



Queima de biomassa no bioma Amazônia: análise da injeção e dispersão de plumas de fumaça na atmosfera

Biomass burning in the Amazon biome: analysis of the injection and dispersion of smoke plumes in the atmosphere

Gustavo Domingos Zanin^{1,2} , Francielle da Silva Cardozo² , Gabriel Pereira^{1,2} ,
Viviane Valéria da Silva² , Paulo Ricardo Rufino² , Lucas Luan Giarola²

¹Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

²Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, Minas Gerais, Brasil

E-mail: franciellecardozo@ufsj.edu.br (FSC); pereira@ufsj.edu.br (GP);

vi.meioambiente@gmail.com (VVS); paulorufino@usp.br (PRR);

giarola@aluno.ufsj.edu.br (LLG)

*E-mail para correspondência: gustavozanin@usp.br

Recebido (Received): 03/08/2021

Aceito (Accepted): 24/05/2022

Resumo: Os gases traços liberados pela queima de biomassa afetam significativamente o meio ambiente, alterando o balanço de energia, os ciclos biogeoquímicos e o clima. Partindo deste fato, com o objetivo de identificar o período e as principais áreas afetadas por entradas de plumas de aerossóis de queimada na atmosfera do bioma Amazônia e de analisar as dinâmicas de uso e ocupação do solo nas principais áreas de emissões, foram analisadas imagens do sensor *Multangle Imaging Spectro Radiometer* (MISR) a bordo do Satélite TERRA, com resolução de 275 m em nove ângulos, variando de 0° nadir a 70° fora do nadir e, posteriormente, comparadas a dados oriundos do projeto MapBiomass. Com o software MISR *INteractive eXplorer* (MINX) foram processadas as alturas das plumas, permitindo a criação de mosaicos multitemporais. Posteriormente, a partir de um programa originado em IDL/ENVI obteve-se os dados de interesse, como a localização, a potência radiativa do fogo e a altura de injeção de cada pluma. Após o processamento inicial, sucedeu a conversão dos dados e a inserção em Sistemas de Informações Geográficas (SIG), sobrepondo estes dados com os demais, originários do MapBiomass. Nesse contexto, ressalta-se que o trabalho realizado pode servir como um importante banco de dados para a visualização e análise da distribuição de fenômenos, auxiliando na tomada de decisões e posteriores ações de gestão e redução de possíveis riscos à sociedade.

Palavras-chave: Modelagem Atmosférica. Aerossóis. Queimadas. MISR.

Abstract: The trace gases released by biomass burning can affect the environment significantly, altering the energy balance, biogeochemical cycles and the climate. Based on this fact, we designed as a goal try to identify the period and the main areas affected by inputs of aerosol plumes from burning in the atmosphere of the Amazon biome and to analyze the dynamics of land use and occupation in the main areas of emissions. Considering that pursuit, images from the *Multangle Imaging Spectro Radiometer* (MISR) sensor on board the TERRA satellite were analyzed, with 275 m resolution at nine angles, ranging from 0° nadir to 70° out of nadir, and subsequently compared to data from the MapBiomass project. Using the MISR *INteractive eXplorer* (MINX) software, we processed the plume heights, allowing the creation of multitemporal mosaics. Subsequently, we obtained, from a program originated in IDL/ENVI, the data of interest, such as the location, the radiative power of the fire, and the injection height of each plume. After the initial processing, the data were converted and inserted into Geographic Information Systems (GIS), crossing these data with others, originating from MapBiomass. In this context, it is noteworthy that the work done can serve as an important database for visualization and analysis of the distribution of phenomena, assisting in decision-making and subsequent management actions and reduction of possible risks to society.

Keywords: Atmospheric Modeling. Aerosols. Burns. MISR.

1. Introdução

A queima de biomassa é um fenômeno global e, naturalmente, desempenha um papel fundamental na dinâmica terrestre e atmosférica. No entanto, as atividades antrópicas têm influenciado no regime das queimadas ao utilizar o fogo como instrumento de manejo para realização de atividades agrícolas e pecuárias, até mesmo de maneira criminosa. Sendo assim, atualmente, a operação da queimada ocorre principalmente em conjunto com o desmatamento da vegetação natural, apresentando grande variabilidade temporal e espacial, com o objetivo de inserção e manutenção de áreas destinadas à agropecuária ou outras atividades antrópicas (COSTA; LIMA, 2012; CARDOZO *et al.* 2014; KIM *et al.* 2016; NETO; COUTINHO; MARENGO, 2017; PURNOMO *et al.* 2017).

Os gases traços liberados pelas queimadas (CO, CO₂, CH₄, O₃ troposférico, hidrocarbonetos não-metanos, ácido nítrico, entre outros) afetam significativamente o meio ambiente, alterando o balanço de energia, os ciclos biogeoquímicos e o clima, além de ocasionar problemas de saúde em populações localizadas nas áreas onde estes gases e aerossóis escoam (ALAM; TRAUTMANN; BLASCHKE, 2011).

Assim sendo, durante a última década, há um interesse significativo na busca pela compreensão do papel dos aerossóis no clima e na química atmosférica. Os efeitos climáticos destas partículas estão relacionados com suas propriedades físicas e de tamanho, albedo da superfície e altitude relativa entre as camadas de aerossóis e nuvens. Portanto, caracterizar os aerossóis opticamente é uma forma de auxiliar no processo de definição do aerossol presente em um determinado local, compreendendo melhor os processos de queima de biomassa ocorridos ali (ICHOKU; KAHN; CHIN, 2012; BIBI *et al.* 2015; PEREIRA *et al.* 2016).

Dentre as diferentes formas de se analisar as características e a distribuição espacial dos aerossóis na atmosfera, o sensoriamento remoto está entre as mais utilizadas. Este, tornou-se parte integrante do monitoramento contínuo e seu uso possibilita um amplo monitoramento em diferentes escalas, auxiliando na obtenção de dados sobre a distribuição espacial, temporal e padrões necessários para apoio em estudos de impactos ambientais. Avanços recentes fornecem meios para avaliar sistematicamente as alturas de injeção de fumaça e processos de transporte que misturam esses aerossóis na troposfera (VAN DER WERF *et al.* 2006; XU *et al.* 2010; VAN DER WERF *et al.* 2017).

Um destes avanços emergentes no sensoriamento remoto por satélite é a recuperação sistemática de propriedades de aerossol sobre a terra pelo MISR, a bordo do Satélite TERRA. Com imagens em vários ângulos, o MISR fornece um método exclusivo de medir a altura da fumaça, sendo o primeiro e único instrumento desse tipo a orbitar a Terra (KAHN; GAITLEY, 2015). Diversos estudos avaliaram a qualidade das alturas recuperadas com o sensor MISR, como, por exemplo, Martin e colaboradores (2018) que, através de estudos de caso, comprovaram a consistência dos resultados obtidos com estas recuperações, além de terem fornecido exemplos apropriados para explicar como obter as melhores análises com os produtos fornecidos.

Nesse contexto, a capacidade de investigar a geometria e a dinâmica das plumas de fumaça está se tornando cada vez mais importante para os estudos climáticos e da qualidade do ar. A altura das plumas de aerossóis produzidas por queimadas, incêndios florestais, erupções vulcânicas e tempestades de poeira têm uma grande influência sobre para onde as partículas são transportadas e os impactos ambientais gerados. Sendo assim, a altura da pluma de aerossol é uma variável fundamental para modelos de transporte químico atmosférico (WOOSTER *et al.* 2005; FIELD *et al.* 2009; MARTIN *et al.* 2012).

Diante disso, esse trabalho reúne resultados, análises e discussões provenientes de pesquisas nas quais foram mensuradas as alturas de injeção das plumas de fumaça oriundas de queimadas e incêndios florestais ocorridos no bioma Amazônia, com base em mais de 1.000 alturas de plumas recuperadas utilizando imagens estéreis do sensor *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer* (MISR). Objetiva-se aqui apresentar uma análise desta altura da injeção das plumas de fumaça na atmosfera, na região do bioma, verificando, também, por meio de dados provenientes do MapBiomass, se existe alguma relação entre a ocorrência da injeção de aerossóis e as dinâmicas de cobertura e uso do solo.

1.1 Caracterização da área de estudo

O bioma Amazônia (**Figura 1**) compreende em sua área a mais extensa bacia hidrográfica e a maior floresta tropical contínua do mundo, sustentando uma vasta diversidade biológica. Sua grande extensão territorial abrange os estados brasileiros do Pará, Amazonas, Amapá, Acre, Rondônia e Roraima, além de algumas partes do Maranhão, Tocantins e Mato Grosso (YAHN FILHO, 2005; IBGE, 2019). A área do bioma também se estende por países como Bolívia, Colômbia, Equador, Guiana Francesa, Peru, Suriname e Venezuela (RAISG, 2020).

É pertinente assumir que a definição e delimitação da área podem ser realizadas a partir de diferentes perspectivas. O recorte espacial utilizado para este trabalho se dá pelo limite definido pela “Rede de Informações

Socioambientais Georreferenciadas da Amazônia”, considerando critérios de três diferentes ordens, sendo eles: biogeografia, bacia hidrográfica e limites político-administrativos, de maneira a resultar em um escopo geográfico que abrange uma área de 7.004.120 km².

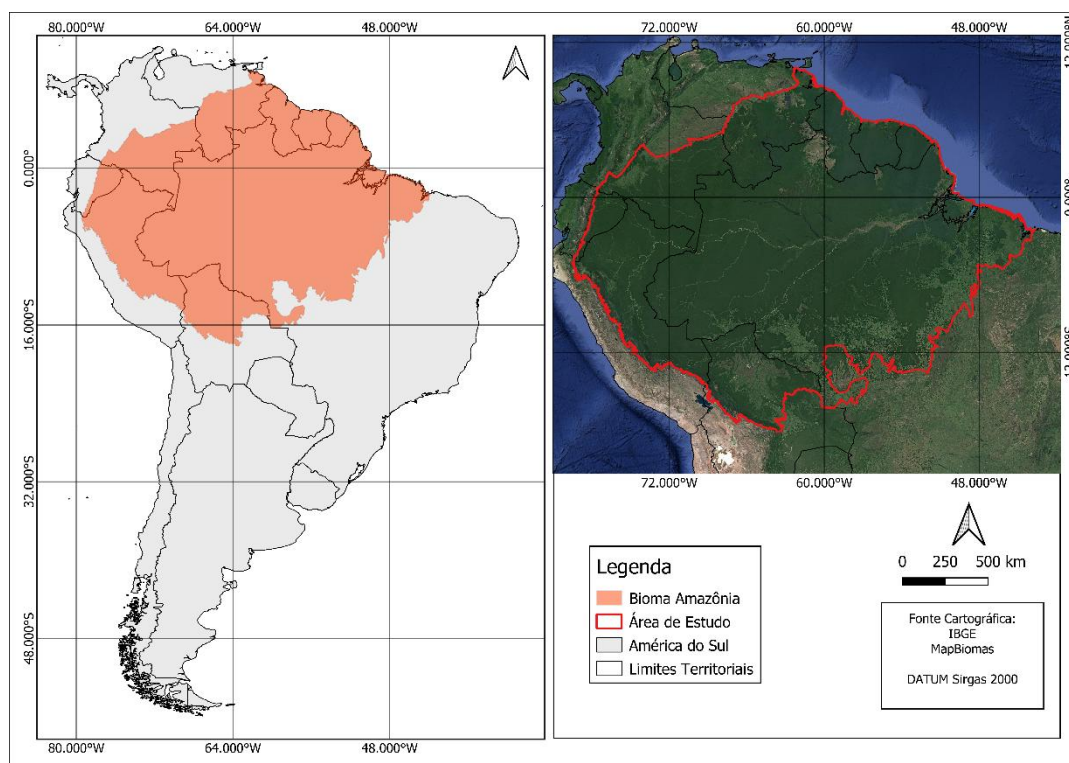


Figura 1: Dimensão da área de estudo – Recorte do bioma Amazônia.

Quanto às características do bioma Amazônia destacam-se: o clima, que possui caráter quente e úmido, verificando altos níveis de temperatura (média anual de 27°C), de precipitação pluvial (por volta de 3500mm/ano) e de evapotranspiração. Além disso, a fitofisionomia predominante do bioma Amazônia se trata da Floresta Ombrófila Densa, caracterizada por cobertura vegetal de floresta tropical úmida e árvores altas (FIGUEIRÓ, 2015).

2. Materiais e métodos

2.1 Materiais utilizados

Com o objetivo de investigar a altura de injeção das plumas de fumaça oriundas de queimadas e incêndios florestais no bioma Amazônia, com uma análise temporal relativa ao biênio 2015-2016, foram utilizadas imagens do sensor MIRS, visando analisar a altitude de emissão, características de dispersão e propriedades de aerossóis emitidos. O MIRS, com capacidade de observação angular, foi lançado a bordo do satélite TERRA em dezembro de 1999 e iniciou a aquisição de imagens em fevereiro de 2000 (DINER *et al.* 1998).

O instrumento possui capacidade de aquisição de imagens em 4 bandas espectrais, a 446, 558, 672 e 867 nm (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo) em nove ângulos, no nadir (câmera An, 0 °) e 8 observações off-nadir (câmeras Af, Bf, Cf, Df, Ba, Ca e Da). A câmera nadir produz imagens com resolução de 275 m em todas as quatro bandas. As 8 câmeras off-nadir produzem dados de resolução de 275 m somente na banda vermelha e imagens de resolução de 1,1 km nas bandas azul, verde e infravermelho próximo (AIKEN *et al.* 2004; FIELD *et al.* 2009).

Para a recuperação das plumas foram obtidos os seguintes produtos MIRS: produto de Radiância (GRP_Terraim), o produto referente à parâmetros geométricos (MIB2GEOP), o produto contendo dados geográficos como elevação digital e máscara de tipo de superfície (MIANCAGP). Todos os produtos MIRS são gravados no formato HDF e podem ser baixados gratuitamente (MAZZONI *et al.* 2007).

Além dos produtos MIRS, foram obtidos os dados de localização dos focos de queima de biomassa, a partir do produto MOD14, e os dados de Uso e Cobertura da Terra, obtidos do produto MCD12Q1. Derivados do sensor

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), a bordo da plataforma TERRA e lançado pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) em 18 de dezembro de 1999 e 4 de maio de 2002, respectivamente, sendo uma alternativa para fazer o monitoramento da distribuição regional e global dos aerossóis. O sensor possui 36 diferentes bandas espectrais que variam de 0,4 a 14,4 μm , em três resoluções espaciais, sendo 2 bandas espectrais com 250 m, 5 bandas espectrais com 500 m e 29 bandas espectrais com 1000 m.

Os produtos de fogo MOD14 (*MODIS Thermal Anomalies*) são disponibilizados gratuitamente pela NASA e distribuídos digitalmente pelo LP DAAC. Com resolução espacial nominal de 1 km, contém as informações sobre os focos de queimada e a potência radiativa do fogo (do inglês *Fire Radiative Power*, FRP) liberada no processo de combustão da biomassa (JUSTICE *et al.* 2002).

O FRP, componente radioativo da energia liberada pela queima da biomassa, pode ser medido por sensoriamento remoto. Este constitui-se como um indicador da quantidade de biomassa consumida na taxa de emissão de aerossóis e gases traços liberados para a atmosfera e no indicador da severidade do fogo. Ao se conhecer a distribuição de temperatura no interior de um pixel, a FRP integrada em todos os comprimentos de onda, pode ser calculada pela equação 1:

$$FRP = \varepsilon \sigma \sum_{i=1}^n A_n T_n^4 \quad (\text{Equação 1})$$

em que FRP representa a potência radiativa do fogo ($[\text{J.s}]^{-1}$), σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ J.s}^{-1}.\text{m}^{-2} [\text{K}]^{-4}$), A_n representa a área fracional (m^2) da n -ésima componente termal, T_n^4 é a temperatura (em Kelvin, K) da n -ésima componente e ε representa a emissividade. Ressalta-se que a integração da FRP no tempo é denominada de Energia Radiativa do Fogo (*Fire Radiative Energy* - FRE) (WOOSTER *et al.* 2005).

Ademais, objetivando analisar possíveis relações entre a localização espacial de plumas de fumaça e as dinâmicas de cobertura e uso do solo, foram utilizados dados adquiridos do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil - MapBiomass, criado em 2015 pelo Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) do Observatório do Clima em parceria com *Google Earth Engine*. O MapBiomass gera relatórios anuais de transições de cobertura e uso do solo, com dados anuais das mudanças ocorridas desde o ano de 1985 a 2021, disponibilizados em plataforma web de consulta pública (MAPBIOMASS, 2022).

2.2 Metodologia

O processo para a geração da altura das plumas de fumaça é realizado por meio computacional e dirigido manualmente. Para obter as plumas de fumaça foi utilizado o programa *MISR Interactive eXplorer* (MINX), software desenvolvido no *JetPropulsion Laboratory* (JPL), da NASA, e distribuído através da *Open Channel Foundation*. O programa é um instrumento de uso geral para visualizar e analisar dados MISR, e opera como uma ferramenta especializada para analisar propriedades de plumas de aerossol (NELSON *et al.* 2008; NELSON *et al.* 2013).

Neste software, as plumas de fumaça são digitalizadas nas imagens do sensor MISR, proporcionando recuperações com detalhes espaciais suficientes para fornecer informações significativas para estudos da dinâmica das plumas e para estudos climatológicos em larga escala, fornecendo aos usuários a capacidade de recuperar localmente alturas e ventos para estudos detalhados de fumaça, poeira e cinzas vulcânicas, bem como nuvens, em resolução espacial mais alta e com maior precisão possível (NELSON *et al.* 2013).

No MINX, o primeiro passo foi realizar a correção e calibração das câmeras por meio do produto MIANCAGP. O segundo passo foi determinar o tipo de cobertura da terra na fonte de emissão, para isso foi utilizado o produto MCD12Q1, que emprega 17 classes diferentes de cobertura da terra, definidas pelo programa *Geosphere Biosphere Programme* (SULLA-MENASHE, 2018).

O produto MOD14 foi carregado logo em seguida para indicar os focos de queimada e a potência radiativa do fogo. Ainda, antes de iniciar o processamento das plumas foi necessário carregar os produtos de Radiância (GRP_Terrain), o produto referente a parâmetros geométricos (MIB2GEOP).

O MINX exige que o usuário delinear a área da pluma e identifique a direção do vento (**Figura 2**), a partir da qual é realizada a correspondência nos dados da banda espectral vermelha (672 nm) e azul (446 nm) (NELSON *et al.* 2013).

O processamento das bandas vermelha e azul, permite estudar uma grande variedade de plumas. Os dados da faixa vermelha do MISR são adquiridos com resolução espacial de 275 m para todos os ângulos de visão e são mais eficazes para o estudo de plumas densas sobre o oceano, enquanto os dados da faixa azul são adquiridos em 1100 metros de resolução espacial em todas as câmeras, exceto a nadir. Nesse ponto, é pertinente ressaltar também que a faixa azul é preferida para o estudo de plumas menores e mais difusas (NELSON *et al.* 2013).

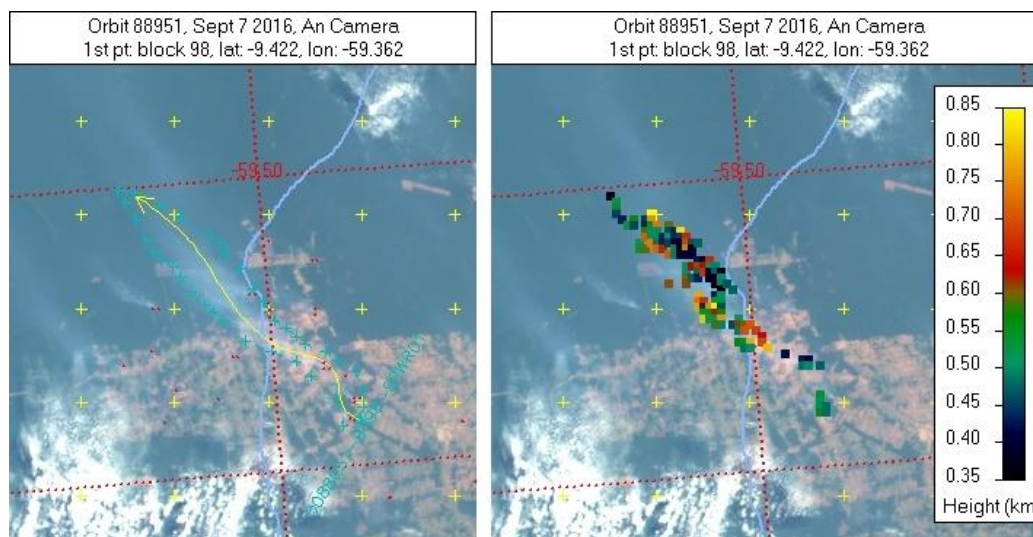


Figura 2: Exemplo de processamento da altura estéreo da pluma.

Os resultados do MINX proporcionam recuperações de altura ao longo do comprimento da pluma, o que permite a geração de perfis de dados que auxiliam na interpretação de dispersão dinâmica da pluma e as influências externas que afetam sua dispersão. Ambos os perfis compartilham um eixo de distância definido em relação ao ponto inicial digitalizado. Ainda, incorpora recursos que permitem aos usuários personalizar suas recuperações em gráficos para obter resultados sob diferentes condições de aerossol e superfície subjacente e, como resultado, são obtidos dados em formato .txt contendo diversas informações onde posteriormente são filtrados e selecionados, como a localização, a FRP e a altura de injeção de cada pluma.

A partir de um programa originado em IDL/ENVI (*Interactive Data Language*) foram filtrados e selecionados os dados de interesse dos arquivos .txt obtidos para análise, como a localização, a FRP e a altura de injeção de cada pluma. Ainda, foi elaborado um script, também na linguagem IDL, para geração de arquivos em shapefile, que possibilitou a criação de mapas permitindo a visualização espacial dos focos das plumas.

O tipo de vegetação pode desempenhar um papel importante nas alturas das plumas de fumaça, e, devido a isso, foram sobrepostos os dados de injeção de cada pluma com os dados de uso e cobertura da terra do projeto “Mapeamento Anual da Cobertura e Uso da Terra da Amazônia” (MAPBIOMAS, 2022).

O Projeto MapBiomas Amazônia (Mapeamento Anual da Cobertura e Uso da Terra da Amazônia) é uma iniciativa que envolve uma rede colaborativa de especialistas em uso da terra, sensoriamento remoto, GIS e programação. É baseado em computação em nuvem e classificadores automatizados encontrados no *Google Earth Engine* para gerar uma série temporal de mapas anuais de uso da terra e cobertura da terra da Amazônia. Os dados utilizados baseiam-se nos mapas Coleção 3, adquiridos através da plataforma do *Google Earth Engine*, mediante a elaboração e ajuste de scripts de aquisição, análise e exportação dos resultados. Na plataforma foi gerado o mosaico de uso e cobertura para os anos de 2015 e 2016 do sensor LANDSAT e a classificação foi gerada a partir de scripts pré-definidos, disponibilizados pelo fórum do projeto (<http://forum.mapbiomas.ecostage.com.br/>).

Ao final da etapa de classificação, foram sobrepostos os mapas exportados da plataforma com os arquivos em shapefile das plumas, adquiridas por meio do software ArcGIS 10.5, para a extração dos dados que subsidiaram as análises estatísticas.

3. Resultados e discussões

Após o processamento e filtragem das plumas digitalizadas com o script elaborado, foram obtidas um total de 1080 colunas de plumas pelo processamento na região amazônica, nos anos 2015 e 2016, entre os meses de julho a outubro. Esta seção do trabalho apresenta, em gráficos e mapas, um panorama geral dos resultados obtidos e expõe algumas das plumas de fumaça que mais se destacaram neste estudo, conforme os critérios apresentados

anteriormente, sugerindo interpretações de alguns dos fenômenos observados. A distribuição espacial dos focos de emissões mostrados na sequência de figuras, tornou-se fundamental para o entendimento acerca da localização e incidência de focos de queima de biomassa e, também, sobre o deslocamento das plumas desses eventos ocorridos no Bioma Amazônico para o biênio analisado.

Também foram selecionados dois casos específicos de focos em que as recuperações do MINX estão disponíveis em alta qualidade para um maior detalhamento de análise. Cada caso é identificado por data; UTC e horário local; órbita MISR; caminho e números de bloco. A qualidade de um caso é determinada pela espessura óptica do aerossol suficiente para que os recursos de contraste da pluma sejam claramente visíveis nas imagens e distintos da superfície. O critério de espessura óptica é avaliado através da inspeção visual de cada cena usando a função de animação da câmera MINX.

Os dois casos selecionados para este estudo são: (1) Pluma de fumaça gerada em 28 de setembro 2015 nas coordenadas 3°21'32.4"S; 59°49'22.8"W; (2) Pluma de fumaça gerada em 03 de setembro de 2016 nas coordenadas 8°39'36"S; 64° 52'15.6"W.

3.1 Mapeamento e processamento das plumas para o ano de 2015

A **Figura 3** apresenta a distribuição dos focos de origem das plumas entre os meses de julho a outubro para o ano de 2015, onde foram observadas no total 508 colunas de plumas para todo o bioma. As maiores concentrações ocorreram nos Estados do Pará, Mato Grosso, Rondônia e na parte central do Amazonas e parte do norte da Bolívia. As nuvens de fumaça durante esse período de queima intensa na região dos estados citados, eram espacialmente expansivas, altamente visíveis e facilmente digitalizadas, características já citadas por Gonzalez-Alonso *et al.* (2019), que caracterizam a distribuição vertical das emissões de queima de biomassa na Amazônia (2005-2012) durante a estação de queima de biomassa (julho-novembro). Na legenda do mapa abaixo, a escala de cores determina a altura em metros das plumas que variam desde algumas centenas de metros até casos em que se ultrapassa os 5000 metros acima do terreno em certas regiões.

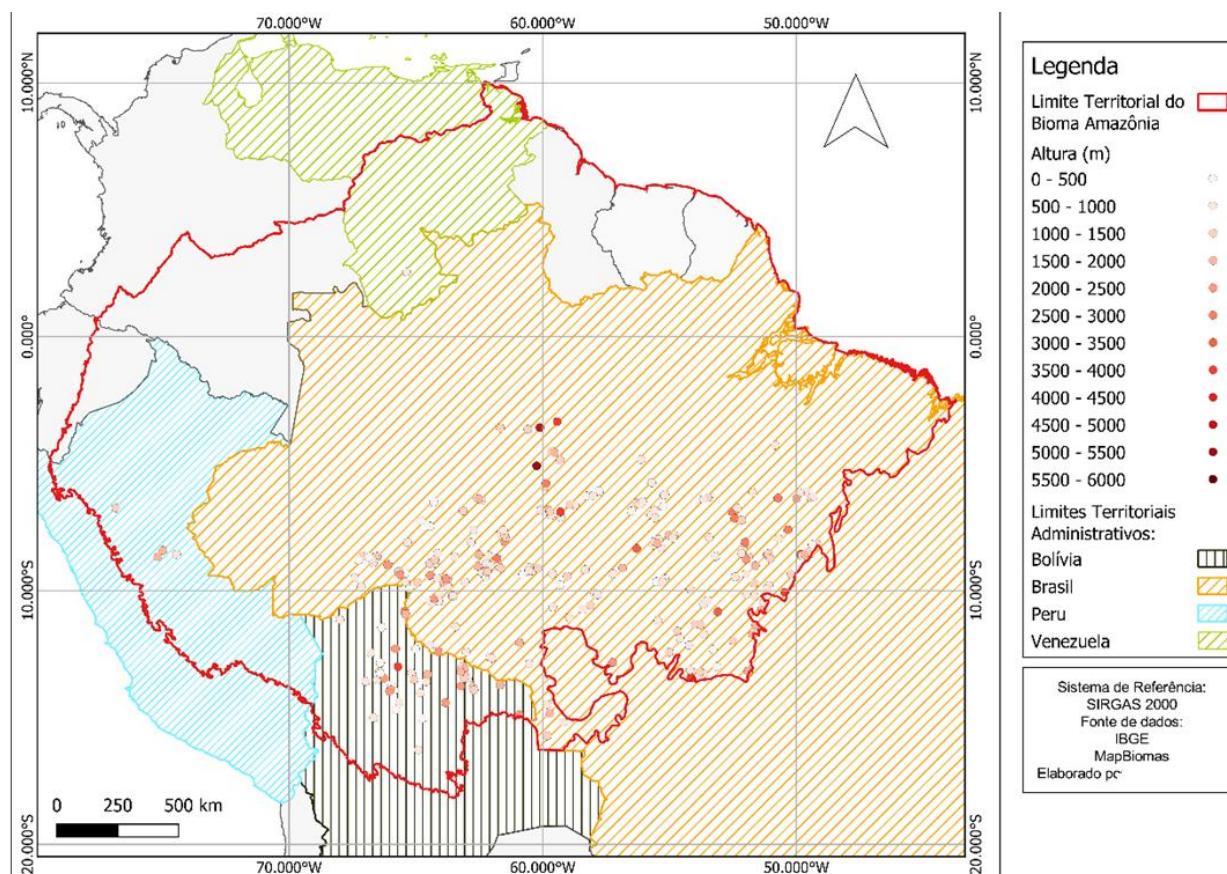


Figura 3: Distribuição espacial dos locais de emissões das plumas para o ano de 2015.

A altura média de todas as plumas registradas no bioma foi de 774 metros. A área amazônica brasileira foi a que registrou maior número de ocorrências. Esse resultado corrobora pesquisas anteriores (ARTAXO; SETZER, 1992; GONZALEZ-ALONSO *et al.* 2019), que há anos vêm apontando a significativa intensidade de queima de biomassa no bioma, principalmente dentro dos limites político-administrativos brasileiros. Estes autores justificam esses padrões em virtude da extensão territorial da área, mas, sobretudo, apontam a questão do afrouxamento de leis ambientais que ocorre cada vez com mais frequência e impetuosidade no país.

Quanto às alturas das plumas, verifica-se que estas foram altamente variáveis em relação ao período analisado, sendo que as maiores alturas registradas foram relativas a 5200m. Estatisticamente, as alturas das plumas de fumaça são substancialmente mais altas em incêndios florestais tropicais úmidos (1313 metros), do que em incêndios de pastagem (1139 metros), embora as plumas de fumaça de incêndio em pastagem representem a maior fração (42%) dos casos. A fim de comparar a distribuição mensal das alturas das plumas, e qual a classe da emissão, foi elaborado o gráfico de distribuição da altitude e data de emissão com a simbologia da classe, que pode ser visualizado na **Figura 4**.

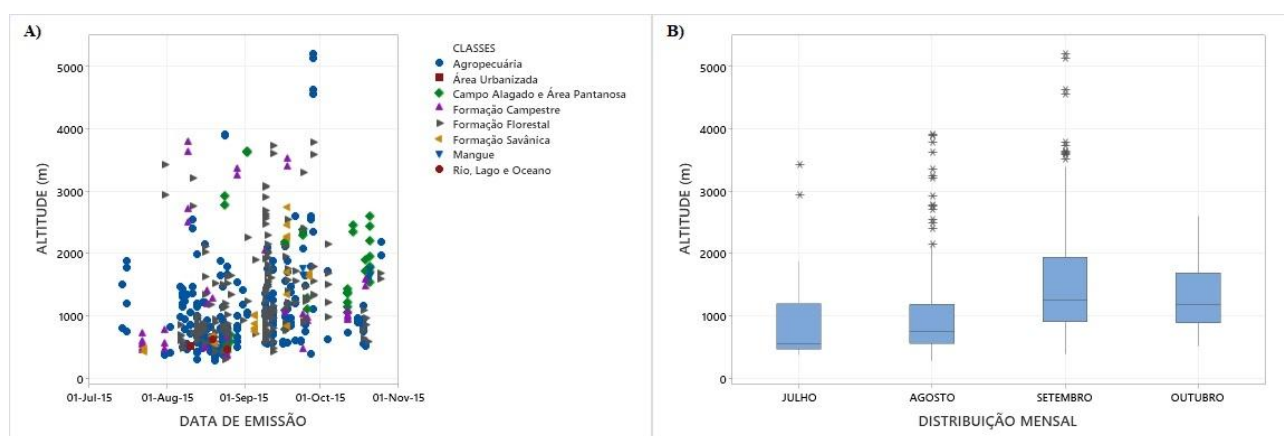


Figura 4: Distribuição mensal por altitude das recuperações de 2015: A) o gráfico de distribuição da altitude e data de emissão com a simbologia da classe; B) gráfico *box plot* de distribuição mensal das alturas das plumas

Ao avaliar o número de ocorrências, os maiores registros de injeção de pluma na atmosfera aconteceram no mês de setembro, seguido de agosto, outubro e julho com o menor registro entre os meses analisados. O aumento e redução de queima de biomassa parecem estar associados não somente a mudanças de uso e cobertura da terra por forças antropogênicas, mas também à redução mensal de chuva que contribuem para elevar a suscetibilidade da vegetação ao fogo, intensificando o uso do fogo nas atividades humanas contribuindo para aumento expressivo de queima de biomassa (BARBOSA *et al.* 2016).

Em uma análise mensal das emissões, o mês de julho (28 recuperações) apresentou uma média de altitude de 647 metros e registros de casos acima de 3400 metros. Para o mês de agosto (210 recuperações), a média das emissões foi de 664 metros, e apresentou casos com valores acima de 3900 metros. No mês de setembro, o principal mês de queimadas e incêndios na região, percebe-se um movimento das nuvens de fumaça com deslocamento para o norte do bioma, orientando-se no sentido ONO-ESE a 5° Sul. Nessas condições, os Estados do Pará, Mato Grosso e Rondônia e parte do norte da Bolívia, apresentam elevados níveis de concentração de focos de emissões de plumas de fumaça, sendo que o número de emissões recuperadas chegou ao total de 207 para o ano de 2015, com uma média de altitude superior a 866 metros e apresentando emissões acima de 3600 metros. Já nos registros do mês de outubro (67 recuperações), a média atingiu o valor de 885 metros, e apresentou recuperações de plumas acima de 2100 metros de altitude.

A área de estudo compreende 14 classes, de acordo com o projeto MapBiomas Amazônia (2022). Porém a incidência espacial dos focos de emissões de plumas de queimadas em 2015 ocorreram em 9 classes do projeto, sendo Agropecuária (42%), Formação Florestal (35%) e Formação Campestre (10%) com maiores indicadores de emissões, respectivamente.

Ainda de acordo com os dados oriundos do MapBiomas (2022), Pará e Mato Grosso são os estados com as maiores taxas de desmatamento, enquanto na região central da Amazônia não há ocorrência de emissões. Esse fato pode ser explicado por esta ser uma região pouco habitada, onde dificilmente há a ignição natural de uma queimada, devido aos altos índices de umidade e as copas densas que tornam a floresta resistente a propagação do fogo (COCHRANE; BARBER, 2009). Contudo, os mesmos autores chamam atenção para o fato de que a

exploração florestal, impulsionada pelas atividades humanas, pode deixar a floresta mais inflamável, originando um regime do fogo resultante tanto das mudanças climáticas como das alterações no manejo da terra, demonstradas na **Figura 5**.

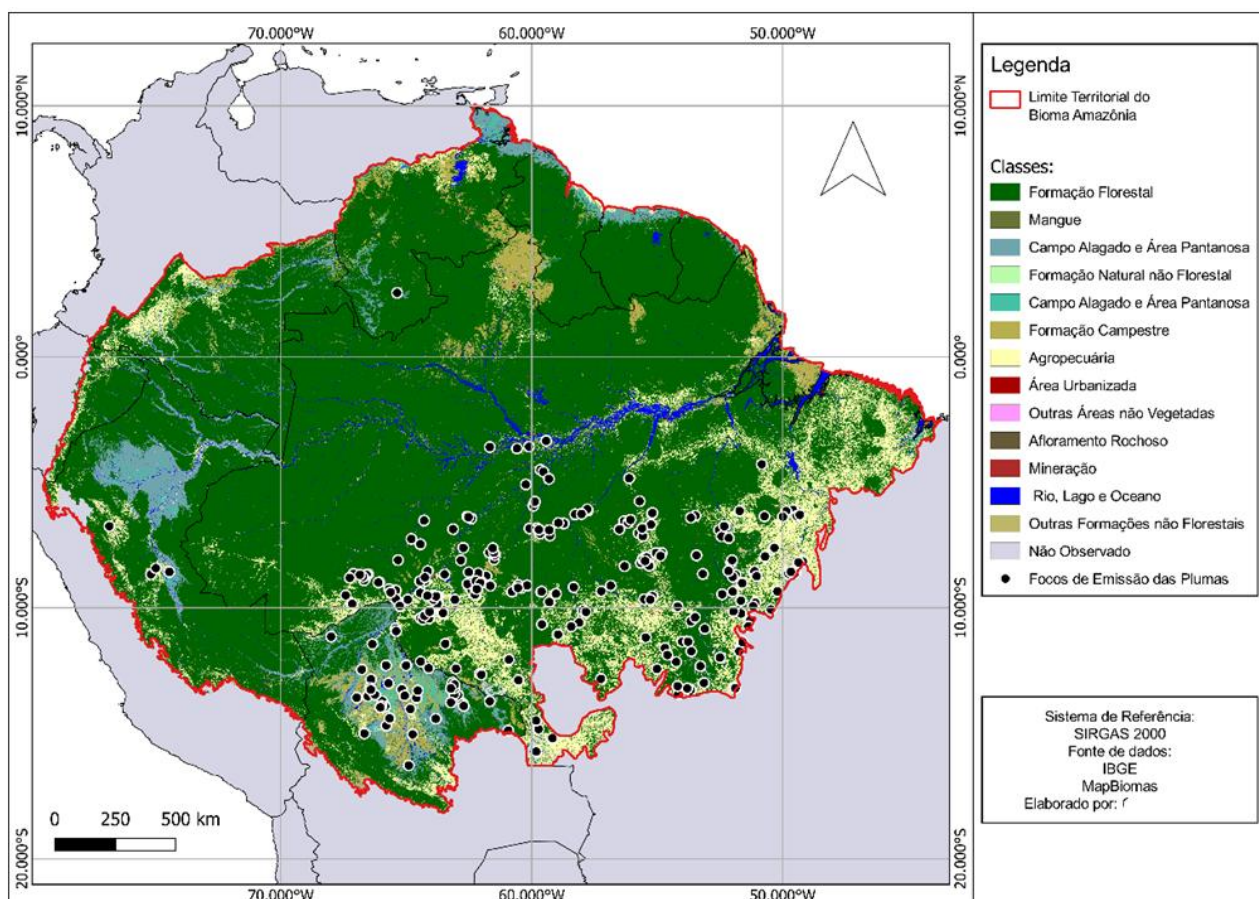


Figura 5: Distribuição espacial dos locais de emissões das plumas para o ano de 2015 e o uso e cobertura da terra para o mesmo ano.

3.1.1 Caso 1: 28 de setembro de 2015 (MISR Orbit 83927, path 230, block 93)

O caso de detecção de pluma de fumaça selecionado para discussão no ano de 2015 é mostrado na **Figura 6**, que apresenta uma captação bastante densa e longa. No quadro esquerdo está visualizada a imagem da câmera MISR nadir da captação da pluma de fumaça nas coordenadas $3^{\circ}21'32.4''S$; $59^{\circ}49'22.8''W$, distante cerca de 34 km ao sul da capital do estado do Amazonas, Manaus, capturada em 28 de setembro de 2015 durante a órbita da Terra 83927.

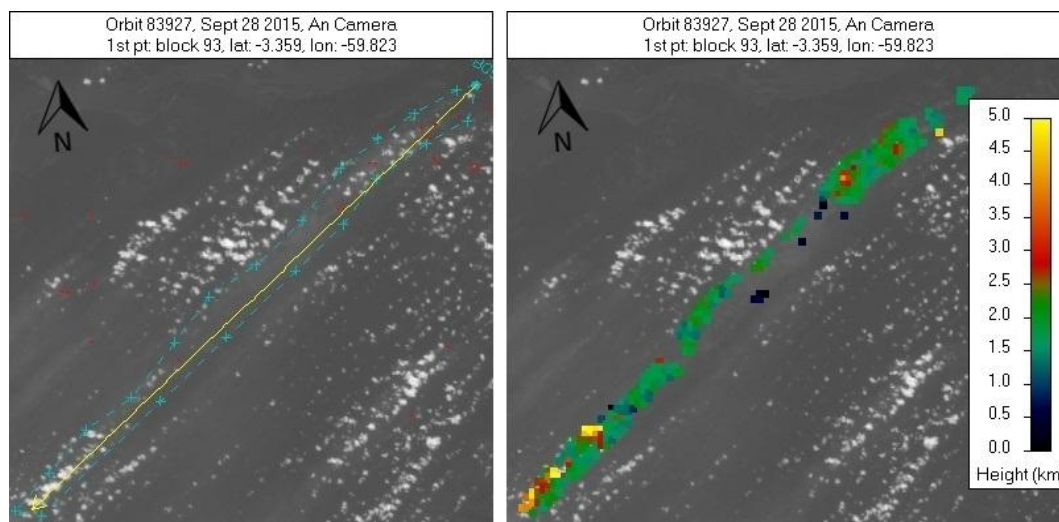


Figura 6: Registro de pluma em 28 de setembro de 2015, na órbita MISR 83927.

Numa trajetória retilínea em direção ao sudoeste do continente, percebe-se que a maioria dos pixels se concentram em torno de 2250 metros de altura. De acordo com o projeto MapBiomias (2022), o uso da terra para o ano do foco é descrito como área de formação florestal. As alturas estereoscópicas corrigidas pelo vento são mostradas na **Figura 7** e indicam uma pluma direcionada a SW que se estende por mais de 120 km a favor do vento, cobrindo uma área de 830 km² com perímetro de 269 km.

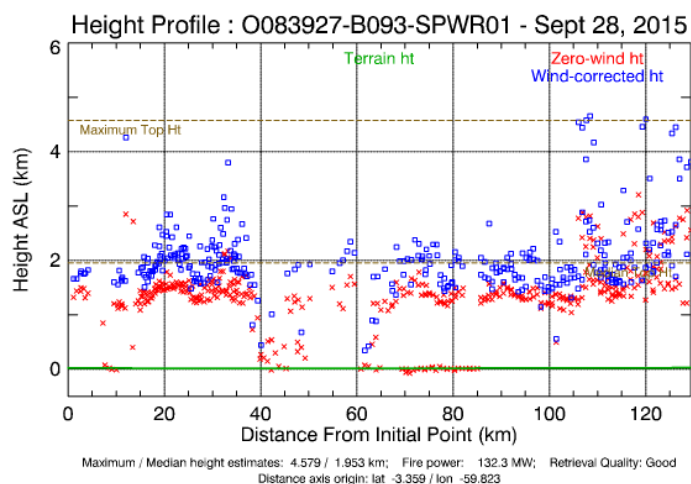


Figura 7: Perfil de altura (km), na vertical, e por distância do foco de emissão (km), na horizontal, para a pluma digitalizada na órbita 83927.

A **Figura 7** mostra os perfis de altura gerados pelo MINX para a pluma digitalizada na **Figura 6**. Analisando o transporte da mesma, é possível descrever que o valor máximo de altura registrado foi de 4300 metros de altura. Percebe-se que o transporte foi uniforme, desde o foco de emissão até os 120 km de distância, mantendo uma média de altura de 1900 metros.

3.2 Mapeamento e processamento das plumas para o ano de 2016

A **Figura 8** demonstra a distribuição espacial dos focos das plumas no bioma para os meses analisados no ano de 2016. Foram observadas 379 plumas de fumaça. Novamente, a escala de cores determina a altura em metros das plumas que também variam de algumas centenas de metros chegando a ultrapassar os 5000 metros acima do terreno em determinadas localidades.

Os resultados do processamento das plumas de fumaça para o ano de 2016 explicitam que a região amazônica no Centro-Oeste brasileiro (**Figura 8**) é a área com mais focos em relação ao bioma, sendo que as maiores concentrações ocorreram próximas as regiões do Arco do Desmatamento, contemplando os estados do Pará, Mato Grosso e Rondônia e parte do norte da Bolívia. Esse aspecto demonstra que, apesar de os padrões de distribuição nos dois anos terem sido parecidos, existem também importantes diferenças.

Essa análise espacial dos focos de emissões de plumas de fumaça no ano de 2016 é justificada pela grande quantidade de queimadas que ocorrem associados com a expansão agropecuária nessa região (MARENGO *et al.* 2010; CARDOZO *et al.* 2014). Ainda, é notório que a utilização da queima da biomassa na área de estudo ocorre principalmente em regiões de formação florestal, com destaque para áreas próximas de pontos já utilizados para agropecuária, corroborando o que foi discutido anteriormente neste texto. Essa relação pode ser visualizada na **Figura 9** e, posteriormente, também, na **Figura 10**.

A **figura 9** foi construída a fim de comparar a distribuição mensal das alturas das plumas através de um gráfico *box plot* e outro elaborado a partir de dados oriundos do MapBiomias (2022), contendo data de emissão e simbologia da classe de ocupação e uso do solo. Para o ano de 2016, a incidência espacial dos focos de emissões de plumas de queimadas ocorreu em 6 diferentes classes do projeto, sendo Agropecuária (36%), Formação Florestal (35%) e Formação Campestre (19%) respectivamente com maiores indicadores de emissões.

Verifica-se na totalidade que as plumas tiveram alturas significativamente variadas no período analisado. Nessa época, grande parte do Brasil encontra-se no período seco, com a precipitação trimestral acumulada variando entre 20 mm e 200 mm nos meses de julho/agosto/setembro em grande parte das regiões Norte e Centro-Oeste (SANTOS *et al.* 2018).

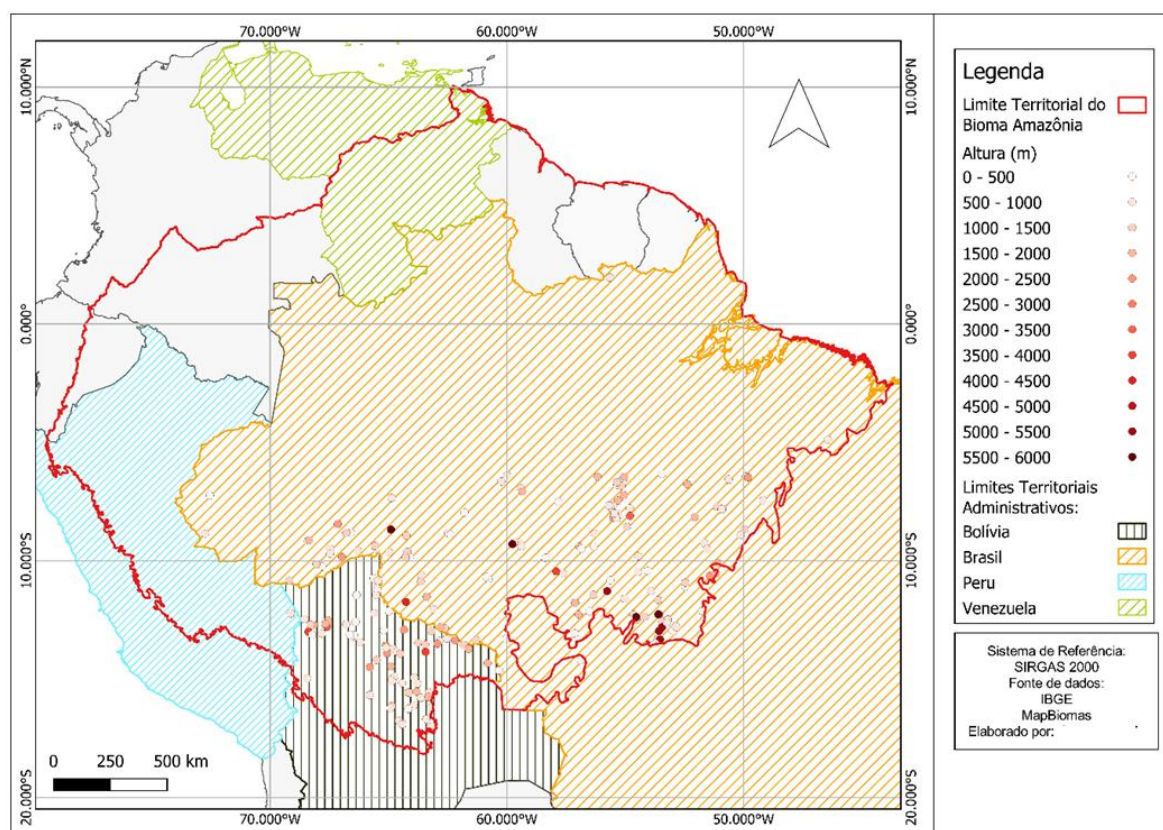


Figura 8: Distribuição espacial dos locais de emissões das plumas para 2016.

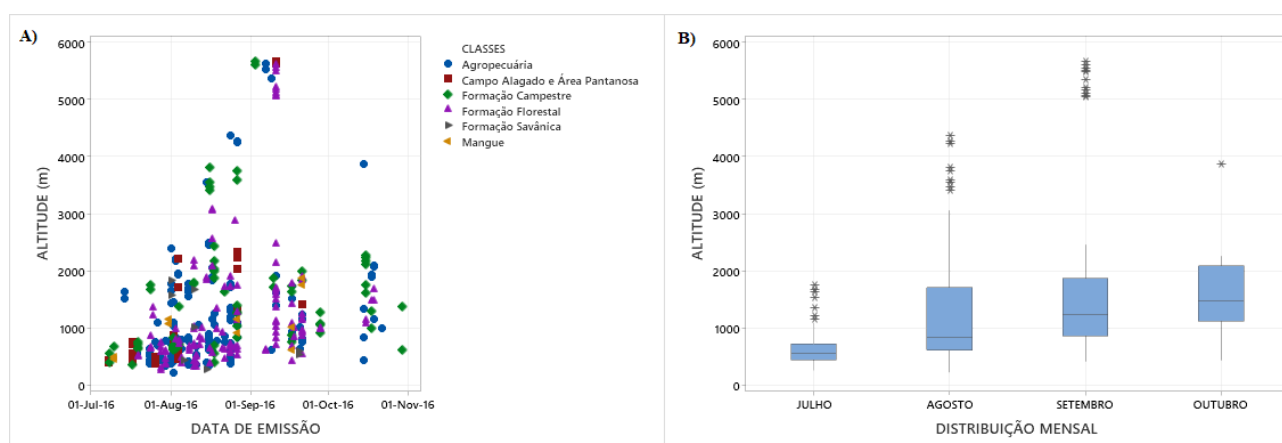


Figura 9: Distribuição mensal por altura para as recuperações de 2016.

No mês de julho, o território da Bolívia e o Estado do Mato Grosso, concentram grande parte dos focos de emissões de plumas de fumaça, com número superior a 60 focos e uma média de altitude no valor de 452 metros. Em agosto, a densidade de focos aumenta significativamente, com 204 emissões de plumas de fumaça. Entre as regiões com os maiores números de recuperações de plumas, pode-se citar, por exemplo, os estados de Rondônia, Mato Grosso, e também a parte norte do território amazônico da Bolívia, com a média de altitude de 765 metros, com casos ultrapassando o valor de 4300 metros.

Conforme já mencionado, no mês de setembro, as queimadas acompanham o regime de precipitação e deslocam-se para o norte do bioma. Nessas condições, os estados do Pará, Mato Grosso e Rondônia e parte do norte da Bolívia, apresentam elevadas concentrações de focos de emissões de plumas de queimadas, sendo que a densidade das emissões recuperadas chegou ao número 86 para o ano de 2016, apresentando uma média de altitude superior a 946 metros, com emissões acima de 5600 metros. No mês de outubro foram recuperadas 26 plumas de fumaça, com média de altitude acima dos 947 metros e com recuperações que chegaram a atingir altitude acima de 3800 metros.

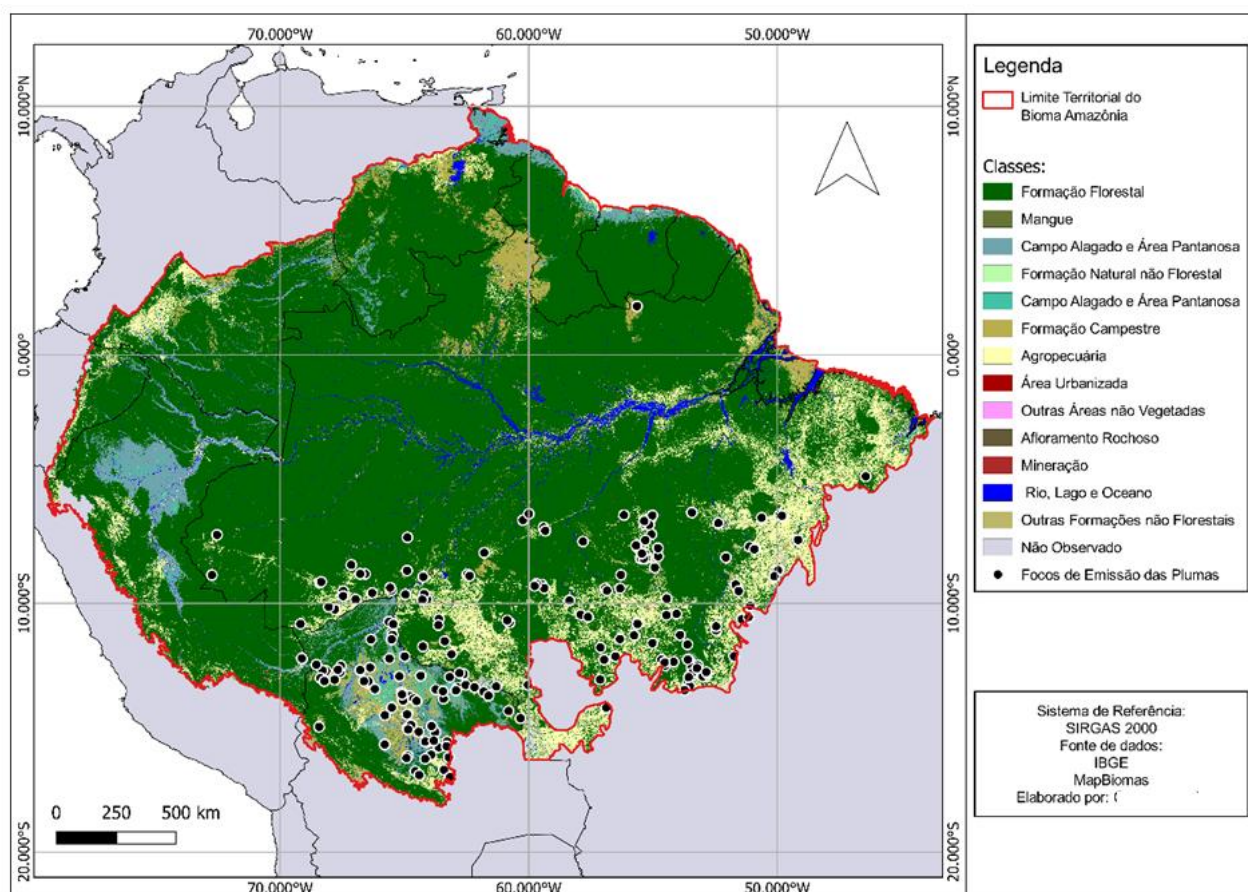


Figura 10: Distribuição espacial dos locais de emissões das plumas para o ano de 2016 e o uso e cobertura da terra para o mesmo ano.

A **Figura 10** mostra a distribuição espacial das emissões em relação ao uso e cobertura da Terra, usando como referência o projeto MapBiomas. Na análise, associando os dados de emissão e uso e cobertura da Terra, o padrão espacial notado no ano anterior se repete em 2016, onde pode ser observado concentrações de emissões em áreas de agropecuária (135 focos) e formação campestre (72 focos) nas regiões dos estados brasileiros de Rondônia e Mato Grosso, e parte norte da Bolívia.

3.2.2 Caso 2: 03 de setembro de 2016 (MISR Orbit 88893; path 233; block 97)

A **Figura 11** mostra as imagens das alturas processadas na câmera nadir da pluma ativa nas coordenadas 8°39'36"S; 64° 52'15.6"W (Microrregião de Purus, Sul Amazonense), capturada em 03 de setembro de 2016 durante a órbita da Terra 88893. No quadro esquerdo, está representada a imagem da câmera MISR nadir da pluma processada.

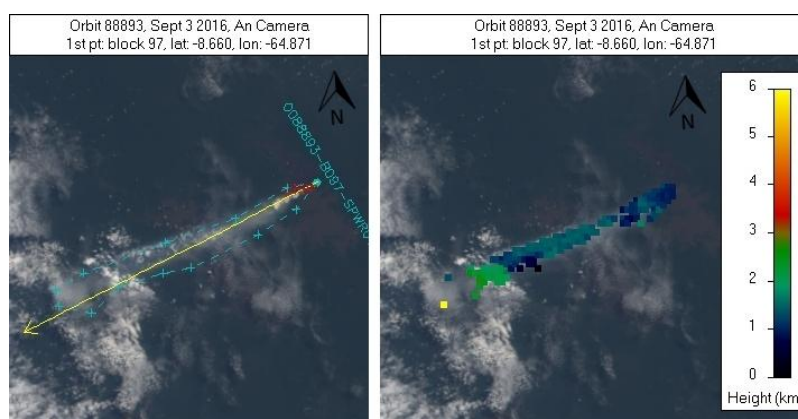


Figura 11: Registro de pluma em 03 de setembro de 2016, na órbita MISR 88893.

Percebe-se que a altura das plumas na **Figura 11** concentra-se próxima à superfície, com uma altura média de 1800 metros, estendendo-se para a região sudoeste, exibindo uma direção e forma bem consistente.

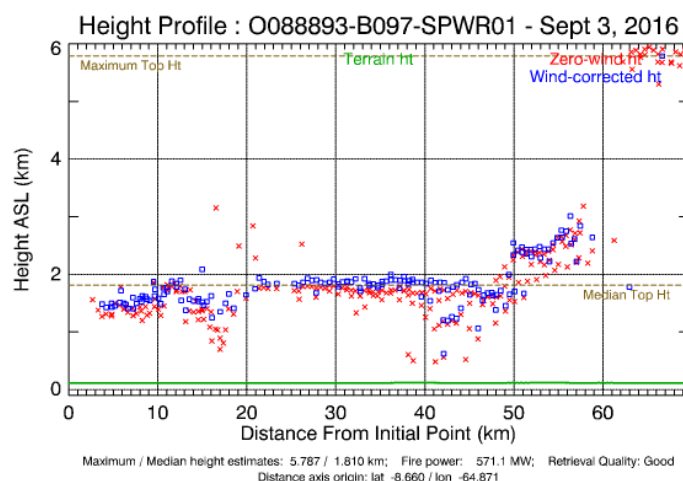


Figura 12: Perfil de altura (km), na vertical, e por distância do foco de emissão (km), na horizontal, gerado pelo MINX para a pluma digitalizada na órbita 88893.

No perfil de altura da pluma recuperada na órbita 88893, representado na **Figura 12**, as alturas médias da fumaça mantiveram-se em 2000 metros desde o seu foco inicial até os 50 km de distância. A partir deste ponto ocorreu um aumento dos valores dos pixels, atingindo 2500 metros de altitude e cobrindo uma área de 438 km², com perímetro de 147 km. A cobertura do solo no foco da queimada é descrita pelo MapBiomass (2022) como formação florestal e o valor da FRP detectada na queimada foi de 571 mw.

4. Considerações finais

Na análise, de maneira geral, por meio da associação de dados de emissão de plumas e do uso e cobertura da Terra, foi possível analisar os processos de avanço da fronteira agrícola brasileira e as práticas agropastoris de maneira relacionada às dinâmicas de queimadas e incêndios florestais na área avaliada. Assim, constatou-se que a localização dos focos de queimadas e a emissão e deslocamento das plumas de fumaça estão intrinsecamente relacionadas com as dinâmicas de uso e cobertura da terra no local. Além desse aspecto, o trabalho possibilitou a análise dos processos de deslocamento das plumas de fumaça e de tendências da intensidade de ocorrência dos focos em uma mesma região.

De acordo com as análises aqui realizadas, as queimadas e incêndios florestais apresentam um ciclo anual bastante evidente na área de estudo, tanto em escala temporal quanto espacial. Os resultados destacam uma grande concentração de áreas de focos por grade na região central da área de estudo, englobando as regiões do norte da Bolívia e de estados brasileiros como Rondônia, Mato Grosso e Pará.

Esse resultado é preocupante em virtude do papel que a Floresta Amazônica desempenha frente à manutenção da composição química da atmosfera, assim como na regulação física do clima. Nesse sentido, o entendimento, a avaliação e a análise de focos de queimadas nesta área são questões importantes não apenas em âmbito local e regional, mas também em âmbito global. Em resumo, é possível afirmar, sobre a dimensão desses eventos e dos possíveis impactos resultantes dos mesmos, que a sua participação no contexto global de emissão de poluentes para a atmosfera é bastante significativa.

Ainda, de acordo com Carmo *et al.* (2010), as partículas resultantes da queima da biomassa permanecem por tempo prolongado na atmosfera, podendo ser transportadas por grandes distâncias e, com isso, se dispersando rapidamente por regiões distantes ao foco da queima, retomando a questão dos impactos em diferentes escalas. Diante disso, é pertinente ressaltar que as plumas de fumaça aqui avaliadas apresentaram uma concentração bastante preocupante de material particulado com potencial perigo à saúde humana.

Assim, à luz da complexidade que envolve todo o cenário de emissões de poluentes, volta-se a atenção para a crescente importância de se produzir inventários cada vez mais confiáveis. Nesse sentido, no presente estudo, destacou-se a busca pela compreensão da dinâmica da injeção de plumas na atmosfera, a fim de possibilitar uma melhor quantificação do impacto climático dos aerossóis emitidos pelo fogo, visto que esta

alternativa de mapeamento ainda não havia sido realizada para a área de estudo aqui apresentada. Buscou-se contribuir para a viabilização e implementação de práticas de gestão, que contemplem desde um aprimoramento nos processos de identificação das emissões até posteriores ações de gestão e redução de possíveis riscos à sociedade.

Referências

- AIKEN, S. R. Runaway fires, smoke-haze pollution, and unnatural disasters in Indonesia. **Geographical Review**. v.94, n.1, p.55-79, 2004.
- Alam, K. Trautmann, T.; Blaschke, T. AEROSOL OPTICAL PROPERTIES AND RADIATIVE FORCING OVER MEGA-CITY Karachi. **Atmospheric Research**, v. 101, n. 3, p. 773–782, 1 ago. 2011.
- ARTAXO, P.; SETZER, A. Emissões de material particulado de queimadas na Floresta Amazônica e no Cerrado. In: Subsídio Técnico ao Documento Básico do I Seminário sobre Incêndios Florestais e Queimadas. Brasília: IBAMA, abr. de 1992. 23p.
- BARBOSA, P. H. D.; COSTA, A. C. L. DA; CUNHA, A. C. DA; SILVA JUNIOR, J. DE A. Variabilidade de Elementos Meteorológicos e de Conforto Térmico em Diferentes Ambientes na Amazônia Brasileira. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, p. 307–326, 2016. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/chuesp.html>>.
- CARDOZO, F. S.; PEREIRA, G.; SHIMABUKURO, Y. E.; MORAES, E. C. Analysis and Assessment of the Spatial and Temporal Distribution of Burned Areas in the Amazon Forest. **Remote Sensing**. v.6, p.8002-8025, 2014.
- COCHRANE, M. A.; BARBER, C. P. Climate change, human land use and future fires in the Amazon. **Global Change Biology**, v. 15, n. 3, p. 601–612, 2009.
- CARMO, N. C.; HACON, S.; LONGO, K.M.; FREITAS, S.; IGNOTTI, E.; LEON, A.P.; ARTAXO, P. Associação entre material particulado de queimadas e doenças respiratórias na região sul da Amazônia brasileira. **Revista Panamericana de Salud Pública**, v. 27, p. 10-16, 2010.
- BIBI, H. *et al.* Intercomparison of MODIS , MISR , OMI , and CALIPSO aerosol optical depth retrievals for four locations on the Indo-Gangetic plains and validation against AERONET data. **Atmospheric Environment**, v. 111, p. 113–126, 2015.
- COSTA, F. R.; LIMA, F. A. F. A linguagem cartográfica e o ensino-aprendizagem da Geografia: algumas reflexões. **Geografia: Ensino e Pesquisa**, v. 16, p. 105–116, 2012.
- DINER, D. J.; *et al.* Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) instrument description and experiment overview. In: **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. v.36, n.4, p.1072-1087, 1998. doi: 10.1109/36.700992/
- FIELD, R. D.; VAN DER WERF, G. R.; SHEN, S. S. Human amplification of drought-induced biomass burning in Indonesia since 1960. **Nature Geoscience**. v.2, n.3, 185 p., 2009.
- GONZALEZ-ALONSO, L.; MARTIN, M. V.; KAHN, R. A. Biomass-burning smoke heights over the Amazon observed from space. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 19, n. 3, p. 1685–1702, 2019.
- ICHOKU, C.; KAHN, R.; CHIN, M. Satellite contributions to the quantitative characterization of biomass burning for climate modeling. **Atmospheric Research**, v. 111, p. 1–28, 2012.
- JUSTICE, C. O.; *et al.* The MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**. v. 83, n. 1-2, p. 244-262, 2002.
- KAHN, R. A., GAITLEY, B. J. An analysis of global aerosol type as retrieved by MISR. **J. Geophys. Res. Atmos.** n.120, p.4248– 4281, 2015. doi: 10.1002/2015JD023322.

- KIM, B. M.; SEO, J.; KIM, J. Y.; LEE, J.; KIM, Y. Transported vs. local contributions from secondary and biomass burning sources to PM_{2.5}. **Atmospheric Environment**. v.144, p.24-36, 2016.
- MAPBIOMAS. Projeto MapBiomass. Disponível em:<<http://mapbiomas.org>>. Acesso em: 30 mar. 2022.
- MARENGO, J. A.; NOBRE, C.; SALAZAR, L. F. Regional climate change scenarios in South America in the late XXI century: Projections and expected impacts. **Nova Acta Leopold**. v.112, p.251–265, 2010.
- MARTIN, M. V. *et al.* Space-based observational constraints for 1-D fire smoke plume-rise models. v. 117, p. 1–18, 2012.
- MAZZONI, D.; LOGAN, J. A.; DINER, D.; KAHN, R.; TONG, L. A data-mining approach to associating MISR smoke plume heights with MODIS fire measurements. **Remote Sensing of Environment**. v.107, p.138-148, 2007.
- NELSON, D. L. *et al.* Example applications of the MISR Interactive eXplorer (MINX) software tool to wildfire smoke plume analyses. v. 7089, p. 1–11, 2008.
- NELSON, D. L. *et al.* Stereoscopic Height and Wind Retrievals for Aerosol Plumes with the MISR Interactive eXplorer (MINX). p. 4593–4628, 2013.
- Neto, O. L. D. M. Coutinho, M. M.; Marengo, J. A. The impacts of a plume-rise scheme on earth system modeling : climatological effects of biomass aerosols on the surface temperature and energy budget of South America. p. 1035–1044, 2017.
- PEREIRA, G. *et al.* Assessment of fire emission inventories during the South American Biomass Burning Analysis (SAMBBA) experiment. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16, n. 11, p. 6961–6975, 2016.
- PURNOMO, H.; SHANTIKO, B.; SITORUS, S.; GUNAWAN, H.; ACHDIAQAN, R.; KARTODIHARDJO, H.; DEWAYANO, A. A. Fire economy and actor network of forest and land fires in Indonesia. **Forest Policy and Economics**. v. 78, p. 21-31, 2017. ISSN 1389-9341, <http://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.01.001>.
- SULLA-MENASHE, D.; FRIEDL, M. A. User Guide to Collection 6 MODIS Land Cover (MCD12Q1 and MCD12C1) Product. USGS: Reston, VA, USA, 2018.
- VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P. S.; ARELLANO, J. A. F. Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. **Atmospheric Chemistry and Physics**. n.6, p.3423-3441, 2006.
- VAN DER WERF, G. R. *et al.* Global fire emissions estimates during 1997-2015. **Earth System Science Data Discussions**, n. January, p. 1–43, 2017.
- WOOSTER, M. J.; ROBERTS, G.; PERRY, G.; KAUFMAN, Y. J. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release. **Journal of Geophysical Research**. v.110, n.D21111, 2005.
- XU, W.; WOOSTER, M.; ROBERTS, G.; FREEBORN, P. New GOES imager algorithms for cloud and active fire detection and fire radiative power assessment across North, South and Central America. **Remote Sensing of Environment**. v.114, n.9, p.1876-1895, 2010.



Este artigo é distribuído nos termos e condições do *Creative Commons Attributions/Atribuição-NãoComercial-CompartilhaIgual* (CC BY-NC-SA).