais dados que posteriormente foram organizados e importados em um banco de dados implementado no sistema spring, versão 5.5.6.

2.4 Logica *fuzzy* e indicadores de intensidade de degradação

Para realização deste trabalho foi utilizada a lógica *fuzzy*, e para compor os diferentes mapas associados aos fatores de intensidade de degradação, utilizou-se o operador espacial *gamma*. A lógica *fuzzy* trabalha com valores em uma mesma escala adimensional a partir de um gradiente, que permite a combinação de camadas com diferentes dados e diferentes unidades de medida, e devido a isso, é possível fazer uso de dados com valores contínuos.

Para a utilização da lógica *fuzzy*, foram definidos principais indicadores que podem explicar a ocorrência da intensidade de degradação, em função do grau de pertinência. A função de pertinência indica a correspondência entre o fenômeno estudado e os indicadores do fenômeno, refletindo a importância relativa de cada mapa, atribuindo valores em um intervalo de 0 a 1 (Bonham-Carter, 1994).

Os valores atribuídos à função de pertinência, consiste na atribuição de pesos aos indicadores do fenômeno. Trata-se de processo empírico e que depende da expertise do tomador de decisão (Bonham-Carter, 1994). Para situação em que há correspondência, o valor será 1 e, quando não há correspondência, o valor será próximo de 0.

Com base nos fatores associados a intensidade de degradação definidos para este trabalho, os valores de função de pertinência foram atribuídos conforme apresentado na Tabela 2 e serão descritos na seção seguinte.

Tabela 2 – Fatores associados a intensidade de degradação e seus indicadores na construção das variáveis e funções aplicadas na atribuição de pesos para cada mapa.

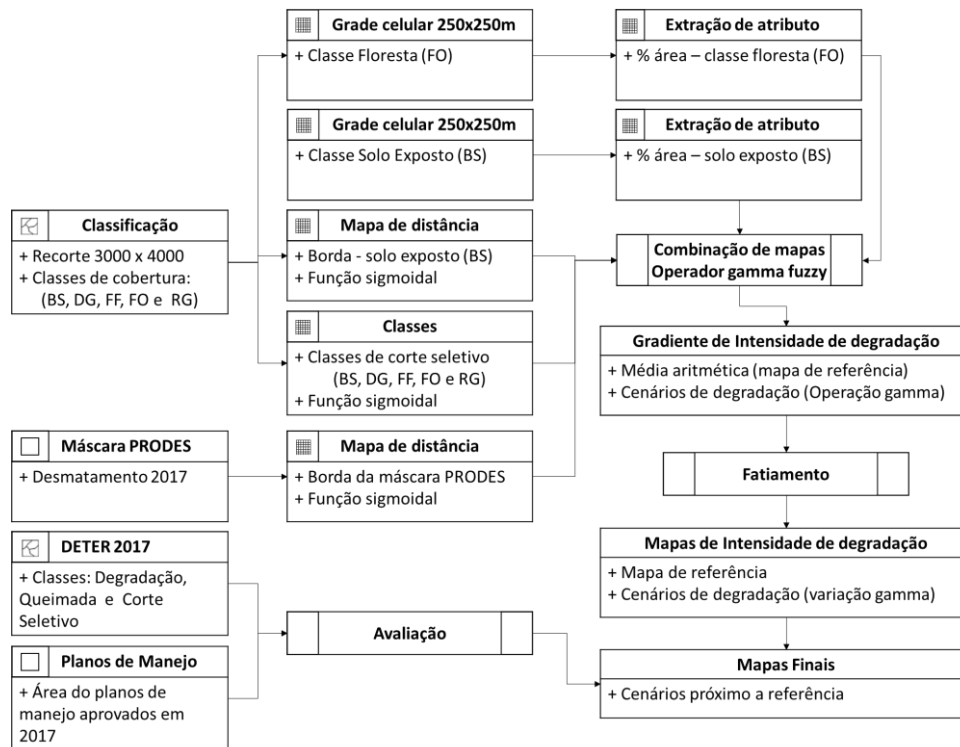
| Fatores associados a intensidade de degradação | Indicador | Variável | Função | Valores nas grades |
|---|--|--|---------------|---------------------------|
| 1. Corte seletivo | Solo Exposto em área florestal | Fração da área de Solo Exposto | Linear | [0.001, 1] |
| 2. Áreas não perturbadas | Floresta | 1- fração de área de Floresta | Linear | [0.001, 1] |
| 3. Corte seletivo, queimada e regeneração | Classes de Cobertura da terra em área florestal | Pesos das classes de cobertura da terra | Sigmóide | [0.001, 1] |
| 4. Efeito de borda | Distância de borda - solo exposto em área florestal | Distância da borda – classe solo exposto | Sigmóide | [0.001, 1] |
| | Distância de borda - áreas desmatadas (máscara PRODES) | Distância da borda – máscara de corte raso | Sigmóide | [0.001, 1] |

Fonte: Elaborado pela autora.

2.5 Procedimento metodológico

As etapas dessa fase do trabalho estão simplificadas e apresentadas na Figura 2, conforme os submodelos definidos a partir do OMT-G (*Object Modelling Technique – Geographic*). Cada processo será explicado a seguir.

Figura 2 – Etapas do trabalho em representação OMT-G.

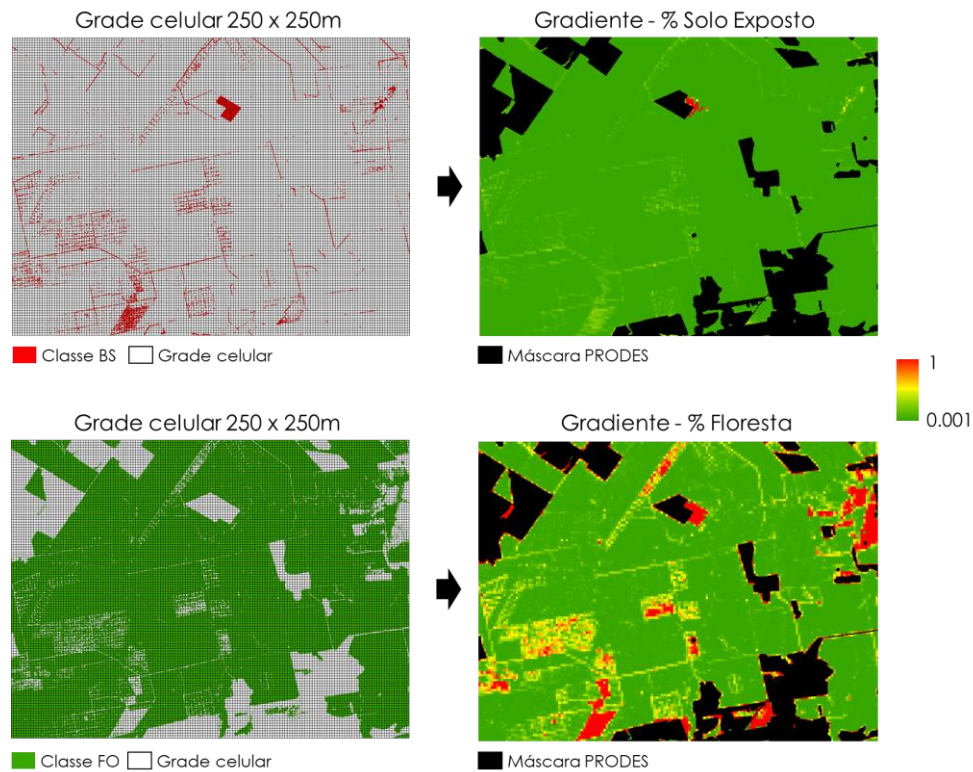


Fonte: Elaborado pela autora.

Grade celular: A partir dos dados tratados, o primeiro passo foi obter a grade celular para a extração de atributos das classes Solo Exposto e Floresta. A grade celular foi criada no sistema Terraview, versão 5.61, com tamanho de 250m x 250m e foram preenchidas a partir da extração de atributos utilizando o *plugin* GeoDMA. Dentre as métricas geradas pelo GeoDMA, foi selecionada a métrica que corresponde a porcentagem de área que cada classe ocorre dentro de uma célula. As proporções foram ajustadas para valores de intervalos [0, 1] dividindo o valor por 100. Para a classe floresta, esse valor foi ajustado na tabela de atributos subtraindo o resultado por 1 e a diferença foi multiplicada por -1 para não ocorrer valores negativos. Esse processo foi necessário para que não fossem atribuídos valores de maior pertinência às células com máxima proporção de área dessa classe. Para os valores da proporção de área de floresta que correspondiam ao preenchimento total da célula e que nesse ajuste passaram a ser zero, foi atribuído o valor 0.001. Ao final foi gerada uma grade numérica para cada dado e convertida em formato raster com resolução de 10m

e materializada no banco de dados do spring. Na Figura 3 é ilustrada as camadas de entrada para obtenção do gradiente de valores nos intervalos [0,1].

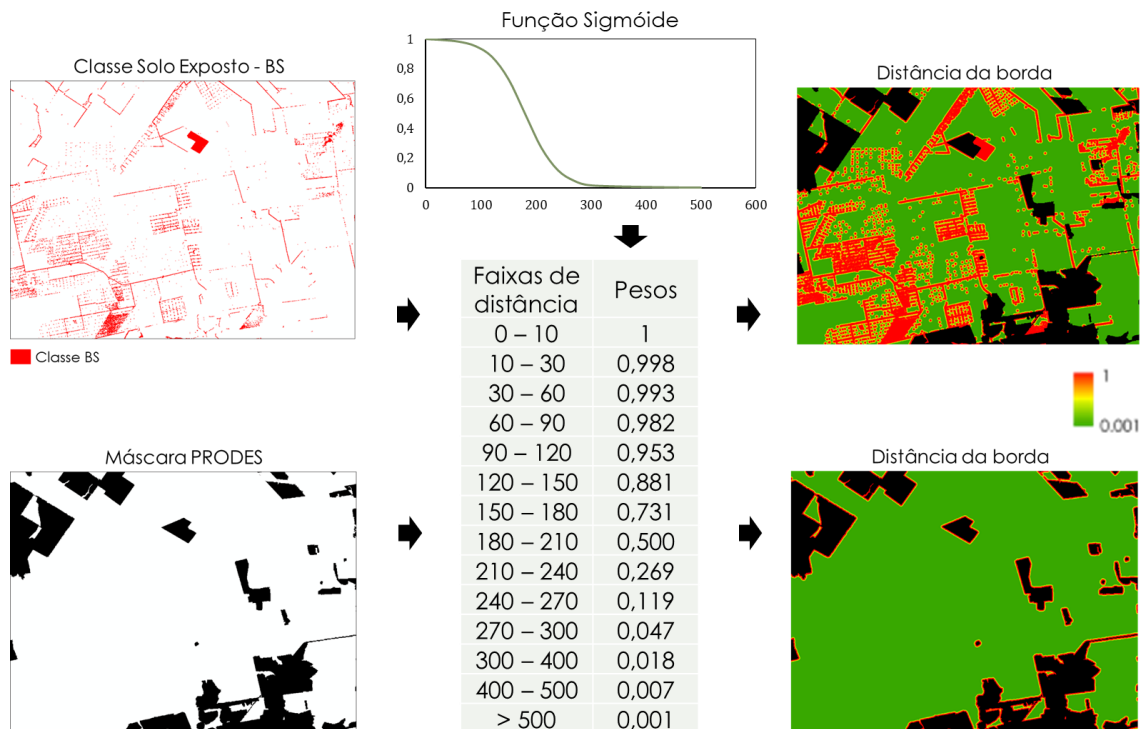
Figura 3 – Grade celular preenchida com as proporções de área como parâmetro de entrada e os gradientes de saída em intervalos [0,1].



Fonte: Elaborado pela autora.

Mapas de distância: Os mapas de distância foram construídos no sistema spring, utilizando análise LEGAL. Para as classes temáticas máscara PRODES e classe solo exposto foram criadas faixas de distância e atribuídos valores de pertinência. Para atribuição de valores entre [0, 1] foi utilizada a função sigmóide e assim a faixa mais próximas à borda da máscara e da classe solo exposto receberam valor de pertinência 1. Esse valor foi reduzindo conforme as distâncias foram aumentando, acima de 500 m foi atribuído o menor peso, ou seja, 0.001. Na Figura 4 é ilustrado o processo de atribuição dos valores de pertinência para as faixas de distância da borda da classe solo exposto, tendo como saída uma grade numérica para cada dado com resolução de 10 m.

Figura 4 – Atribuição dos valores de pertinência obtidos a partir da função sigmóide e aplicados para as diferentes faixas de distância.

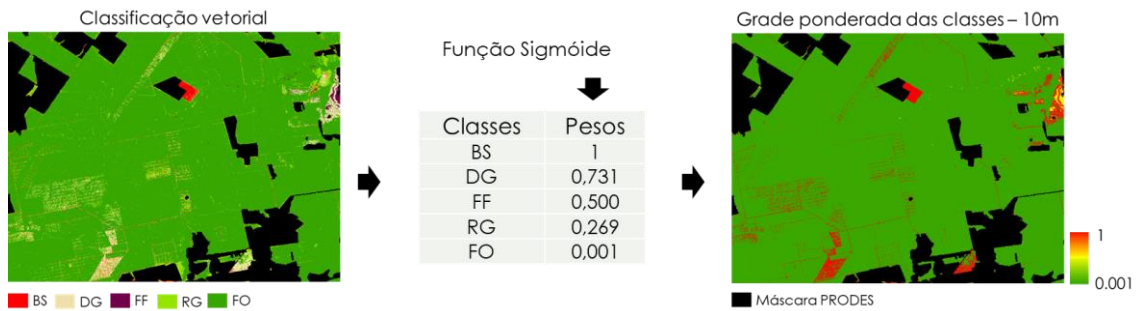


Fonte: Elaborado pela autora.

A distância até 500 m foi atribuída tendo como referência o estudo realizado por Laurance et al (2018) em que os fenômenos relacionados aos efeitos de borda são penetrados por mais de 400 m de distância.

Classes de cobertura: O passo seguinte foi construir a grade ponderada para as classes de cobertura da classificação utilizada, esse processo também foi realizado a partir da análise em LEGAL. As classes intermediárias receberam valor de pertinência obtido por meio da função sigmóide. Na Figura 5 é ilustrado o processo de atribuição dos valores de pertinência para cada classe de cobertura, tendo como saída uma grade numérica com resolução de 10 m.

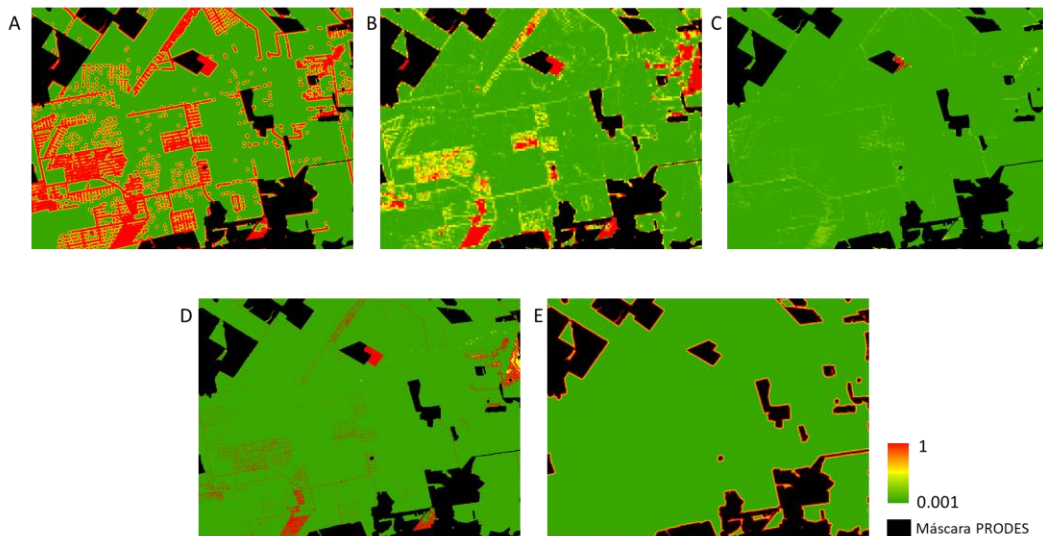
Figura 5 – Atribuição dos valores de pertinência obtidos a partir da função sigmóide e aplicados para as diferentes classes de cobertura.



Fonte: Elaborado pela autora.

Ao final, foram geradas 5 grades numéricas com valores de pertinência atribuído em cada pixel e estão representados na Figura 6. Essas grades foram combinadas utilizando o operador espacial *gamma* para gerar os mapas com diferentes cenários de intensidade da degradação florestal para a área de estudo.

Figura 6 – Grades numéricas: (A) distância classe solo exposto; (B) proporção de floresta por célula; (C) proporção de solo exposto por célula; (D) distância da borda da máscara PRODES e (E) pertinência por classe.



Fonte: Elaborado pela autora.

Combinação das camadas com operador espacial *gamma*: A combinação das camadas foi realizada a partir do operador *gamma*. A equação desse operador, se apoia no produto algébrico *fuzzy* e na soma algébrica *fuzzy*, que são operadores complementares entre si. O uso do operador *gamma* permite a manipulação de diferentes valores e é capaz de flexibilizar a “tendência de

maximização da soma algébrica *fuzzy* e de minimização do produto algébrico *fuzzy*” (Escada, 1998).

$$\mu_{combinação} = \prod_{i=1}^n \mu_i \quad (1)$$

A soma algébrica *fuzzy* terá como resultado valores iguais ou maiores ao maior valor de pertinência. Ao combinar evidências que favorecem a hipótese, elas irão se reforçar, fazendo com que a combinação das evidências seja mais forte do que cada evidência individualizada (Bonham-Carter, 1994). Seu cálculo se dá pela multiplicação da diferença entre cada camada e o valor 1. Esse resultado vai se reduzindo também em virtude da multiplicação de valores menores que 1. Ao final, o resultado da multiplicação é subtraído de 1 (Equação 2).

$$\mu_{combinação} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \quad (2)$$

O operador espacial *gamma* é mais flexível e permite o teste de valores mais e menos rígidos, que devem ser decididos de acordo com a finalidade de cada trabalho (Bonham-Carter, 1994). Quando o operador *gamma* é igual a 0, o resultado da operação será equivalente ao produto algébrico *fuzzy*. Quando o valor *gamma* é igual a 1, o resultado será equivalente à soma algébrica *fuzzy* (Equação 3).

$$\mu_{combinação} = (soma\ algébrica\ fuzzy)^\gamma * (produto\ algébrico\ fuzzy)^{1-\gamma} \quad (3)$$

Onde:

$\mu_{combinação}$ = valor de pertinência fuzzy para o i-ésimo mapa

γ = operador *gamma*







Para este trabalho, o intervalo das camadas foi [0.001, 1], não considerando o valor 0 para não ocorrer zeros quando aplicada a multiplicação de todas as camadas.

A partir disso, o operador *gamma* teve seu valor manipulado para a composição de diferentes cenários com valores mais e menos rígidos, distribuídos ao longo do intervalo. Para escolher quais cenários retornaram melhores resultados, foi realizada uma operação de média aritmética entre as camadas de entrada e foi

gerado um produto para servir como referência na escolha dos mapas gerados pelo *fuzzy gamma*.

Fatiamento: O fatiamento dos mapas, foi realizado considerando as classes descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Classes consideradas no fatiamento dos mapas obtidos pelo operador *fuzzy gamma*.

| Valores de Fatiamento | Classes | Legenda |
|-----------------------|----------------------------------|---|
| 0,80 – 1,0 | Alta degradação |  |
| 0,60 – 0,80 | Média/Alta degradação |  |
| 0,40 – 0,60 | Média degradação |  |
| 0,20 – 0,40 | Baixa/Média degradação |  |
| 0,10 – 0,20 | Baixa degradação |  |
| 0,0 – 0,10 | Nenhuma ou baixíssima degradação |  |

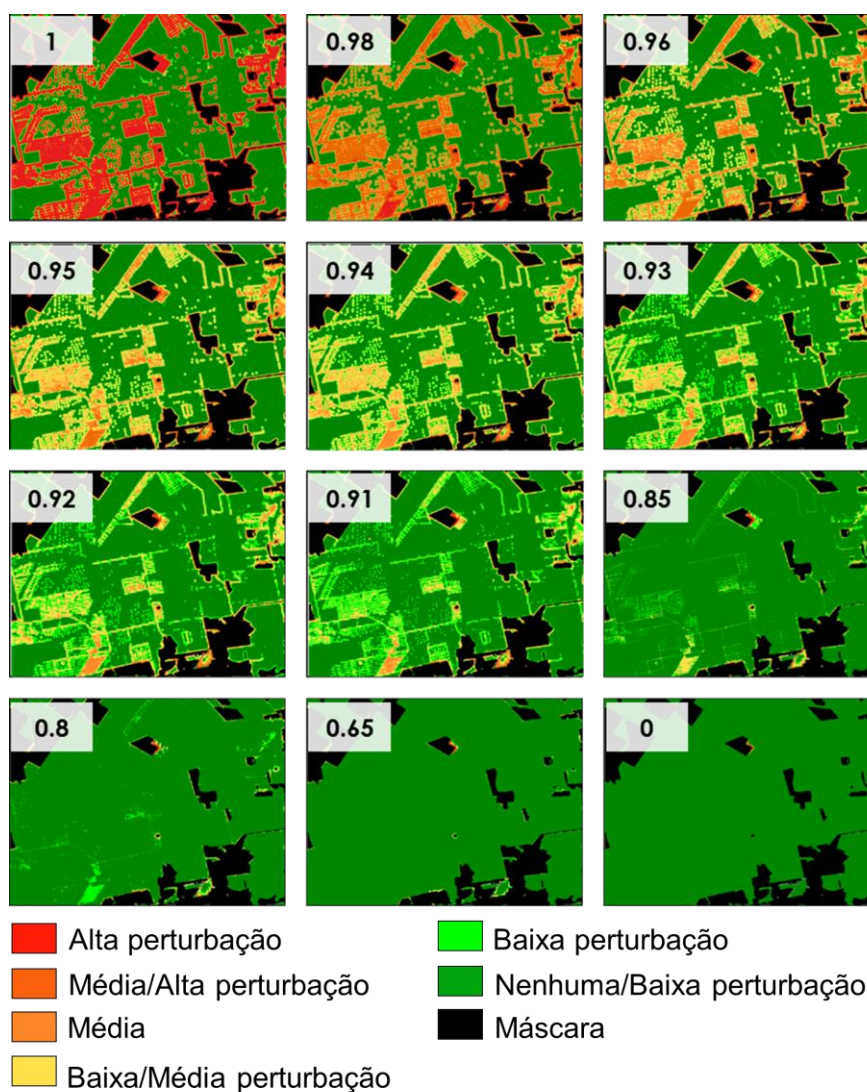
Avaliação: Os dados do DETER e PMFs são utilizados nessa fase para avaliar os diferentes cenários obtidos a partir da operação *fuzzy* e combinação dos mapas com valores de pertinência. A finalidade nessa fase é observar como se comportam os diferentes cenários, baseado nas áreas localizadas em PMFs e das áreas detectadas pelo DETER.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Mapas de intensidade da degradação a partir da operação *fuzzy gamma*

Após o fatiamento, os mapas foram gerados a partir de uma seleção empírica dos valores de *gamma* com a finalidade de representar diferentes cenários de intensidade de degradação florestal, ilustrando seus cenários de uma extremidade a outra, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Cenário de intensidade de degradação com diferentes valores *gamma*, variando de 0 a 1.



Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com os resultados obtidos, observa-se diferentes níveis de intensidade conforme há variação do *gamma*, onde os cenários com os valores extremos representam máxima e a mínima intensidade de degradação que ocorre na área. Cenários em que os valores de *gamma* são mais próximos de 1, indicam cenários mais pessimistas quando analisada a intensidade de degradação na área, e cenários próximos de zero tendem a cenários muito distante da realidade, pois apresentam praticamente nenhum tipo de degradação, o que não é condizente. Na Tabela 6 são apresentadas as distribuições de área de acordo com os diferentes cenários de intensidade da degradação, a partir da variação *gamma*. Para essa representação foram selecionados os *gammas* com os intervalos entre 0.91 e 0.96, utilizando como parâmetro de escolha o mapa de referência obtido a partir da média aritmética, ilustrado na Figura 8.

Tabela 4 – Distribuição das classes de intensidade de degradação para os *gammas* entre 0.91 e 0.96 comparadas aos valores do mapa de média.

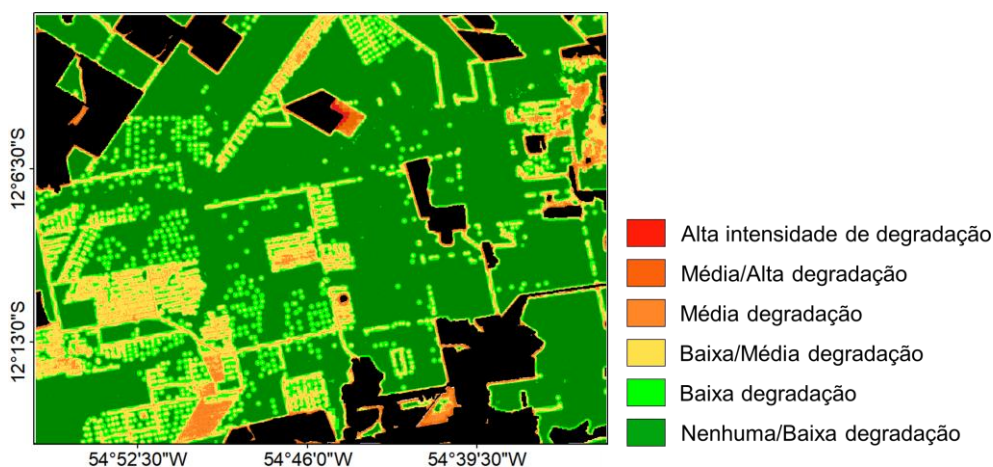
| Classes | Média | G 0.91 | G 0.92 | G 0.93 | G 0.94 | G 0.95 | G 0.96 |
|--------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Alta degradação | 0,11% | 0,09% | 0,11% | 0,15% | 0,24% | 0,42% | 0,77% |
| Alta/Média degradação | 0,85% | 0,70% | 0,82% | 0,91% | 1,01% | 1,77% | 4,45% |
| Média degradação | 4,42% | 1,37% | 2,67% | 4,54% | 6,18% | 8,62% | 14,72% |
| Baixa/Média degradação | 17,50% | 8,02% | 12,00% | 15,72% | 19,78% | 21,11% | 14,37% |
| Baixa degradação | 14,25% | 16,55% | 15,35% | 12,94% | 8,84% | 5,85% | 4,87% |
| Nenhuma/Baixa degradação | 62,87% | 73,27% | 69,04% | 65,74% | 63,96% | 62,24% | 60,84% |

Fonte: Elaborado pela autora.

Diante desse resultado, é possível observar que as taxas com a variação dos *gammas* de 0.91 a 0.96, a intensidade de alta degradação varia de 0,09% a 0,77%, apresentando valores de 0,15% e 0,24% nos valores de *gamma* intermediários, 0.93 e 0.94, respectivamente. Essa foi a classes que apresentou menores proporções de área, seguida da classe Alta/Média degradação, que variou de 0,70% a 4,44%. Na classe de média intensidade de degradação os valores variaram de 1.37% a 14,72%, na classe Baixa/Média degradação a

variação foi de 8,02% a 14,37%. Essa última, observa-se que representa maiores áreas em alguns cenários quando comparadas com as intensidades baixa e baixa/média. A classe Nenhuma/Baixa degradação é a classe que representa maior proporção de área em todos os cenários, variando de 73,27% em um cenário mais otimista e 60,84% em um cenário mais pessimista. Dentre os cenários apresentados, os *gammas* que representam proporções mais próximas da média (Figura 8) são os *gammas* 0.92 e 0.93, sendo o *gamma* 0.93 a apresentar uma distribuição das classes muito mais próximas da média em comparação ao *gamma* 0.92.

Figura 8 – Mapa de referência.

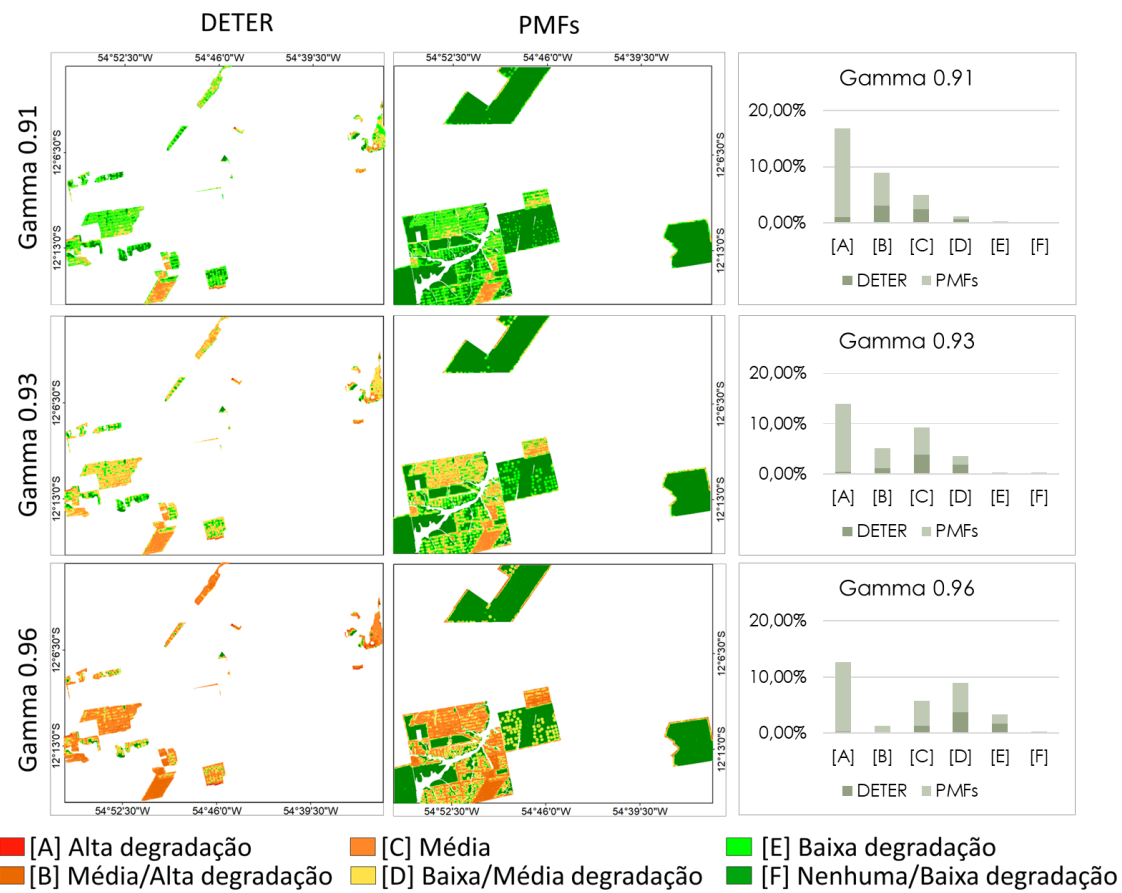


Fonte: Elaborado pela autora.

3.2 Avaliação de cenários a partir de dados de Planos de Manejo Florestal e dados do DETER

Com base nas informações apresentadas na seção anterior, os *gammas* 0.91, 0.93 e 0.96 foram os cenários selecionados para serem avaliados a partir dos dados dos Planos de Manejo Florestal - PMFs e dados do sistema DETER. Essa escolha foi empírica, considerando apenas uma análise visual das classes, onde um cenário a intensidade de degradação é mais extrema ao cenário menos extremo e um cenário intermediário, nesse caso, próximo ao mapa de referência. Os cenários escolhidos estão ilustrados na Figura 9, onde são apresentadas áreas tanto do DETER quanto dos PMFs.

Figura 9 – Distribuição das classes de intensidade de degradação ocorridas no DETER e PMFs obtidas pelos *gammas* 0.91, 0.93 e 0.96.



Fonte: Elaborado pela autora.

Dentre os cenários escolhidos o cenário de *gamma* 0.91 representa o que poderia ser esperado para uma área que está sob manejo florestal, supondo que as normas para extração seletiva são seguidas. Nesse cenário, considerando os PMFs, a classe de maior ocorrência foi a classe Nenhuma/Baixa degradação, seguida das classes Baixa e Baixa/Média intensidade. No DETER, as áreas que ocorrem em maior proporção nesse cenário, são as classes Baixa e Média intensidade de degradação.

No cenário representado pelo *gamma* 0.93, observa-se uma maior ocorrência da classe de Média intensidade de degradação, tanto nas áreas do DETER quanto dos PMFs e para os PMFs a classe de maior ocorrência ainda é a de Nenhuma/Baixa intensidade de degradação,

No cenário de maior intensidade da degradação, que corresponde ao *gamma* 0.96, indica que grande parte das áreas em PMFs estão sob forte intensidade de degradação onde as classes Baixa/Média e Média intensidade são mais

evidentes indicando intensos processos de degradação, o que não é esperado em áreas sob manejo florestal, isso pode ser também um indicativo de que as normas podem não estar sendo seguidas o que pode impactar diretamente nas taxas de emissão de CO₂.

Em aspectos gerais, observa-se que nos 3 cenários, na região localizada na parte inferior dos mapas, ocorre um processo de Média intensidade de degradação observados tanto no DETER quanto nos PMFs. Possivelmente essa área é um forte indicativo de que pode estar em processo de conversão para corte raso.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A abordagem utilizando a inferência *fuzzy* e operador *gamma* mostrou-se promissora na identificação de áreas com diferentes níveis de intensidade de degradação florestal.

Um das principais vantagens dessa técnica é poder gerar diferentes cenários que permitem a exploração dos dados.

Dentre os resultados obtidos e avaliados, o cenário a partir do *gamma* 0.91 é o que obteve resultados mais otimistas e o cenário de 0.96 ocorre no outro extremo, onde a variação da alta intensidade de degradação foi de 0,09% a 0,77%. Na classe de média intensidade de degradação os valores variaram de 1.37% a 14,72%. Na classe Baixa/Média degradação a variação foi de 8,02% a 14,37%. A classe Nenhuma/Baixa degradação é a classe que representa maior proporção de área em todos os cenários, variando de 73,27% em um cenário mais otimista e 60,84% em um cenário mais pessimista.

Dentre os cenários para compor a avaliação final utilizando os dados de PMFs e do DETER, o cenário de *gamma* 0.91 representa o que poderia ser esperado para uma área que está sob manejo florestal, supondo que as normas para extração seletiva são seguidas.

Por outro lado, o cenário de maior intensidade da degradação, que corresponde ao *gamma* 0.96, indica que grande parte das áreas em PMFs estão sob forte intensidade de degradação onde as classes Baixa/Média e Média intensidade são mais evidentes indicando intensos processos de degradação, o que pode ser um indicativo de que as normas não foram seguidas e pode impactar diretamente nas taxas de emissão de CO₂.

Em relação à média obtida para o mapa de referência, embora seja um parâmetro útil na comparação com os cenários obtidos, não necessariamente representa a realidade, nesse caso, referências de campo são recomendadas para de fato escolher os melhores cenários que poderiam ser trabalhados.

Além disso, sugere-se para trabalhos futuros a utilização de outras métricas da paisagem para compor os indicadores, assim como também, decompor as outras

classes de cobertura, tais como queimada e regeneração para serem atribuídos pesos individualmente, o que não foi feito neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASNER, G. P. et al. Condition and fate of logged forests in the Brazilian Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 103, n. 34, p. 12947-12950, 2006.
- ASNER, G. P., KELLER, M., LENTINI, M., MERRY, F., & SOUZA JR, C. Selective logging and its relation to deforestation. **Amazonia and global change**, v. 186, p. 25-42, 2009.
- BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. Elsevier, 1994.
- COCHRANE, M. A. Fire science for rainforests. **Nature**, v. 421, n. 6926, p. 913-919, 2003.
- ESCADA, M.I.S. Aplicação de técnica Fuzzy em SIG como alternativa para o zoneamento ecológico econômico (ZEE). **São José dos Campos**, 1998. Disponível em: <www.dpi.inpe.br/cursos/ser301/trabalhos/isabel_zeefuzzy.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2022.
- INPE. Coordenação Geral de Observação da Terra. Programa de Monitoramento da Amazônia e Demais Biomas. Desmatamento – Amazônia Legal – Disponível em: <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/downloads/>. Acesso em: 4 abr. 2020.
- INPE. Metodologia Utilizada nos Projetos PRODES e DETER (p. 33). Disponível em: http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes/pdfs/Metodologia_Prodes_Deter_revisada.pdf. Acesso em: 12 abr. 2019.
- LAURANCE, W. F., CAMARGO, J. L., FEARNSIDE, P. M., LOVEJOY, T. E., WILLIAMSON, G. B., MESQUITA, R. C. G., MEYER, C. F. J., BOBROWIEC, P. E. D., LAURANCE, S. G. W. An Amazonian rainforest and its fragments as a laboratory of global change. **Biological reviews**, v. 93, n. 1, p. 223-247, 2018.
- LAURANCE, W. F., FERREIRA, L. V., RANKIN-DE MERONA, J. M., LAURANCE, S. G., HUTCHINGS, R. W., & LOVEJOY, T. E. Effects of forest fragmentation on recruitment patterns in Amazonian tree communities. **Conservation biology**, v. 12, n. 2, p. 460-464, 1998.
- MATRICARDI, E. A. T., SKOLE, D. L., COSTA, O. B., PEDLOWSKI, M. A., SAMEK, J. H., & MIGUEL, E. P. Long-term forest degradation surpasses deforestation in the Brazilian Amazon. **Science**, v. 369, n. 6509, p. 1378-1382, 2020.
- MOREIRA, F., BARSOSA, C., CÂMARA, G., & ALMEIDA-FILHO, R. Inferência geográfica e suporte à decisão. **Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos: livro online, sd Capítulo**, v. 9, 2001.
- NEPSTAD, D. C., VERSSIMO, A., ALENCAR, A., NOBRE, C., LIMA, E., LEFEBVRE, P., SCHLESINGER, P., POTTER, C., MOUTINHO, P., MENDOZA, E., COCHRANE, M., BROOKS V. Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. **Nature**, v. 398, n. 6727, p. 505-508, 1999.

OLIVEIRA, M. F. O. Mapeamento e quantificação de áreas de perda florestal por corte seletivo na Amazônia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Programa de Capacitação Institucional – PCI, 2021.

PINHEIRO, T. F., ESCADA, M. I. S., VALERIANO, D., HOSTERT, P., GOLLNOW, F., & MÜLLER, H. Forest degradation associated with logging frontier expansion in the Amazon: the BR-163 region in Southwestern Pará, Brazil. **Earth Interactions**, v. 20, n. 17, p. 1-26, 2016.