

MAPEAMENTO DOS PADRÕES ESPAÇO-TEMPORAIS DE INCIDÊNCIA DO FOGO NO ENCLAVE DE CERRADO DOS CAMPOS AMAZÔNICOS

Mapping spatio-temporal patterns of fire incidence over campos amazônicos savanna enclave

*Cartografía de los patrones espacio-temporales de incidencia del fuego en el enclave de
sabana de los campos amazonicos*

Matheus Torres Walder¹

Daniel Borini Alves²

RESUMO

Um dos principais agentes modeladores de ecossistemas terrestres é o fogo. Porém, com as influências antrópicas e como resultado das mudanças climáticas recentes, os regimes de queimadas têm sofrido alterações significativas, tornando o seu monitoramento essencial para o processo de gestão territorial. O objetivo deste trabalho foi mapear e analisar os regimes de queimadas no Enclave do Cerrado dos Campos Amazônicos (ECCA), utilizando séries de imagens Landsat. Foram identificadas as queimadas entre 1984-1999, complementando uma série temporal pré-existente (2000-2019). Para isso utilizou-se da plataforma Google Earth Engine e da ferramenta semiautomática Burned Area Mapping. A avaliação da acurácia do mapeamento foi feita através do cálculo dos índices de acerto geral, omissão, comissão e coeficiente de Dice. O algoritmo apresentou níveis elevados de acerto, com índices muito baixos de comissão ($\cong 2\%$) e moderado-baixo de omissão ($\cong 23\%$). Aproximadamente 19097 km² do ECCA foram queimados no período, com os maiores subtotaís observados em 1988, 2005 e 2014. Verificou-se que 43% do enclave registrou ao menos uma ocorrência num intervalo superior a 3 e inferior a 8 anos. Em termos gerais, se verificou a eficácia do algoritmo e a importância do aprimoramento do mesmo, para que se possa monitorar o fogo e seus impactos.

Palavras-Chave: Regime de queimadas. Sensoriamento Remoto. Landsat. Savana Amazônica.

ABSTRACT

Fire is one of the main agents in the dynamics of ecological processes of terrestrial ecosystems. However, fire regimes have been strongly altered by human activities and climate change, making their monitoring very important for territorial management. The objective of this work was to map and analyze the fire regimes in the Campos Amazônicos Savanna Enclave (CASE), using multitemporal series of Landsat images. Fire occurrences were identified in the period from 1984 to 1999, complementing an existing burned area database (2000-2019). To this end, Google Earth Engine platform and the semi-automatic Burned Area Mapping tool were used. The accuracy assessment was realized through the calculation of overall accuracy, omission index, commission index and Dice coefficient. The algorithm showed high levels of accuracy, with very low rates of commission ($\cong 2\%$) and moderate-low rates of omission ($\cong 23\%$). In the series studied (1984-2019), approximately 19097 km² of the

¹ Universidade Estadual Paulista (UNESP – Rio Claro); E-mail: matheustorreswalder@gmail.com

² Universidade Estadual Paulista (UNESP – Rio Claro); E-mail: daniel.borini@unesp.br

ECCA were burned, with the largest subtotals in the years 1988, 2005 and 2014. It was found that 43% of the enclave recorded at least one occurrence in an interval greater than 3 and less than 8 years. The effectiveness of the algorithm was verified and the importance of monitoring the fire and its impacts is highlighted in order to better understand the ecological dynamics of the fire.

Keywords: Fire Regimes. Remote Sensing. Landsat. Amazon Savannas.

RESUMEN

Uno de los principales elementos en la dinámica de los ecosistemas terrestres es el fuego. Sin embargo, con las influencias antrópicas y como resultado de los cambios climáticos recientes, los regímenes de fuego están pasando por alteraciones significativas, haciendo con que su seguimiento sea esencial para el proceso de gestión territorial. El objetivo de este trabajo fue mapear y analizar los regímenes de fuego en el Enclave de Sabana de los Campos Amazônicos (ECCA), utilizando series de imágenes Landsat. Fueron identificadas las quemadas entre los años de 1984-1999, complementando una serie temporal pre-existente (2000-2019). Para eso se utilizó la plataforma Google Earth Engine y la herramienta semiautomática Burned Area Mapping. La evaluación de los niveles de acierto se hizo a través del cálculo de índices de acierto global, omisión, comisión y coeficiente de Dice. El algoritmo presentó niveles elevados de acierto, con índices muy bajos de comisión ($\cong 2\%$) y moderado bajo de omisión ($\cong 23\%$). Aproximadamente 19097 km² del ECCA se ha quemado en el período, con los mayores subtotales observados en 1988, 2005 y 2014. Se verificó que 43 del enclave registró al menos una ocurrencia en un intervalo superior a 3 e inferior a 8 años. En términos generales, se comprobó la eficacia del algoritmo y la relevancia del mejoramiento del mismo, para que se pueda evaluar el fuego y sus impactos.

Palabras-Clave: Regímenes de fuego. Teledetección. Landsat. Sabana Amazónica.

1. INTRODUÇÃO

O fogo é um fator muito importante na dinâmica global dos ecossistemas terrestres, por muito tempo desconsiderado por muitos estudos de modelagem de processos ecológicos em ampla escala (BOND et al., 2005). A origem do fogo se associa aos primeiros registros de plantas na Terra, por volta de 420 milhões de anos atrás (SCOTT; GLASPOOL, 2006), onde a vegetação atuou como material combustível para as fontes naturais de calor (raios e vulcanismo) (PAUSAS; KEELEY, 2009). Nas savanas neotropicais da América do Sul, os regimes naturais de fogo estão presentes há mais de 10 milhões de anos (SIMON et al., 2009), pondo em evidência a influência deste elemento na evolução do Cerrado (RAMOS-NETO; PIVELLO, 2000).

Nestes domínios de paisagem que evoluíram historicamente com o fogo, os regimes de queimadas cumprem um importante papel para a ciclagem de nutrientes e para a manutenção da diversidade e da estrutura dos habitats (COUTINHO, 1990; FIDELIS; PIVELLO, 2011). Porém, é consenso que as últimas décadas estiveram marcadas por fortes alterações dos regimes de fogo, relacionadas principalmente à ampliação das atividades antrópicas, que resultam em maiores níveis de recorrência de fogo e possibilita a ocorrência de incêndios em períodos mais críticos de seca (ARAGÃO et al., 2008). Queimadas frequentes ou até mesmo a alteração da época de queima podem resultar impactos severos nos ecossistemas (PAUSAS; KEELEY, 2009). Por outro lado, mudanças do regime de queimadas também são registradas por conta da exclusão do fogo, afetando negativamente espécies típicas de áreas abertas com o adensamento

de espécies lenhosas (“*woody encroachment*”) (ARCHER et al., 2017), e favorecendo a ocorrência de grandes incêndios pelo maior acúmulo de material combustível (FIDELIS et al., 2018; SCHMIDT et al., 2018). Além disso, mudanças climáticas recentes têm contribuído na alteração de regimes de queimas, aumentando o risco de incêndios e a frequência de ocorrência destes eventos extremos (WILLIAMS et al., 2001). Todos estes fatores ressaltam a importância de monitorar os regimes de queimadas, dando subsídio para ações estratégicas voltadas à conservação dos ecossistemas de acordo com as suas especificidades.

Neste contexto, o presente estudo buscou fazer uso das séries multitemporais de imagens Landsat para espacializar os padrões espaciais e temporais de áreas afetadas pelo fogo do maior enclave de savana tropical da Amazônia Meridional, o Enclave de Cerrado dos Campos Amazônicos (ECCA), mediante o uso do algoritmo semiautomático *Burned Area Mapping* (BAM), implementado na plataforma *Google Earth Engine* (GEE). Mais precisamente, tem-se como objetivo geral mapear a incidência do fogo anual da área desde 1984 até 1999, complementando, integrando e analisando uma série temporal já existente para o ECCA (2000-2019) associada aos trabalhos de Alves e Pérez-Cabello (2017).

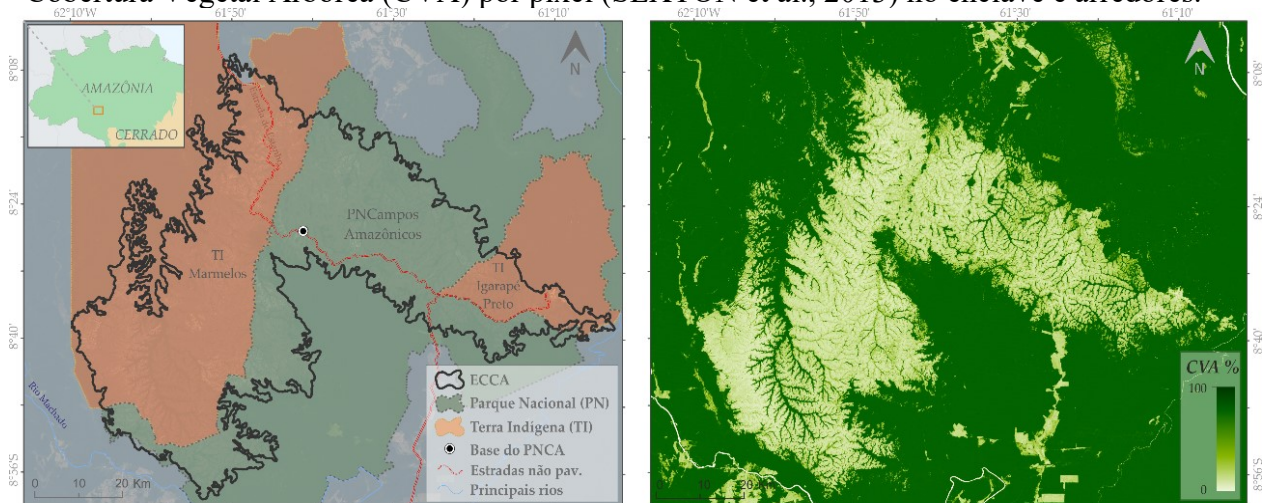
Pretende-se responder às seguintes perguntas: Qual é o nível de acerto do algoritmo semiautomático aplicado no comparativo com mapeamentos de referência? Com que frequência o fogo incidiu sobre as fisionomias do ECCA nos últimos 35 anos? Isso resultará em informações amplas sobre as características do regime do fogo na área, gerando dados que contribuirão com o processo de gestão territorial e oferecerão subsídios para o plano de manejo do fogo da área.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado em áreas do Enclave de Cerrado dos Campos Amazônicos (ECCA) (Figura 1), com um total 4342 km². Atualmente, a maior parte deste enclave corresponde a áreas protegidas, com 47% pertencente ao Parque Nacional dos Campos Amazônicos (PNCA), 46% e 5% situados nas Terras Indígenas Tenharim Marmelos e Tenharim Igarapé Preto, respectivamente (ICMBIO, 2016).

Figura 1 - Localização do ECCA (esquerda). À direita, se apresenta a porcentagem de Cobertura Vegetal Arbórea (CVA) por pixel (SEXTON et al., 2013) no enclave e arredores.



Fonte: adaptado de Alves e Pérez-Cabello, 2017.

O enclave corresponde a uma área de predomínio de fisionomias savânicas em meio a uma grande área de predomínio de floresta amazônica, sendo classificada como savana amazônica disjunta (RATTER et al., 2003). O atual padrão de vegetação da área reflete as dinâmicas das grandes mudanças climáticas dos períodos Terciário e Quaternário, além dos fatores ambientais atuais (CARNEIRO FILHO, 1993). Representa uma vegetação relictual remanescente de climas anteriores, isolada da área core do Cerrado, sendo a sua proteção significativamente importante para a conservação da biodiversidade, protegendo inclusive possíveis processos de especiação em andamento (ICMBIO, 2016).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Acesso às imagens e detecção anual das áreas queimadas

Como principal fonte de dados multitemporais, contou-se com uma série extensa de dados de sensoriamento remoto, e mais precisamente a série temporal dos sensores Landsat 5 TM (*Thematic Mapper*) (em operação no período de 1984-2011), Landsat 7 ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) (em operação desde 1999 aos dias atuais) e Landsat 8 OLI (*Operational Land Imager*) (de 2013 aos dias atuais). Esta série é disponibilizada gratuitamente pelo *Center for Earth Resources Observation and Science - United States Geological Survey* (EROS - USGS) (USGS, 2020), sendo aqui acessada a partir da plataforma GEE. A série dispõe de uma imagem a cada 16 dias (que se reduz a 8 dias quando da operação simultânea dos sensores TM e ETM+), com uma resolução espacial de 30m, e bandas espectrais em regiões sensíveis aos impactos do fogo sobre a vegetação, tais como o infravermelho próximo (NIR) e o infravermelho de ondas curtas (SWIR) (TRIGG; FLASSE, 2000).

Para a extração de áreas queimadas se utilizou do algoritmo semiautomático BAM (*Burned Area Mapping*), proposto por Bastarrika et al. (2014), que exige do usuário o

treinamento de amostras (indicação de pontos queimados), que são utilizados pelo algoritmo para calcular limiares de variações na reflectância de superfície e gerar polígonos de áreas queimadas. Este algoritmo foi recentemente disponibilizado pelo seu desenvolvedor em forma de *script* para aplicação junto ao GEE para imagens da série do satélite Sentinel 2, sendo aqui utilizada uma versão adaptada (que integra as coleções Landsat) e otimizada (que incorpora bandas de qualidade para melhor filtragem de anomalias atmosféricas da série).

A geração das imagens anuais se iniciou com a compilação de todas as imagens Landsat de cada ano alvo de mapeamento em imagens únicas, utilizando o critério de máximo valor do índice espectral *Normalized Burned Index* (NBR). Seguindo o roteiro proposto pelo algoritmo, passou-se então a realizar um treinamento de amostras (indicação de pontos) considerados queimados sobre a imagem de composição anual. Este processo se realizou em um Sistema de Informação Geográfica (SIG), no *software* QGIS 2.18, criando um arquivo *shape* de pontos para cada ano alvo de mapeamento. Em seguida, realizou-se a aplicação do algoritmo BAM para cada ano da série, em ambiente GEE. Esse procedimento foi repetido para cada ano da série de interesse de mapeamento (1984 a 1999), e adicionalmente para determinados anos da série temporal que já se contava com um mapeamento com alta precisão (2004, 2007, 2010, 2016 e 2018), para medir a acurácia de acerto do método aplicado.

3.2 Avaliação da acurácia dos mapeamentos realizados com BAM

O mapeamento com o algoritmo BAM não se restringiu apenas ao período de complementação (1984-1999) da base de dados pré-existente (2000-2019) (ALVES; PÉREZ-CABELLO, 2017). Foi também realizado para certos anos desta série pré-existente (2004, 2007, 2010, 2016 e 2018), visando validar o nível de acerto do mapeamento de áreas queimadas através do algoritmo. Estes cinco anos foram selecionados por sorteio entre os anos que se dispunha deste mapeamento de maior precisão, utilizado aqui como mapa de referência, realizados mediante processos de interpretação visual.

Para isso, se criou uma tabela de contingência (Tabela 1) entre os mapeamentos derivados do algoritmo BAM e os mapeamentos de referência, desde a qual é possível derivar estatísticas de matriz de erro (CONGALTON, 1991), tais como a acurácia geral (AG) (Eq.1.1), valores de erro de comissão (Ec) (Eq.1.2), erro de omissão (Eo) (Eq. 1.3) e coeficiente de Dice (CD) (Eq.1.4):

$$AG = \frac{(E_{11} + E_{22})}{(E_{11} + E_{22} + E_{21} + E_{12})} \quad (\text{Eq.1.1})$$

$$Ec = \frac{E_{12}}{E_{1+}} \quad (\text{Eq.1.2})$$

$$Eo = \frac{E_{21}}{E_{+1}} \quad (\text{Eq.1.3})$$

$$CD = \frac{2E_{11}}{2E_{11} + E_{12} + E_{21}} \quad (\text{Eq.1.4})$$

Tabela 1 - Contingência entre o mapeamento BAM (áreas queimadas obtidas com a classificação semiautomática) e as imagens de validação (áreas queimadas de referência)

Mapeamento BAM	Mapeamento de referência		Total
	Área queimada	Área não queimada	
Área queimada	E_{11}	E_{12}	E_{1+}
Área não queimada	E_{21}	E_{22}	E_{2+}
Total	E_{+1}	E_{+2}	1

Fonte: Autoria própria, 2020.

O índice AG indica a proporção geral de acordo entre os dois mapas comparados, variando de 0 a 1 (quanto mais próximo de 1 melhor o nível de acordo). Estabelece o mesmo peso para acertos de áreas queimadas (E_{11}) ou não-queimadas (E_{22}). Os erros de omissão (E_o) ocorrem quando parte da área queimada não é identificada pelo algoritmo sendo mantido como não queimada, enquanto erros de comissão ocorrem quando o algoritmo aponta uma área não queimada como queimada, aumentando assim as áreas de queima. Por fim, está o coeficiente de Dice (CD), que busca relacionar o nível de acerto apenas da categoria “queimado” com os erros de mapeamento, sendo um índice que sintetiza os erros de omissão e comissão, variando de 0 a 1 (quanto mais próximo de 1 melhor o acerto). Todos estes índices foram calculados comparando os mapeamentos semiautomáticos com os mapeamentos de referência, aplicando um *script* junto ao software R.

3.3 Integração e análise da série temporal de áreas queimadas

A partir dos resultados da cartografia anual de áreas queimadas desta base atualizada, foi possível se gerar um histórico dos 36 anos de queimas ocorridas no ECCA. Para fins de processamento e integração com a série temporal completa, os polígonos anuais de áreas queimadas derivados do BAM foram transformados em formato *raster*, utilizando os *packages* “*rgdal*” e “*raster*” junto ao *software* R. Com base na álgebra de mapas *pixel a pixel* destes *rasters*, foi realizada a geração de mapas de número de ocorrências de queimadas. Consequentemente, com a geração deste compilado também foram extraídos dados estatísticos anuais das áreas queimadas, permitindo a caracterização dos padrões espaciais de incidência do fogo sobre a área.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Acurácia do mapeamento semiautomático

Os índices obtidos (Tabela 2) demonstraram que foi obtida uma acurácia geral de 97% para o algoritmo utilizado, com valores muito baixos para o erro de comissão, em média 2%, demonstrando como o mesmo apresenta poucos problemas de classificar como queimado áreas

não afetadas pelo fogo. Pode ser destacado também o erro de omissão do algoritmo que também se demonstrou relativamente baixo, em média 23%. Os resultados do índice CD variaram entre 0,81-0,90, revelando bons níveis de acerto no balanço entre erros de omissão e comissão dos mapeamentos.

Tais valores obtidos para os erros de comissão e omissão são próximos a valores obtidos pelo produto de áreas queimadas do sensor *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), denominado MCD64A1 v006, em áreas de savana amazônica (ALVES et al., 2018), de 10,2% de erros de comissão e 28,0% em erros de omissão. Há ainda que considerar que, para além de erros associados às limitações do algoritmo, os erros de omissão podem ser explicados por limitações de disponibilidade de imagens livre de nuvens na geração dos compilados anuais.

TABELA 2 - ÍNDICES DE VALIDAÇÃO OBTIDOS, ONDE: ACURÁCIA GERAL (AG), ERRO DE COMISSÃO (Ec), erro de omissão (Eo) e coeficiente de Dice (CD) são demonstrados.

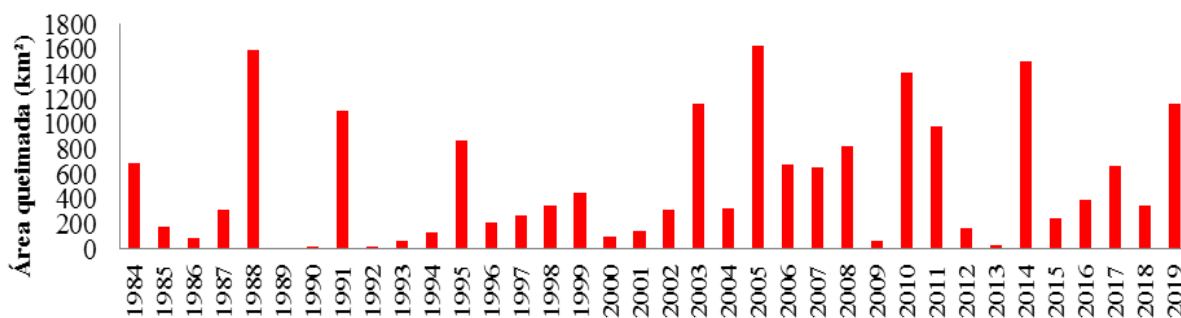
Ano	AG	Ec	Eo	CD
2004	0,98	0,04	0,30	0,81
2007	0,97	0,01	0,18	0,90
2010	0,93	0,01	0,22	0,87
2016	0,98	0,01	0,20	0,89
2018	0,98	0,04	0,23	0,85
Média	0,97	0,02	0,23	0,86
Desvio padrão	0,02	0,02	0,03	0,03

Fonte: Autoria própria, 2020.

4.2 Avaliação da série temporal de áreas queimadas completa

No intervalo de 36 anos foram queimados 19097,32 km² do ECCA. O ano que apresentou a maior área de queima foi o de 2005, com cerca de 37% da área total do ECCA sendo queimado, equivalente a 1628 km². Os anos de 1988 e 2014 também apresentaram uma grande porcentagem de queima, respectivamente 36% e 34% (Figura 2).

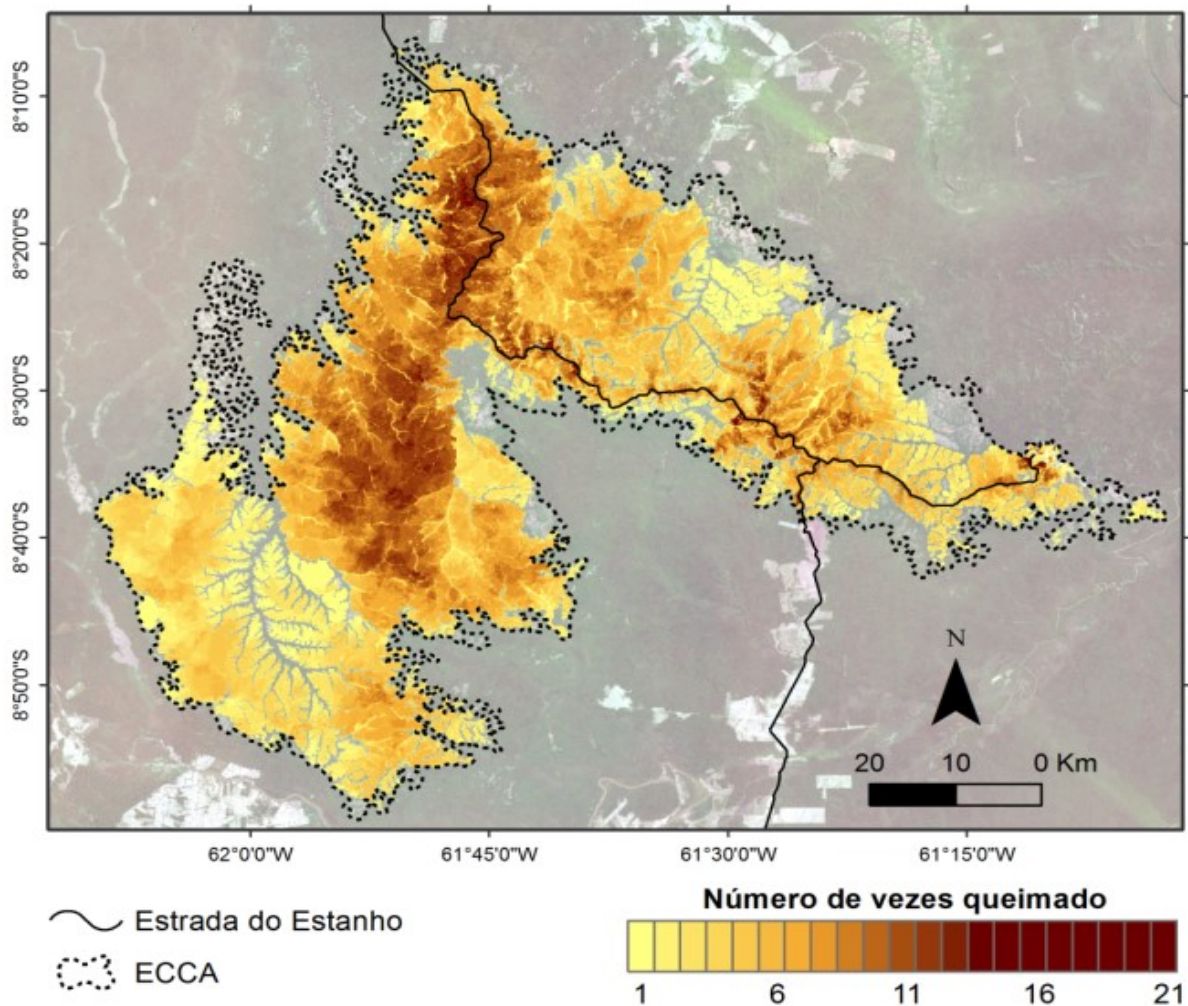
Figura 2 - Áreas queimadas anuais do Enclave de Cerrado dos Campos Amazônicos (1984-2019).



Fonte: Autoria própria, 2020.

Uma importante observação está no fato de que os anos em que se observam picos de áreas queimadas são geralmente precedidos de anos com subtotaís bem baixos de área queimadas, tais como entre os anos 1990-1991, 2009-2010 e 2013-2014. Anos com valores muito baixos de áreas queimadas resultam em acúmulo de material combustível, podendo favorecer a ocorrência de grandes incêndios, tal como também foi observado por Alvarado et al. (2017) no Parque Nacional da Serra do Cipó e por Argibay, Sparacino e Espíndola (2020) no Parque Nacional da Serra das Confusões. O mapa síntese de áreas queimadas no período de 1984-2019 (Figura 3), e sua estratificação estatística (Figura 4), permitem observar as áreas em que o fogo ocorre com maior ou menor frequência na extensão do enclave.

Figura 3 - Mapa do número de ocorrências de queimadas no ECCA (1984-2019). Áreas que transparecem a imagem de fundo (Landsat OLI do dia 06/08/2019 (R-G-B/4-3-2) correspondem a áreas não queimadas do ECCA.



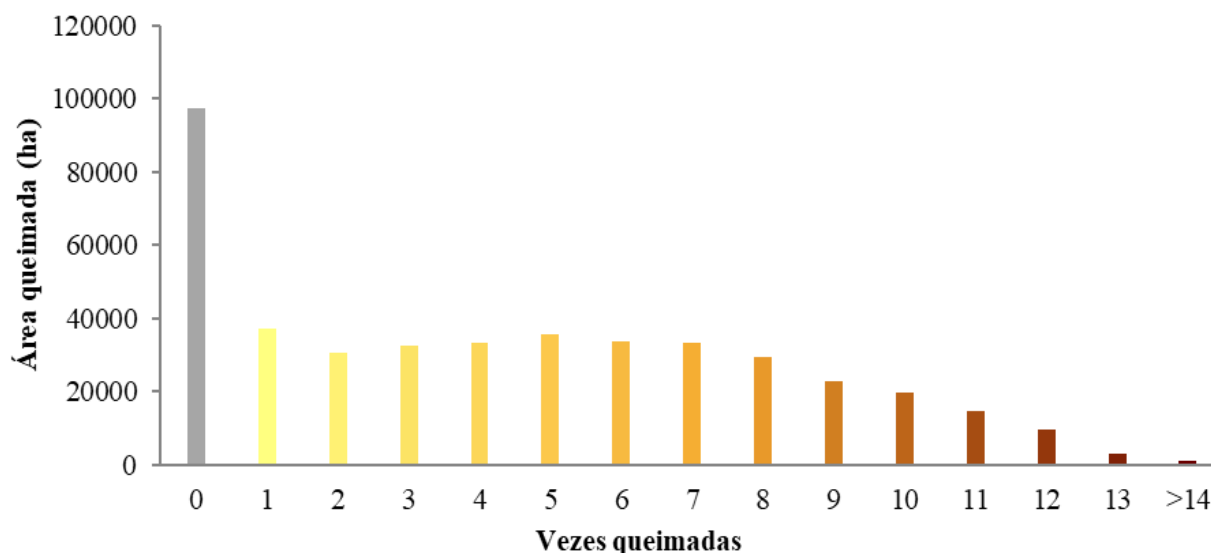
Fonte: Autoria própria, 2020.

As regiões centro-oeste e oeste do perímetro do ECCA foram as que apresentaram maior foco de ocorrência. Porém também foram evidenciados focos de ocorrências de queimadas nas áreas próximas à Estrada do Estanho. Quando verificada a área queimada por cada categoria de

ocorrência, é possível observar que as áreas que apresentaram de 15 a 21 ocorrências de queimas na série temporal correspondem a 9,67 km². É perceptível que o ECCA apresenta subtotaís bem distribuídos de ocorrência de queimas entre áreas que se queimaram entre 1 a 8 vezes na série, destacando-se ainda que 22% da área não apresentou queima durante a série temporal estudada (975,6 km²).

O máximo de ocorrências dentro do perímetro do ECCA foi de 21 queimas. Destaca-se também algumas áreas específicas em que não se registraram queimadas na série temporal, associadas principalmente a áreas de vegetação ciliar florestal mais densa. Espacializar e entender os intervalos de queimas dos ecossistemas de savana é um fator muito importante, já que pode influenciar na variação das fisionomias de vegetação presentes no ambiente, sendo que a ausência do fogo ou a presença de frequências muito baixas favorecem o estabelecimento de lenhosas (MORRISON et al., 1995). Este efeito de adensamento lenhoso pode afetar negativamente as espécies de áreas abertas e consequentemente ter impacto sobre a biodiversidade da área (ABREU et al., 2017; ROSAN et al., 2019).

Figura 4 - Áreas queimadas no período de 1984-2019, subdivididas por categorias de número de ocorrências.



Fonte: Autoria própria, 2020.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os procedimentos metodológicos aplicados permitiram atingir os objetivos demarcados, mapeando e analisando os padrões espaço-temporais de áreas queimadas do maior enclave de savana da Amazônia Meridional. A análise da série completa revela que um total de 19097 km² queimaram no ECCA no período de 1984-2019, demonstrando a relevância deste elemento na dinâmica deste ecossistema.

No mapeamento anual, a área queimada de determinado ano acaba atuando no controle ou inclusive na delimitação do que se detecta como queimado no ano seguinte. Anos de grandes picos de áreas queimadas da série geralmente são precedidos de anos com índices bem baixos

de queimas ocorridos no ano anterior. Os anos de 1988, 2005 e 2014 ressaltam grandes picos da série, onde cifras superiores a 35% da área total do enclave foram afetadas.

Ainda assim, dentro dos 36 anos estudados, partes do ECCA (22%) permanecem sem registro de queima, compostos principalmente de áreas de média-alta e alta cobertura vegetal arbórea. Estas áreas estão situadas principalmente em áreas de bordas de cursos de água mais densos (vegetação ciliar) e outros fragmentos florestais nas transições com áreas de floresta tropical do enclave. A detecção destas áreas é de muita importância para que se possa realizar estudos futuros com informações de campo que comparem áreas com distintas frequências de fogo, podendo ser relacionados com aspectos da flora, fauna e solos.

Em conclusão, destacou-se o uso de séries multitemporais de sensoriamento remoto para o mapeamento e análise de áreas queimadas, gerando relevantes informações para a gestão territorial destas áreas. Além disso, faz-se necessário cada vez mais aprimorar tais métodos de monitoramento remoto para que assim seja possível a obtenção mais precisa e rápida de dados de tão grande importância para a compreensão da dinâmica dos ecossistemas.

REFERÊNCIAS

ABREU, R. C. R.; HOFFMANN, W. A.; VASCONCELOS, H. L.; PILON, N. A.; ROSSATTO, D. R.; DURIGAN, G. The biodiversity cost of carbon sequestration in tropical savanna. **Science Advances**, v. 3, p. 1–7, 2017.

ALVARADO, S.T.; FORNAZARI, T.; CÓSTOLA, A.; MORELLATO, L.P.C.; SILVA, T.S.F. Drivers of fire occurrence in a mountainous Brazilian cerrado savanna: Tracking long-term fire regimes using remote sensing. **Ecological Indicators**, v. 78, p. 270–281, 2017.

ALVES, D. B.; PÉREZ-CABELLO, F. Multiple remote sensing data sources to assess spatio-temporal patterns of fire incidence over Campos Amazônicos Savanna Vegetation Enclave (Brazilian Amazon). **Science of The Total Environment**, v. 601–602, p. 142–158, dez. 2017.

ALVES, D.B.; PÉREZ-CABELLO, F.; RODRIGUES MIMBRERO, M.; FEBRER-MARTÍNEZ, M. Accuracy assessment of the latest generations of MODIS burned area products for mapping fire scars on a regional scale over Campos Amazônicos Savanna Enclave (Brazilian Amazon). **Journal of Applied Remote Sensing**, 12, 1–21, 2018.

ARAGÃO, L.E.O.C.; MALHI, Y.; BARBIER, N.; LIMA, A.; SHIMABUKURO, Y.E.; ANDERSON, L.; SAATCHI, S. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, n. 363, p. 1779–85, 2008.

ARCHER, S.R.; ANDERSEN, E.M.; PREDICK, K.I.; SCHWINNING, S.; STEIDL, R.J.; WOODS, S.R. Woody Plant Encroachment: Causes and Consequences, In: BRISKE, D.D. (Ed.), **Rangeland Systems: Processes, Management and Challenges**, Springer Series on Environmental Management. Springer International Publishing, Cham, Switzerland, p. 25–84, 2017.

ARGIBAY, D.S.; SPARACINO, J.; ESPINDOLA, G.M. A long-term assessment of fire

regimes in a Brazilian ecotone between seasonally dry tropical forests and savannah. **Ecological Indicators**, v. 113, p. 1-13, 2020.

BASTARRIKA, A.; ALVARADO, M.; ARTANO, K.; MARTINEZ, M. P.; MESANZA, A.; TORRE, L.; RAMO, R.; CHUVIECO, E. BAMS: a tool for supervised burned area mapping using Landsat data. **Remote Sensing**, v. 6, p. 12360–12380, 2014.

BOND, W. J.; KEELEY, J. E. Fire as a global ‘herbivore’: the ecology and evolution of flammable ecosystems. **Trends in ecology & evolution**, v. 20, n. 7, p. 387-394, 2005.

CARNEIRO FILHO, A. Cerrados amazônicos: fósseis vivos? Algumas reflexões. **Revista do Instituto Geológico**, v. 14, n. 1, p. 63–68, 1993.

COUTINHO, L. M. Fire in the Ecology of the Brazilian Cerrado. In: GOLDAMMER, J. G. (Ed.). **Fire in the Tropical Biota**. Berlin: Springer, 1990. p. 82–105.

CONGALTON, R.G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, n. 37, p. 35-46, 1991.

FIDELIS, A.; PIVELLO, V. R. Deve-se usar o fogo como instrumento de manejo no Cerrado e Campos Sulinos? **Biodiversidade Brasileira**, v. 1, n. 2, p. 12–25, 2011.

FIDELIS, A.; ALVARADO, S.; BARRADAS, A.; PIVELLO, V.. The Year 2017: Megafires and Management in the Cerrado. **Fire**, n. 1, p. 49-60, 2018.

ICMBIO, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Plano de Manejo - Parque Nacional dos Campos Amazônicos**. Brasília, Brasil: Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2016.

MORRISON, D. A.; CARY, G. J.; PENGELLY, S. M.; ROSS, D. G.; MULLINS, B. J.; THOMAS, C. R.; ANDERSON, T.S.. Effects of fire frequency on plant species composition of sandstone communities in the Sydney region: Inter-fire interval and time-since-fire. **Australian Journal of Ecology**, v. 20, n. 2, p. 239-247, 1995.

PAUSAS, J. G.; KEELEY, J. E. A burning story: The role of fire in the history of life. **BioScience**, v. 59, n. 7, p. 593–601, 2009.

RAMOS-NETO, M. B.; PIVELLO, V. R. Lightning fires in a Brazilian Savanna National Park: rethinking management strategies. **Environmental Management**, v. 26, n. 6, p. 675–684, 2000.

RATTER, J. A.; BRIDGEWATER, S.; RIBEIRO, J. F. Analysis of the floristic composition of the Brazilian cerrado vegetation: comparison of the woody vegetation of 376 areas. **Edinburgh Journal of Botany**, n. 60, p. 57–109, 2003.

ROSAN, T. M.; ARAGÃO, L. E. O. C.; OLIVERAS, I.; PHILLIPS, O. L.; MALHI, Y.; GLOOR, E.; WAGNER, F. H. Extensive 21st-Century Woody Encroachment in South America’s Savanna. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 12, p. 6594–6603, 2019.

SEXTON, J.O.; SONG, X.-P.; FENG, M.; NOOJIPADY, P.; ANAND, A.; HUANG, C.; KIM, D.-H.; COLLINS, K.M.; CHANNAN, S.; DIMICELI, C.; TOWNSHEND, J.R. Global, 30-m resolution continuous fields of tree cover: Landsat-based rescaling of MODIS Vegetation Continuous Fields with lidar-based estimates of error. **International Journal of Digital Earth**, v. 6, n. 5, p. 427–448.

SCHMIDT, I.B.; MOURA, L.C.; FERREIRA, M.C.; ELOY, L.; SAMPAIO, A.B.; DIAS, P.A.; BERLINCK, C.N. Fire management in the Brazilian savanna: First steps and the way forward. **Journal of Applied Ecology**, p. 1-7, 2018.

SCOTT, A. C.; GLASSPOOL, I. J. The diversification of Paleozoic fire systems and fluctuations in atmospheric oxygen concentration. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 103, n. 29, p. 10861-10865, 2006.

SIMON, M.F.; GREYER, R.; DE QUEIROZ, L.P.; SKEMA, C.; PENNINGTON, R.T.; HUGHES, C.E. Recent assembly of the Cerrado, a neotropical plant diversity hotspot, by in situ evolution of adaptations to fire. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, n. 106, 20359–20364, 2009.

TRIGG, S.; FLASSE, S. Characterizing the spectral-temporal response of burned savannah using in situ spectroradiometry and infrared thermometry. **International Journal of Remote Sensing**, n. 21, 3161–3168, 2000.

USGS, United States Geological Survey. **Landsat Science Products**, 2020. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat>>. Acesso em 21 de janeiro de 2020.

WILLIAMS, A. A. J.; KAROLY, D. J.; TAPPER, N. The Sensitivity of Australian Fire Danger to Climate Change. **Climatic Change**, v. 49, n. 1–2, p. 171–191, 2001.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, processo n. 2019/07357-8) e ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq, processo n. 441968/2018-0), pelo financiamento de pesquisas conduzidas no Parque Nacional dos Campos Amazônicos.