

Simulação de desmatamento com base na influência do aumento e redução de áreas protegidas com estimativa de emissão de CO²

Deforestation simulation based on the influence of the increase and reduction of protected areas with estimated CO₂ emissions

Simulación de deforestación basada en la influencia del aumento y reducción de áreas protegidas con emisiones de CO₂ estimadas



Warlen Librelon de Oliveira

Universidade Federal de Minas Gerais- Minas Gerais – Brasil
[_pesquisa@warlenlibrelon.com.br](mailto:pesquisa@warlenlibrelon.com.br)



Marcelo Antonio Nero

Universidade Federal de Minas Gerais- Minas Gerais – Brasil
[_marcelo.nero@gmail.com](mailto:marcelo.nero@gmail.com)

Resumo O desmatamento de florestas no Brasil é um processo conhecido de muitos anos. Recentemente com um destaque para a Amazônia, uma vez que os outros biomas como a Mata Atlântica já perdeu a grande maioria de sua área. Esse trabalho modelou o uso da terra no município de Itupiranga-PA, a partir de mapas observados entre 1985 e 2018 e simulado até 2030 para um cenário tendencial e dois cenários alternativos, sendo um otimista e outro pessimista sob a influência de áreas de proteção ambiental. A modelagem foi desenvolvida com o uso do software tipo open-source Dinâmica EGO, o qual utiliza modelos estocásticos de Cadeias de Markov, autômatos celulares e pesos de evidência que são calculados para cada variável preditiva aplicada à modelagem. O modelo prevê um aumento em 24% de área desmatada na simulação tendencial. Para os cenários alternativos, o modelo simulou uma redução de desmatamento em 8%, 18% e 71% para um aumento de 9%, 18% e 46% respectivamente da área de proteção ambiental. E com reduções de 9%, 17% e 45% da área de proteção, o modelo simulou um aumento de 7%, 14% e 34% respectivamente no desmatamento. Foi observado a relação de emissão de CO₂ com as áreas desmatadas,

confirmando a importância na preservação no combate ao efeito estufa e aquecimento do clima.

Palavras-chave: Desmatamento. Emissões de carbono. Uso do solo. Dinâmica EGO, Modelagem ambiental.

Abstract The deforestation of forests in Brazil is a process known for many years. Recently with an emphasis on the Amazon, since other biomes such as the Atlantic Forest have already lost the vast majority of their area. This work modeled land use in the municipality of Itupiranga-PA, from maps observed between 1985 and 2018 and simulated until 2030 for a trend scenario and two alternative scenarios, one being optimistic and the other pessimistic under the influence of environmental protection areas. The modeling was developed using the open-source software Dinâmica EGO, which uses stochastic models of Markov Chains, cellular automata and weights of evidence that are calculated for each predictive variable applied to the modeling. The model predicts a 24% increase in deforested area in the trend simulation. For the alternative scenarios, the model simulated a reduction in deforestation of 8%, 18% and 71% for an increase of 9%, 18% and 46% respectively in the area of environmental protection. And with reductions of 9%, 17% and 45% of the protected area, the model simulated an increase of 7%, 14% and 34% respectively in deforestation. The relationship between CO₂ emissions and deforested areas was observed, confirming the importance of preservation in the fight against the greenhouse effect and climate warming.

Keywords: Deforestation. Carbon emissions. Land use. Dinamica EGO. Environmental modeling.

Resumen La deforestación de bosques en Brasil es un proceso conocido desde hace muchos años. Recientemente con énfasis en la Amazonía, ya que otros biomas como la Mata Atlántica ya han perdido la gran mayoría de su superficie. Este trabajo modeló el uso del suelo en el municipio de Itupiranga-PA, a partir de mapas observados entre 1985 y 2018 y simulados hasta 2030 para un escenario tendencial y dos escenarios alternativos, uno optimista y otro pesimista bajo la influencia de las áreas de protección ambiental. La modelación fue desarrollada utilizando el software de código abierto Dinâmica EGO, que utiliza modelos estocásticos de Cadenas de Markov, autómatas celulares y pesos de evidencia que se calculan para cada variable predictiva aplicada a la modelación. El modelo predice un aumento del 24% en el área deforestada en la simulación de tendencias. Para los escenarios alternativos, el modelo simuló una reducción de la deforestación del 8%, 18% y 71% para un aumento del 9%, 18% y 46% respectivamente en el área de protección ambiental. Y con reducciones del 9%, 17% y 45% del área protegida, el modelo simuló un aumento del 7%, 14% y 34% respectivamente en la deforestación. Se observó la relación entre las emisiones de CO₂ y las áreas deforestadas, lo que confirma la importancia de la preservación en la lucha contra el efecto invernadero y el calentamiento climático.

Palabras clave: Deforestación. Emisiones de carbono. Uso del suelo. Dinamica EGO, modelización medioambiental.

Introdução

O processo de uso e ocupação da terra na Região Amazônica brasileira são resultados da interação de diversos fatores, a saber: expansão da agricultura, pecuária, desenvolvimento de estradas, ocorrência de incêndios florestais, exploração madeireira, a limitação de fiscalização, entre outros. Dentre esses fatores, ainda vale destacar os processos legais e ilegais (PIONTEKOWSKI, 2014). Em contrapartida, áreas que resultaram na redução do desmatamento tem relação direta com a criação de áreas de proteção Ambiental (FEARNSIDE et al., 2009).

Se o ritmo das ações antrópicas continuar crescendo de forma desordenada, no ano de 2030 aproximadamente 63% da região será dominada pelo desmatamento, com uma grande probabilidade de escassez dos recursos naturais. Este cenário foi observado em uma modelagem ambiental desenvolvida no Sudeste da Amazônia e pode contribuir para auxiliar os órgãos públicos e privados na tomada de decisão para gestão ambiental (PIZANI; AQUINO, 2017).

A expansão dos usos antrópicos condiciona aumento da heterogeneidade do mosaico da paisagem promovendo aceleração como observado na bacia hidrográfica do Rio Tocantininho (OLIVEIRA; FARIA, 2021).

Entre os usos antrópicos que contribuem de forma relevante para o desmatamento no Brasil é a formação de pastagem. Além desse importante impacto negativo diretamente relacionado ao ambiente, a pastagem contribui para o aumento de gases de efeito estufa (GEE) através da produção de CO₂. Uma das formas de amenizar esse importante impacto é a restauração das pastagens aliada a uma estratégia de intensificação mais diversificada de práticas, principalmente a suplementação com grãos para animais em pasto e

confinados, será mais eficaz em termos de retorno econômico e redução de emissões de GEE (BATISTA et al., 2018).

A agricultura intensiva pode expandir a área de cultivo e, conseqüentemente, reduzir a área de habitat, promovendo a redução da população de organismos, com a possibilidade de levar à extinção de espécies e perda de serviços ecossistêmicos (GOULART; CARVALHO-RIBEIRO; SOARES-FILHO, 2016).

A modelagem da paisagem pode ser trabalhada com diversas técnicas e métodos a depender do objetivo e aprofundamento que deseja. Desde processos mais simplificados que não requer uso de variáveis explicativas como na aplicação do software livre (open-source code) Dinamica EGO como em análises por classificação de uso da terra por software de geoprocessamento e uso de índices para apoiar as inferências como o índice de transformação antrópica aplicada na bacia hidrográfica do rio Sepotuba no Mato Grosso (SILVA et al., 2021).

A modelagem para o desmatamento parte do princípio de existir possíveis variáveis que influenciam no processo, seja repelindo ou estimulando. A medição do grau que essas variáveis contribuem na dinâmica da paisagem foi denominada de peso de evidência. Dessa forma os pesos de evidência equivalem às probabilidades que cada célula na matriz tem e termos de representação da paisagem de ser desmatada. Esses pesos são calculados com base em pares de imagens para cada tipo de variável que fará parte da modelagem (FEARNSIDE et al., 2009). Tais pesos de evidência representam a influência das variáveis explicativas com base na probabilidade de transição e são calculados a partir da frequência de cada transição.

Como o método dos pesos de evidência é baseado no teorema de probabilidade, é necessário selecionar as variáveis explicativas independentes para descrever a mesma transição e verificar se existem

correlações (PÉREZ-VEGA; MAS; LIGMANN-ZIELINSKA, 2012). O índice de Cramer é aplicado para avaliar a presença de associação ou dependência espacial entre as variáveis (KRASKA-MILLER, 2014). O índice varia de 0 (zero), refletindo completa independência, a 1 (um), mostrando completa dependência das variáveis.

Os valores dos pesos de evidência das variáveis utilizadas na análise do uso da terra, calculam as probabilidades de transição de cada pixel. Com isso, aos pixels são atribuídos os respectivos valores de probabilidade para uma dada transição e obtidos os mapas de probabilidade para as transições de interesse (SOARES-FILHO; RODRIGUES; COSTA, 2009).

Vale a pena ainda, destacar alguns trabalhos recentes e que estão dentro do campo da área de ciências ambientais, mais especificamente do tema de desmatamento, objeto de estudo do presente artigo, a saber: 1) Soares-Filho et al. (2023), onde os autores analisam a contribuição das áreas de proteção na Amazônia para a conservação florestal, analisando as emissões de CO₂ e com emprego do software livre Dinâmica EGO 7 (SOARES-FILHO et al., 2013); 2) Rocha et al (2022), o qual trata do problema das queimadas e desmatamento nas regiões do Matopiba (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), além do Arco de Desmatamento (Mato Grosso e Norte de Goiás), notadamente reconhecidas como fronteiras de expansão das atividades agrícolas no bioma, onde foram aplicadas técnicas de geoprocessamento com autocorrelação espacial pela ferramenta Emerging Hot Spot Analysis por meio de análise temporal de no intervalo anula de 1999 à 2018; 3) Soares et al. (2020), onde os autores aplicaram a simulação de análise da paisagem com emprego de Sistemas de Informação Geográfica, tendo como área de estudo uma microbacia localizada no Município de Calinda (MT) e realizando-se estudos de restauração florestal.

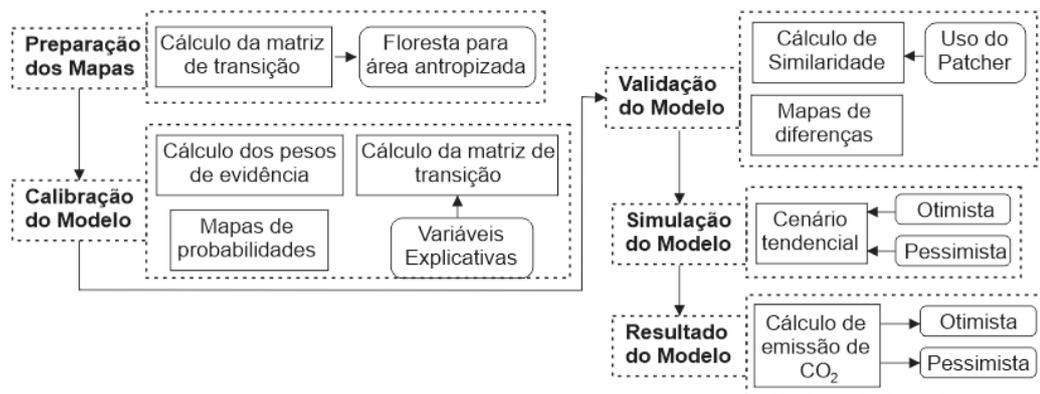
O processo de modelagem Ambiental requer várias etapas que antecipa a estimativa futura mediante a uma proposta de cenário. Esse trabalho desenvolveu uma modelagem de uso da terra a partir de mapas observados no período de 1985 a 2018, para simular a tendência do desmatamento até 2030 com cálculo de emissão de CO₂, bem como avaliar dois cenários alternativos (otimista e pessimista) com alteração no tamanho das Áreas de Proteção Ambiental aplicando as mesmas configurações da modelagem tendencial. A área de estudo foi o Município de Itupiranga-PA, onde já foram observadas alterações nas Áreas de Proteção Ambiental ao longo da história, especialmente relacionada com a terra indígena Parakanã, a qual registra uma diminuição de 35% da área a partir de sua regularização em 1980.

Material e métodos

O desenvolvimento do trabalho se deu em etapas (Figura 1), onde cada uma leva informações para as seguintes, concluindo no objetivo central que foi o cálculo de emissão de CO₂ para os cenários propostos.

Os cenários propostos foram definidos em dois grupos: (Otimista) considerando um aumento da área de proteção e um (Pessimista) reduzindo a área de proteção. Para cada grupo foi criado 3 tamanhos e proporções diferentes entre eles, com o objetivo de avaliar se existe influência na simulação. Porém manteve os valores relativamente iguais entre os dois grupos para possível comparação entre os cenários otimista e pessimista. Os percentuais de aumento para o cenário otimista foram 9%, 18% e 46% e de redução para o cenário pessimista foram de 9%, 17% e 45%.

Figura 1 - Etapas metodológicas para o desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Autores (2021)

O cálculo da matriz de transição representa a taxa de mudança entre os usos da terra, sendo a transição de floresta para área antropizada como foco da modelagem desse trabalho, apesar do modelo apresentar todas as transições. Esse processo foi executado pela função Determine Transition Matrix.

Os pesos de evidência é a próxima etapa a ser processada para avaliar a probabilidade que cada variável influencia no desmatamento. Porém é necessário avaliar possíveis correlações entre as variáveis e assim excluir possíveis redundâncias. O índice de Cramer é uma das opções disponibilizados no software para avaliação da correlação entre as variáveis. Após a determinação do índice e seleção das variáveis que farão parte da modelagem, calcula-se os pesos de evidência, através da função Determine Weights of Evidence Range.

O próximo passo de acordo com a estrutura da figura 1, representa a calibração do modelo, onde é produzido os mapas de probabilidade de desmatamento em função dos pesos de evidência e da matriz de transição.

Seguindo o processo, entra a etapa de validação do modelo através do cálculo de similaridade entre os mapas resultantes da calibração. A função do software responsável por esse processo é a Calc

Multi Window Similarity of Differences. Para validar a modelagem foi necessário verificar a similaridade do modelo simulado que utilizou os pesos de evidência, os quais influenciam no processo, com um modelo nulo que não possui interferências. Para que o modelo simulado fosse aceitável, a condição estabelecida foi de estar maior que no modelo nulo.

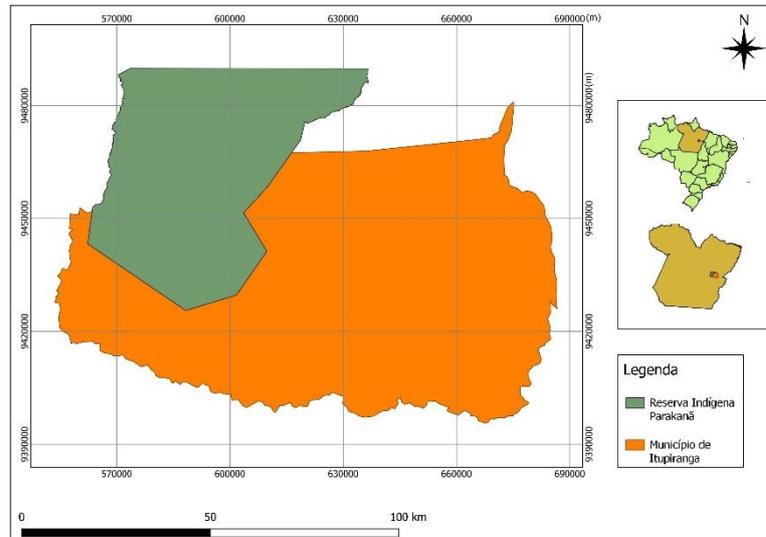
Com o modelo calibrado e validado o procedimento seguinte é a simulação, o qual refere-se ao objetivo da pesquisa. Esse procedimento é uma integração com todos os resultados obtidos nas etapas anteriores diferenciando em função dos cenários de interesse.

Com os resultados da simulação foi aplicado os cálculos de CO₂ para os cenários de interesse. Esse processo foi através da integração do mapa de biomassa da região de estudo com a diferença entre o mapa resultante da simulação com o mapa de referência de 2018. Por fim, com o uso da função Calculate Map foi feito o cálculo de CO₂ para cada objetivo.

Área de Estudo

A modelagem para esse estudo foi desenvolvida para o Município de Itupiranga – PA, localizado na Mesorregião do Sudeste Paraense e Microrregião de Tucuruí. Possui uma área: 7.879 km² e População: 51.832 habitantes. As áreas protegidas situadas no município pertencem à Terra Indígena Parakanã. Ocupa uma área de 352.000(ha), sendo 291.430(ha) no município de Itupiranga, equivalente a 16.79% da área total. A figura 2 representa a área de estudo com destaque para área de proteção ambiental (IBGE, 2017).

Figura 2. Área de estudo. Município de Itupiranga-PA

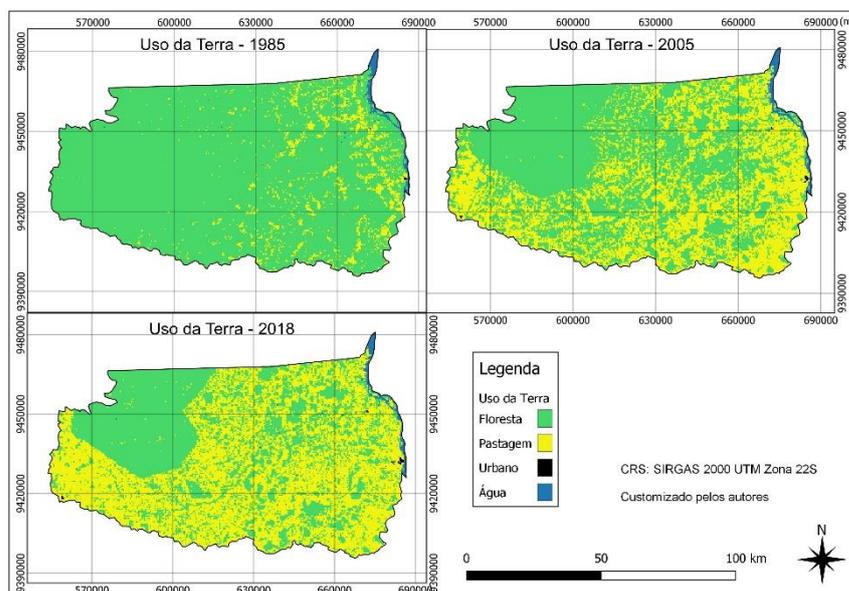


Fonte: Autores (2021)

Dados de entrada do modelo

Para a execução do modelo, foram incluídos dados de entrada que inicializam os processos para obter os resultados. Para tal foi obtido os mapas de uso da terra classificados pelo MapBiomas (MAPBIOMAS, 2018) referentes aos anos 1985, 2005 e 2018 (Figura 3). Cujo objetivo foi a separação dos períodos de calibração (1985 a 2005) e validação (2005 a 2018). Para avaliar as possíveis influências nos desmatamentos, foram definidas as variáveis explicativas, tais como tipos de solos, tipos de vegetação, assentamentos, declividade e relevo como categóricas e hidrografia, estradas, áreas protegidas, aglomerações urbanas e desmatamentos como variáveis contínuas representadas por mapas (CSR, 2020).

Figura 3. Mapas de uso da terra de 1985, 2005 e 2018



Fonte: MapBiomias (MAPBIOMAS, 2018)

O quadro 1 apresenta as classes ajustadas para a modelagem a partir da classificação fornecida pelo MapBiomias

Quadro 1. Classificação ajustada para modelagem

Modelagem	Classificação MapBioma
Floresta	Formação Florestal
	Formação Savânica
Área Antropizada	Pastagem
	Cultura Anual e Perene
	Infraestrutura Urbana
Água	Rio, Lago e Oceano
Área não vegetada	Formação Campestre
	Outra Formação Natural não Florestal

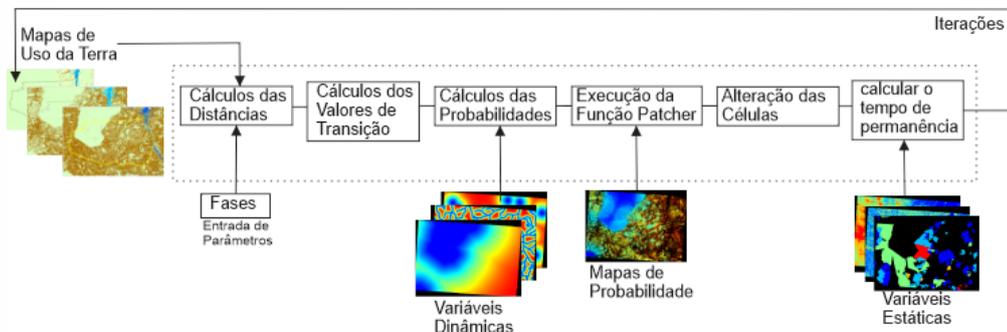
Fonte: Autores (2021)

Estrutura da modelagem do Dinâmica EGO

O Dinamica EGO foi o software responsável por toda modelagem do desmatamento e o software QGIS 3 ("QGIS *Geographic Information System*", 2015) foi o utilizado para algumas operações de geoprocessamento e produção dos mapas. A figura 4 esboça a estrutura

da modelagem e suas interligações executadas pelo software Dinamica EGO.

Figura 4: Estrutura da modelagem do Dinamica EGO



Fonte: Adaptado (SOARES-FILHO; H. O. RODRIGUES; W. L. COSTA, 2009)

Resultados e discussões

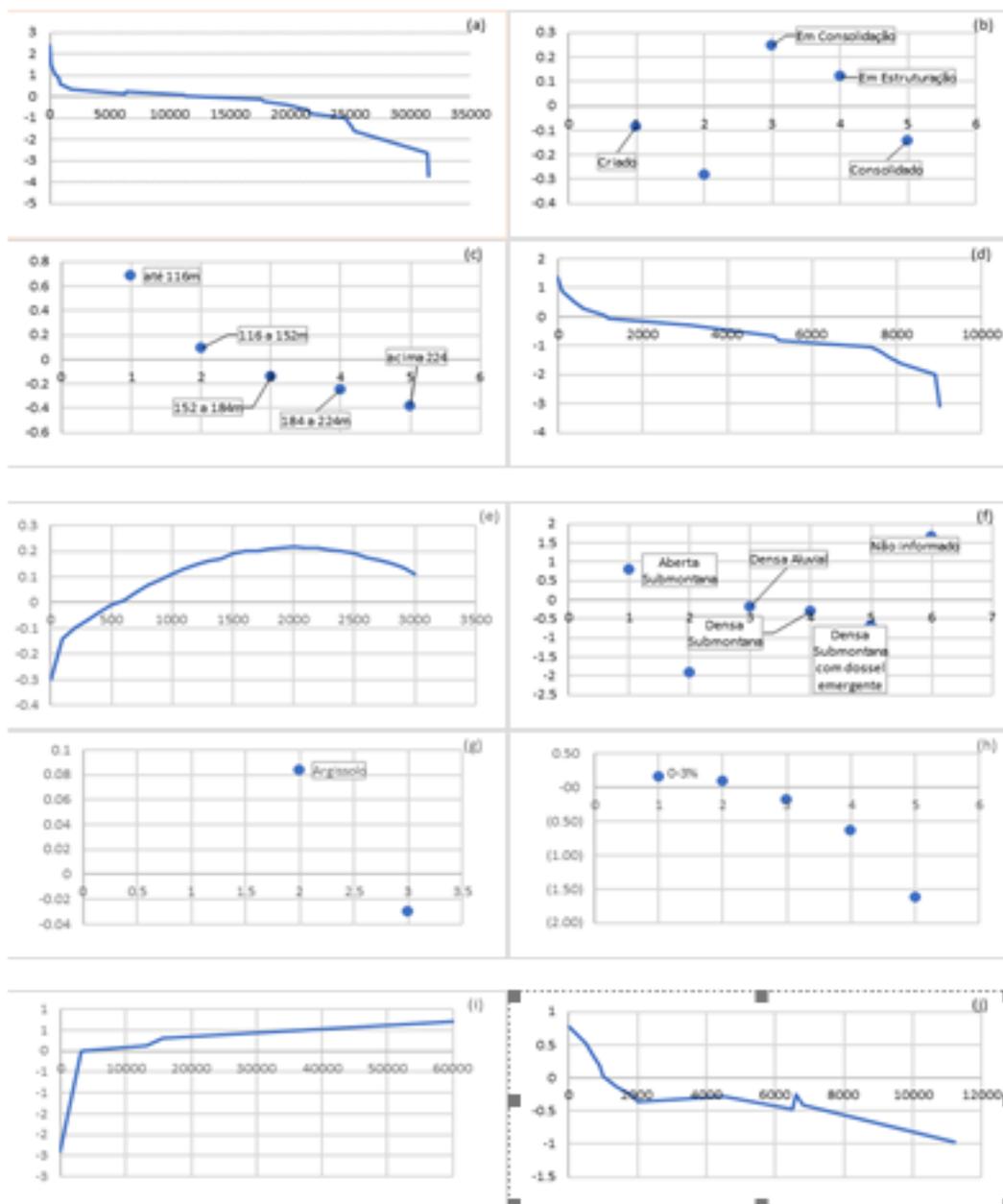
O processo inicial da modelagem consistiu no cálculo da matriz de transição representada pela mudança de floresta para área antropizada, o qual obteve uma taxa de 3,22% ao ano. Vale ressaltar que o mapa de uso da terra foi reclassificado como apresentado no quadro 1, para que a representação do desmatamento seja coerente e a dinâmica da transição seja entre duas classes.

Antes de calcular os pesos de evidência, foi aplicado o índice de Cramer para avaliar possíveis correlações entre as variáveis. Com um valor máximo de 0,50 para o índice de Cramer entre as variáveis, foram consideradas todas as variáveis no modelo. Sendo assim, foram calculados os pesos de evidência que representa a relação entre a taxa de transição e uma variável explicativa na dinâmica do uso da terra. As variáveis de entrada foram divididas em dois grupos, sendo um para variáveis categóricas e outro para variáveis contínuas que representa a influência em função da distância. A figura 5 apresenta as curvas referentes aos pesos de evidência para cada variável analisada.

O gráfico "a" da figura 5 representa a variável de aglomerações urbanas que mostra a influência no desmatamento e pode observar que até próximo de 17km essa influência é positiva que representa uma contribuição. Após essa distância, essa variável tende a repelir o desmatamento. Para os assentamentos representado pelo gráfico "b" que é uma variável categórica identifica os assentamentos em consolidação e em estruturação como contribuidores ao desmatamento e demais tipos como repelidores. Para a variável elevação (gráfico "c"), observa-se que até 152 m contribui para o desmatamento e acima desse valor repele-se o desmatamento, onde as áreas mais planas facilitam esse processo. O gráfico "d" representado pela variável de distância às estradas e rodovias, contribui para o desmatamento até próximo de 1,2 km e acima desse valor existe a tendência de repelir progressivamente. No gráfico "e" representado pela variável de distâncias à rede hidrográfica observa-se um comportamento peculiar, onde até 500 m está repelindo o desmatamento, que pode ser explicado pela área de inundação natural do rio. Após essa distância existe a tendência ao desmatamento uma vez que a água é um recurso importante para uso humano. Após 2km existe uma tendência de se repelir o desmatamento. No gráfico "f" representado pela vegetação, a classe densa submontana repele o desmatamento, enquanto as demais contribuem. Os tipos de solo representados no gráfico "g" possuem apenas o argissolo e o latossolo, onde o latossolo repele o desmatamento e o argissolo contribui. Análogo à variável de elevação, a declividade mostrada no gráfico "h" contribui para o desmatamento quando possui até 8% e acima desse valor começa a repelir o desmatamento. A classe áreas protegidas foram definidas como variável contínua por possuir uma expressiva área no município. Assim, o peso de evidência foi atribuído à distância, onde observou-se que próximo da área de proteção

ambiental o desmatamento é repellido e à medida que afasta dessa área, o desmatamento se intensifica. Por fim, no gráfico “j” representado pelas distâncias aos desmatamentos já existentes, observa-se um aumento quando próximo os esses pontos previamente desmatados.

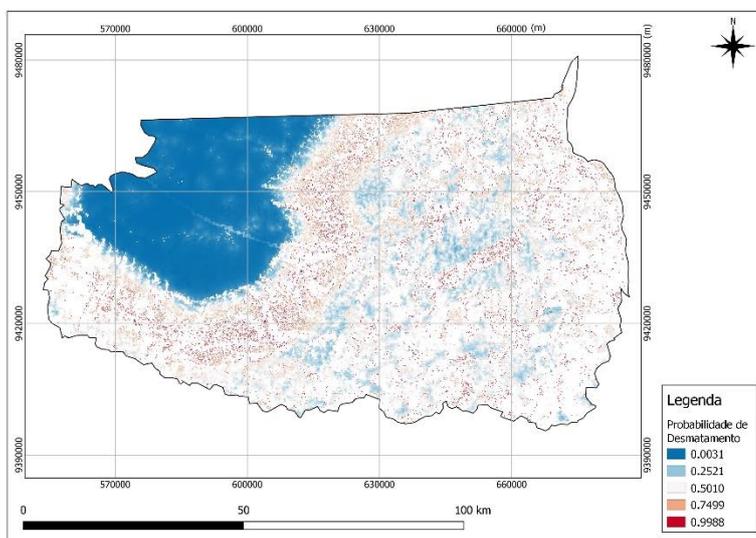
Figura 5 - Cálculos dos Pesos de Evidência. a) Aglomerações urbanas b) Assentamentos c) Elevação d) Estradas e Rodovias e) Hidrografia f) Vegetação g) Solos h) Declividade i) Áreas Protegidas j) Distâncias aos Desmatamentos



Fonte: Autores (2021)

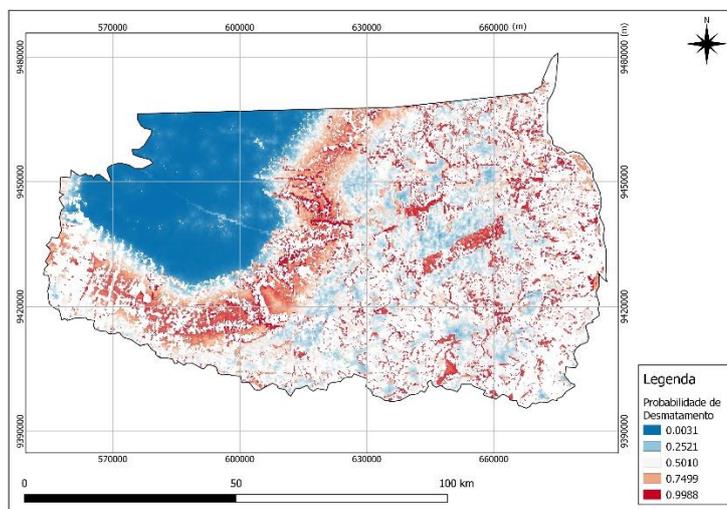
Após o procedimento de calibração do modelo, foram calculadas as probabilidades de desmatamento com base nas variáveis de entrada e nos pesos de evidência. As figuras 6 e 7 apresentam as probabilidades de desmatamento para 2005 e 2018, onde as áreas mais vermelhas identificam a maior chance de evoluir com o desmatamento. Observa-se também e de forma bem evidente o quanto a área de proteção ambiental contribui para segurar essa evolução no desmatamento.

Figura 6. Mapas de probabilidade de 2005



Fonte: Autores (2021)

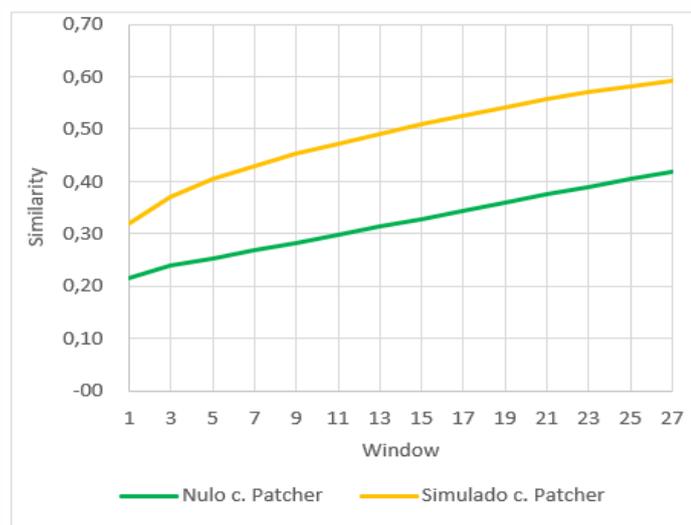
Figura 7. Mapas de probabilidade de 2018



Fonte: Autores (2021)

A figura 8 apresenta a curva de similaridade dos modelos, em que foi constatado a janela 5x5 como melhor referência obtendo-se um valor de 0,25 e 0,40 para o modelo nulo e simulado, respectivamente. Para que o modelo seja melhor que o modelo nulo, foi necessário usar a função Patcher. Essa função tenta reproduzir a estrutura da paisagem evitando a formação de fragmentos dispersos de células únicas. Ela utiliza um procedimento que avalia as células vizinhas para uma transição combinada. Isso é feito a partir da definição da janela, especificando o número de células ao redor da célula central, de acordo com suas probabilidades de transição (SOARES; CERQUEIRA; PENNACHIN, 2002).

Figura 8. Curva de similaridade entre modelos



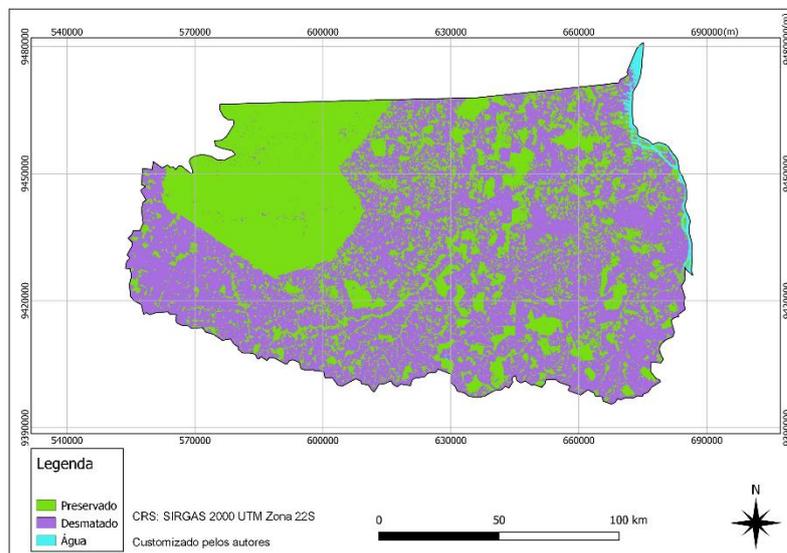
Fonte: Autores (2021)

A similaridade do modelo que representa a validação obteve um ganho de 15% comparado com o modelo nulo. Com o uso do Patcher, a calibração obteve um anho de 15% o qual cálculo da mancha de desmatamento resultou em 67,69 ha.

A simulação para o cenário tendencial que representa a evolução do desmatamento considerando as condições atuais, obteve um aumento de 24%, representando uma área de 235.621,00 (ha) a mais do

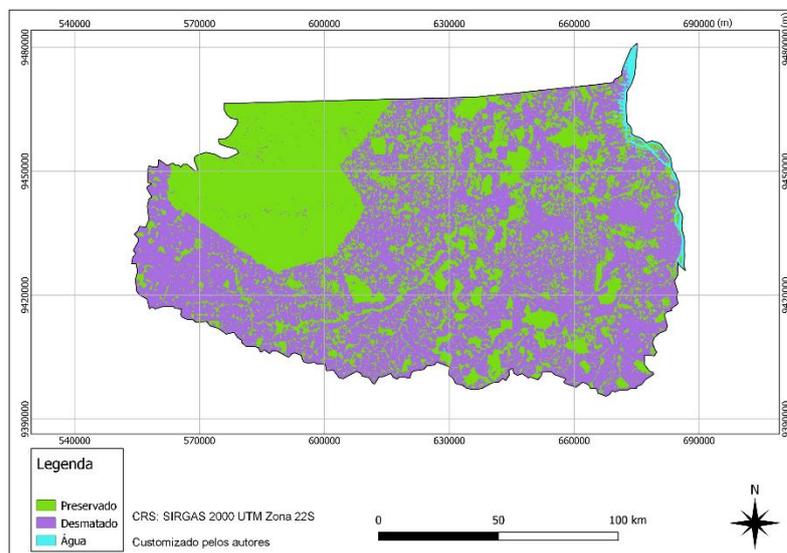
que em 2018. As figuras 9 e 10 apresentam o resultado do modelo para simulação tendencial entre 2018 e 2030.

Figura 9 - Mapa Simulado para 2018



Fonte: Autores (2021)

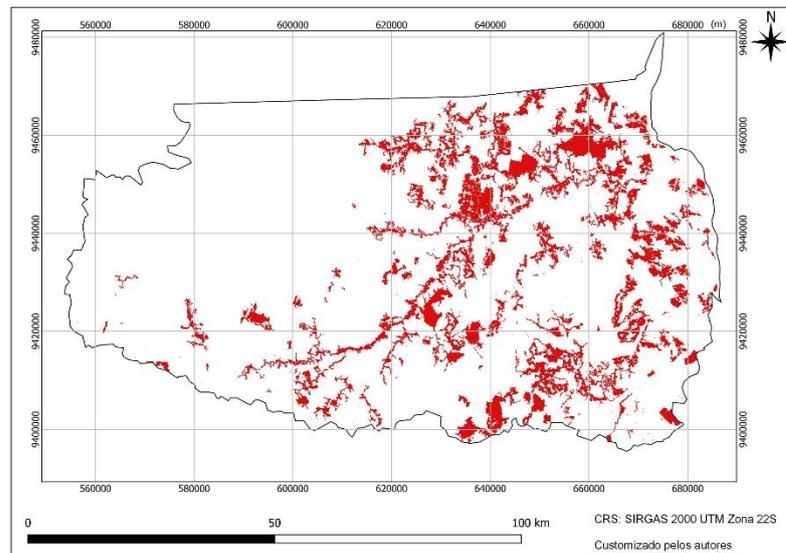
Figura 10 - Mapa Simulado para 2030



Fonte: Autores (2021)

Para verificar o quanto da área desmatada representa a simulação tendencial, foi calculado o mapa de diferença entre 2018 e 2030, obtendo-se um valor de 235.621,00 ha de área desmatada. A figura 11 mostra o mapa de diferença para esse cenário.

Figura 11 - Mapa de diferença no desmatamento na simulação tendencial

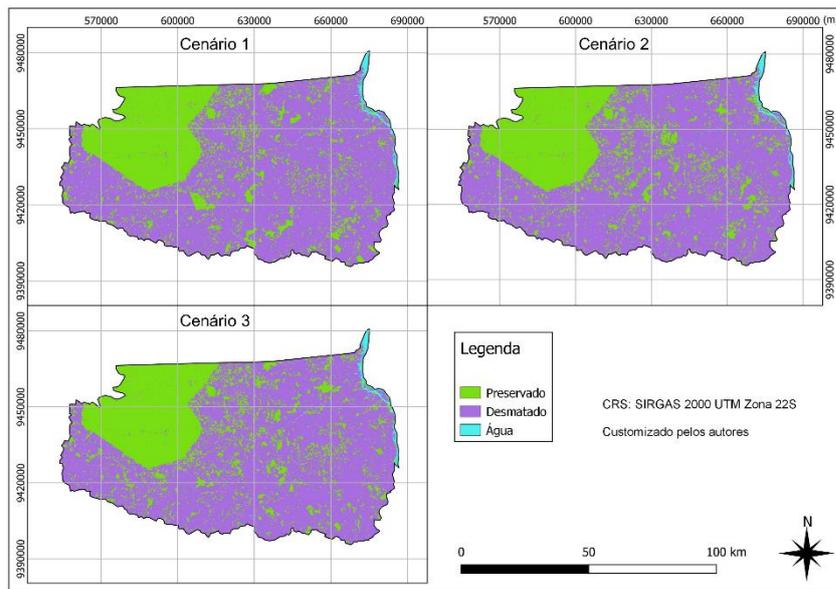


Fonte: Autores (2021)

A simulação futura para cenários alternativos foi avaliada para uma condição otimista e outra pessimista, considerando o aumento e a redução da área de proteção ambiental. As taxas de transição foram ajustadas na mesma proporção de aumento e redução da área de proteção.

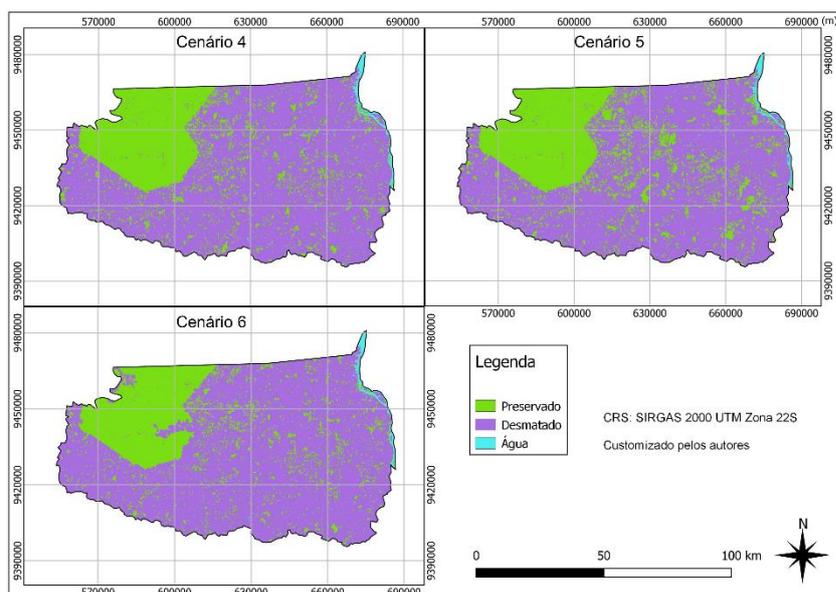
De acordo com os cenários alternativos descritos na metodologia, a figura 12 apresenta os mapas de diferença nos desmatamentos para o cenário otimista e a figura 13 para o cenário pessimista. Esses mapas representam os desmatamentos adicionais, além dos já existentes em 2018.

Figura 12 - Mapas de desmatamento para cenário otimista.



Fonte: Autores (2021)

Figura 13 - Mapas de desmatamento para cenário Pessimista.



Fonte: Autores (2021)

Com os mapas apresentados nas figuras 12 e 13, foram calculadas as áreas desmatadas pela simulação para cenário otimista e pessimista e apresentado na tabela 1. Para o cenário alternativo otimista, foi observado uma redução do desmatamento à medida que

aumenta a área de proteção. Além da coerência da redução, a proporção dessa redução acompanha o aumento da área. Para o cenário pessimista, o efeito é similar e com relação inversa. À medida que a área de proteção ambiental é reduzida o desmatamento aumenta. Essa coerência com os resultados pode ser explicada com os valores de correlação de Pearson para cada um dos cenários. Onde, os valores de correlação encontrados foram de 0.996 e 0.999 para os cenários otimista e pessimista respectivamente.

Tabela 1. Resultado da área desmatada para os cenários

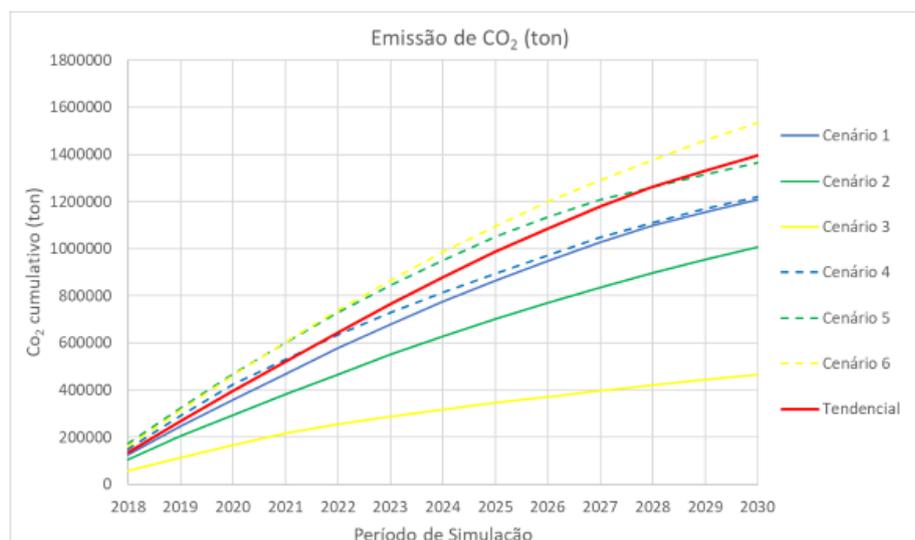
Cenário	Varição da área de proteção ambiental	Área Desmatada (ha)	Resultado
Otimista	Aumento de 9%	217.730	-8%
	Aumento de 18%	199.244	-18%
	Aumento de 46%	137.702	-71%
Pessimista	Redução de 9%	252.930	+7%
	Redução de 17%	267.843	+14%
	Redução de 45%	316.704	+34%

Fonte: Autores (2021)

Após a modelagem de desmatamento, foi calculada a emissão de CO₂ para todos os cenários e apresentada uma curva acumulada para o período de simulação, o que pode ser visualizado na figura 14. O modelo converte a biomassa em Carbono e por fim para Dióxido de Carbono. Como já retratado nos mapas de probabilidade, que as áreas de proteção servem como um elemento de retardo no desmatamento, a figura 14 identificada com os cenários 1, 2 e 3 (otimista) simularam menores produções de CO₂, quando comparadas com os cenários 4, 5 e 6 (pessimista) que representam a redução da área de proteção. Observa-se também a distância da curva entre o cenário 2 e 3 são maiores do que as curvas entre os cenários 1 e 2, demonstrando que o percentual de aumento da área de proteção é diretamente proporcional à produção de CO₂. Para o cenário pessimista, o comportamento da

redução da área correlacionado com a produção de CO₂ teve a mesma analogia com o cenário otimista, porém com menor intensidade. Outra inferência importante, é a observação da curva tendencial, que representa a produção de CO₂ em função da simulação padrão pelo comportamento do período de calibração. Como a curva tendencial se aproxima da curva do cenário 5, podemos inferir que existe a possibilidade futura de uma redução na área de proteção ambiental.

Figura 14 - Curva acumulada de emissão de CO₂. Cenário 1, 2 e 3 otimistas, cenários 4, 5 e 6, pessimista.

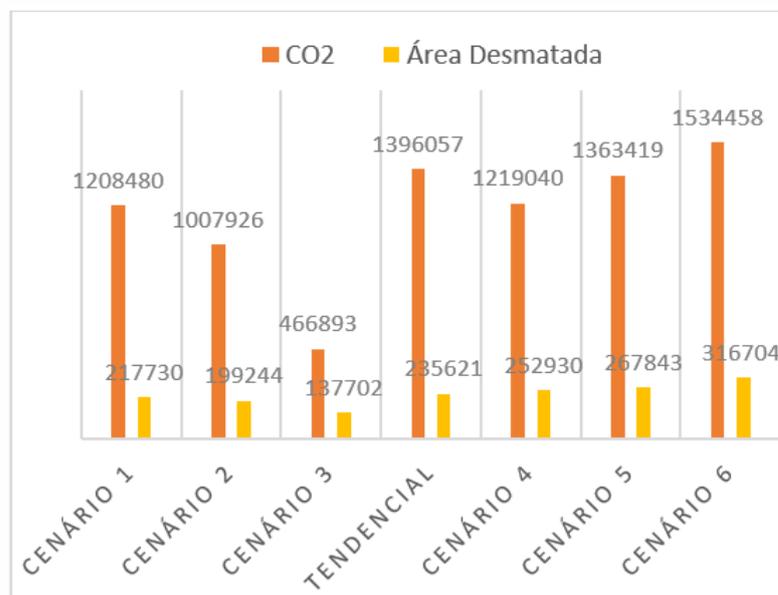


Fonte: Autores (2021)

A figura 15 mostra a correlação entre área desmatada e emissão de CO₂ para cada cenário modelado. Os cenários 1, 2 e 3 como otimista e cenários 4,5 e 6 como pessimista. A coerência nos resultados apresentados nesse gráfico pode ser observada na emissão de CO₂ no cenário tendencial próximo da média dos cenários extremos, o que pode indicar sérios problemas futuros com o desmatamento, uma vez que esteja associado com a redução da área de proteção ambiental. O gráfico mostra também a relação entre a redução de área desmatada,

promovendo a redução de emissões de CO₂ e o aumento da área desmatada, estimulando o aumento das emissões de CO₂. Ao comparar os cenários alternativos de aumento de área de preservação de 9%, 18% e 46%, observa-se uma redução de 13%, 28% e 67% na produção de CO₂ respectivamente comparado com a simulação tendencial. Com o resultado de 0.96 para correlação de Pearson, comparando a produção de CO₂ com a área desmatada, explica o quanto o desmatamento interfere na produção de CO₂.

Figura 15. Área desmatada e emissão de CO₂ para cada cenário



Fonte: Autores (2021)

Conclusões

A modelagem proposta nesse trabalho foi baseada na dinâmica de uso da terra com base nos mapas classificados pelo MapBiomass e em variáveis explicativas que contribuem com essa dinâmica. A estrutura interna de processamento foi modelada a partir da matriz de transição entre floresta e áreas antropizadas com uma taxa de 3,23% e com os pesos de evidência de cada variável preditiva. O modelo respondeu adequadamente à simulação tendencial, onde foi observada a evolução do desmatamento comparando com o período de calibração e

validação. Considerando um cenário tendencial até 2030, o modelo prevê um aumento de 24% no desmatamento com base na simulação entre 1985 e 2018. É sabido que áreas de proteção ambiental exerce uma resistência ao desmatamento próximo aos seus limites, criando uma faixa com menor impacto. Com isso, as simulações alternativas propondo aumentos na área de proteção, demonstraram redução no desmatamento em 8%, 18% e 71% com base no aumento da área de proteção em 9%, 18% e 46% respectivamente. Da mesma forma que as simulações na redução de 9%, 17% e 45% da área de proteção ambiental, poderá aumentar em 7%, 14% e 34% no desmatamento do município. Em uma relação do desmatamento com a emissão de CO₂, foi constatado na simulação que o cenário tendencial remete ao equivalente a uma redução da área de proteção ambiental de 17%. Podendo ser pior se não houver uma mudança na tendencia e ao mesmo tempo for reduzido a área de proteção ambiental. A relação de emissão de CO₂ com as áreas desmatadas em paralelo com áreas de proteção ambiental, estando correlacionados como o modelo demonstrou, explica a importância das florestas no combate ao efeito estufa e aquecimento do planeta.

Referências

- BATISTA, E. et al. Large-scale pasture restoration may not be the best option to reduce greenhouse gas emissions in Brazil. **Environmental Research Letters**, n. December 2016, p. 11–14, 2018.
- CSR. **Centro de Sensoriamento Remoto - Instituto de Geociências-UFMG**. Disponível em: <<https://maps.csr.ufmg.br/>>. Acesso em: 10 ago. 2020.
- FEARNSIDE, P. M. et al. Modeling of deforestation and greenhouse-gas emissions in the area of influence of the Manaus-Porto Velho (BR-319). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 2, p. 208–233, 2009.
- GOULART, F. F.; CARVALHO-RIBEIRO, S.; SOARES-FILHO, B. Farming-Biodiversity Segregation or Integration? Revisiting Land Sparing versus Land Sharing Debate. **Journal of Environmental Protection**, v. 07, n. 07, p. 1016–1032, 2016.
- KRASKA-MILLER, M. **Nonparametric statistics for social and behavioral sciences**. Nova York: CRC Press, 2014.
- MAPBIOMAS. **Sistema de Validação e Refinamento de Alertas de Desmatamento com Imagens de Alta Resolução**. Disponível em: <<http://mapbiomas.org>>.
- OLIVEIRA, R. B. DE; FARIA, K. M. S. DE. Análise multitemporal da dinâmica da paisagem da bacia hidrográfica do rio Tocantinzinho. **Revista Caminhos da Geografia**, v. 22, n. 81, p. 74–87, 2021.
- PÉREZ-VEGA, A.; MAS, J. F.; LIGMANN-ZIELINSKA, A. Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. **Environmental Modelling and Software**, v. 29, n. 1, p. 11–23, 2012.
- PIONTEKOWSKI, V. J. **Modelagem da dinâmica do Uso e Cobertura da Terra do Estado de Rondônia até 2050**. Departamento De Engenharia Florestal, p. 88, 2014.
- PIZANI, F. M. C.; AQUINO, J. N. **Modelagem do Desmatamento da Porção Sudeste da Amazônia Utilizando o Dinamica EGO**. p. 6–9, 2017.
- QGIS **Geographic Information System**., 2015. Disponível em: <www.qgis.org>

ROCHA, M. I. S.; NASCIMENTO, D. T. F. Padrões e tendências espaço-temporais da ocorrência de queimadas no cerrado entre 1999 e 2018.

Boletim Goiano de Geografia, Goiânia, v. 42, n. 01, 2022. DOI: 10.5216/bgg.v42.70659. Acesso em: 9 maio. 2023.

SILVA, G. DE J. O. et al. Dinâmica Da Cobertura Vegetal E Uso Da Terra Da Bacia Hidrográfica Do Rio Sepotuba-Mt, Brasil. **Revista Caminhos De Geografia**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2021.

SOARES, D. R.; SAIS, A. C.; OLIVEIRA, R. E. de. Análise Da Estrutura Espacial Da Paisagem A Partir Da Proposição De Cenários De Restauração Florestal Em Uma Microbacia Hidrográfica Na Amazônia Mato-Grossense. **Boletim Goiano de Geografia, Goiânia**, v. 40, n. 01, p. 1–23, 2020. DOI: 10.5216/bgg.v40i01.63175. Acesso em: 9 maio. 2023.

SOARES-FILHO, B. S. et al. Contribution of the Amazon protected areas program to forest conservation. **Biological Conservation**, v. 279, p. 109928, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.109928>

SOARES-FILHO, B. S.; H. O. RODRIGUES; W. L. COSTA. **Guia Prático do Dinamica EGO**. p. 145, 2009.

SOARES-FILHO, B.; RODRIGUES, H; FOLLADOR, M. A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models. **Environmental Modelling & Software**, v. 43, p. 80-87, 2013. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815213000236>>

Publisher

Universidade Federal de Goiás. Instituto de Estudos Socioambientais. Programa de Pós-graduação em Geografia. Publicação no Portal de Periódicos UFG.

As ideias expressadas neste artigo são de responsabilidade de seus autores, não representando, necessariamente, a opinião dos editores ou da universidade.

Contribuições dos autores

Todos os autores ofereceram substanciais contribuições científicas e intelectuais ao estudo. As tarefas de concepção e design do estudo e preparação do manuscrito, bem como, revisão crítica foram desenvolvidas em grupo. O primeiro autor Warlen Librelon de Oliveira foi responsável pelo desenvolvimento do artigo, com a estruturação do texto, escrita, construção e execução do modelo de simulação do desmatamento e análise dos resultados; segundo autor Marcelo Antonio Nero contribuiu no planejamento, elaboração de revisão e da atualização bibliográfica, conceitos, revisão das críticas feitas por parte dos consultores da revista e revisão final antes do envio definitivo para o periódico.

Warlen Librelon de Oliveira Acadêmico e pesquisador. Bacharelado na engenharia ambiental no Centro Universitário Newton Paiva, com pesquisa na área de materiais desenvolvendo um compósito de fibra de coco. Mestrado na engenharia mecânica pela Universidade Federal de Minas Gerais com a pesquisa voltada para indústria automobilística na área de engenharia química. Doutorado no Instituto de Geociências, departamento de cartografia da Universidade Federal de Minas Gerais no programa de doutorado em Análise e modelagem de Sistemas Ambientais.

Marcelo Antonio Nero Atualmente é Prof. Adjunto C, Nível 04, do Departamento de Cartografia da Universidade Federal de Minas Gerais, credenciado no Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais (linha de pesquisa de qualidade temática e orientação de mestrado e doutorado), orientador de alunos de iniciação científica, pesquisador/consultor do Laboratório de Geotecnologias (GEOTEC/IGC/UFGM)

Data de recebimento 17 de janeiro de 2022

Aceite em 18 de abril de 2023

Publicação em 20 de outubro de 2023