

ANÁLISE DA INJEÇÃO E DISPERSÃO DAS PLUMAS DE FUMAÇA NA ATMOSFERA ORIUNDAS DAS QUEIMADAS DA AMÉRICA DO SUL

Gustavo Domingos Zanin

Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil
Programa de Pós-Graduação em Geografia Física (PPGF)
gustavozanin@usp.br

Francielle da Silva Cardozo

Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGeog)
Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), São João del-Rei, MG, Brasil
franciellecardozo@ufsj.edu.br

Gabriel Pereira

Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), São João del-Rei, MG, Brasil
Departamento de Geociências (DEGEO)
pereira@ufsj.edu.br

Paulo Ricardo Rufino

Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil
Programa de Pós-Graduação em Geografia Física (PPGF)
paulorufino@usp.br

Viviane Valéria da Silva

Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGeog)
Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), São João del-Rei, MG, Brasil
viviane.silva.ufsj@gmail.com

RESUMO

As queimadas liberam gases traços e aerossóis para a atmosfera, fatores estes que modificam os ciclos biogeoquímicos, bem como o balanço de energia da mesma, levando a alterações locais e regionais do clima, decorrentes, por exemplo, do desmatamento da vegetação natural para a abertura de áreas destinadas à pecuária e agricultura. Partindo deste fato, para determinar as alturas de injeção destas fumaças de queima de biomassa sobre a América do Sul e com o objetivo de avaliar os impactos e as dinâmicas no transporte de longo alcance desses poluentes, foram analisadas imagens do sensor *Multiangl Imaging Spectro Radiometer* (MISR) abordo do Satélite TERRA, com resolução de 275 m em nove ângulos, variando de 0° nadir a 70° fora do nadir. Com o software MISR INteractive eXplorer (MINX) foram processadas as alturas, 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). Neste contexto, foi constatado que na região da América do Sul, a maior fonte de emissões de poluentes são as queimadas que ocorrem sazonalmente na região Amazônica.

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

ANALYSIS OF INJECTION AND DISPERSION OF SMOKE PLUMES ON THE ATMOSPHERE FROM THE BURNS OF SOUTH AMERICA

ABSTRACT

Burning releases trace gases and aerosols into the atmosphere, factors that modify the biogeochemical cycles, as well as the energy balance of the same, leading to local and regional changes in the climate and it can arise, for example, from the deforestation of natural vegetation to open areas for livestock and agriculture. Based on this fact, in order to determine how the injection heights of these biomass burning smoke over South America and in order to evaluate the impacts and dynamics in the long-range transport of pollutants, were analyzed the images from the *Multiangl Imaging Spectrum Radiometer* (MISR) aboard the TERRA Satellite, with 275 m resolution at nine angles, ranging from 0° nadir to

70 ° outside the nadir. With the MISR Interactive eXplorer (MINX) software, the heights were processed, allowing the creation of multitemporal mosaics. Subsequently, from a program originated in IDL / ENVI, the data of interest were obtained, such as the location, the radiative power of the fire and the injection height of each plume. After the initial processing, the data was converted and inserted into geographic information system (GIS). In this context, it was found that in the South America region, the biggest source of pollutant emissions are the fires that occur seasonally in the Amazon region.

Keywords: Atmospheric Modeling. Aerosols. Burns. MISR. MINX.

INTRODUÇÃO

O uso do fogo como ferramenta agrícola gera diversos impactos negativos sobre o meio ambiente, entre eles, a perda da biodiversidade, representando um dos maiores desafios ambientais enfrentados na atualidade. Consideradas como um dos principais mecanismos de conversão da vegetação natural em áreas antropogênicas, a técnica de queimada é muito utilizada, e vem crescendo expressivamente nas últimas décadas. Facilitados pela baixa taxa de precipitação e umidade, tais eventos podem tomar grandes proporções e resultar em impactos negativos irreversíveis em âmbito local e regional. (VAN DER VERF et al., 2006; KIM et al., 2016).

Vale destacar que a utilização das queimadas ocorre principalmente, em conjunto com o desmatamento da vegetação natural com o objetivo de inserção e manutenção de áreas destinadas à agropecuária, além de ser utilizada na limpeza de áreas e no controle de pestes (MARENGO et al., 2010; CARDOZO et al., 2014; HERRERA, 2016; PURNOMO et al., 2017).

Durante a última década, há um interesse intenso em relação ao 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.

Caracterizar os aerossóis opticamente é uma forma de se conhecer seus diferentes tipos e a análise destas características é de suma importância, uma vez que estas podem auxiliar a definir o aerossol presente em um determinado local.

A capacidade de investigar a geometria e a dinâmica das plumas está se tornando cada vez mais importante para os estudos climáticos e da qualidade do ar, que exigem maior conhecimento sobre a injeção de aerossóis e a localização das nuvens na atmosfera. Sendo assim, a altura da pluma de aerossol é um insumo fundamental para modelos de transporte químico atmosférico que frequentemente requerem alturas de injeção de fumaça como insumos (WALTER et al., 2016; AIKEN et al., 2004; FIELD et al., 2009).

A altura das plumas de aerossóis produzidas por incêndios florestais, erupções vulcânicas e tempestades de poeira tem uma grande influência sobre onde as partículas são transportadas e os impactos ambientais gerados. Estudos observacionais iniciais mostraram que a altura da injeção de fumaça varia com a localização geográfica, tipo de vegetação e estação do ano (AIKEN et al., 2004; FIELD et al., 2009).

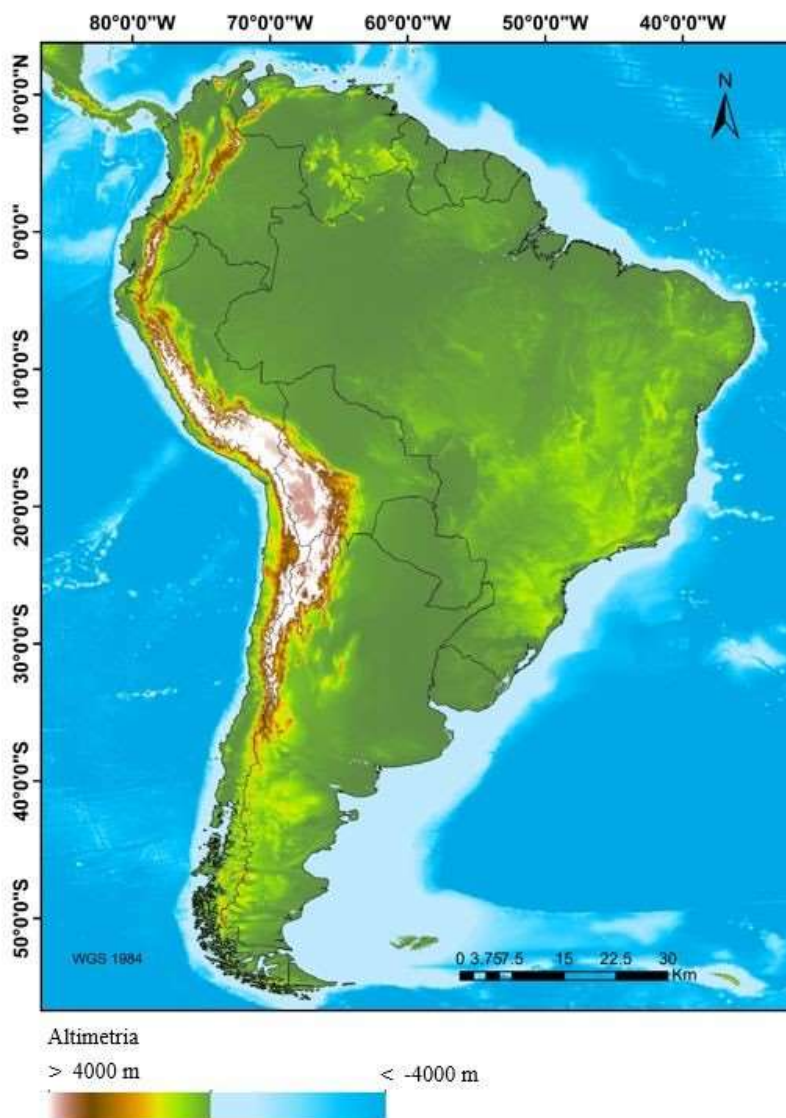
Desta forma, esse trabalho reúne os resultados e análises de pesquisas onde foram mensuradas as alturas de injeção das plumas de fumaça oriundas de queimadas na América do Sul, estratificadas por região, bioma e estação, com base em mais de 3.000 alturas de plumas recuperadas utilizando imagens estéreis do sensor *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer* (MISR).

Caracterização da área de estudo

A área de estudo (Figura 1) compreende a América do Sul (AS), continente que se destaca pelas diferenças econômicas, culturais e pela grande biodiversidade distribuída em múltiplos ecossistemas naturais, compondo-se em terras de baixas e médias altitudes. Possui uma morfologia diversa, com

presença de regiões montanhosas extensas como o caso da Cordilheira dos Andes, regiões com extrema aridez como o deserto do Atacama, além de áreas de superfícies aquáticas grandiosas e florestas com grande diversidade biológica, ambos os casos na região Amazônica, onde de julho a outubro são registrados altos índices de queimadas (REIBOTA et al., 2010).

Figura 1 - Dimensão da área de estudo - América do Sul.



A América do Sul é formada por 15 países, e dada a sua extensão territorial há uma grande diversidade climática e biológica, cujas florestas ocupam aproximadamente 22% do seu território, representando cerca de 27% da cobertura florestal mundial. Sua dimensão espacial, tal como a área do projeto, localiza-se entre as coordenadas geográficas com latitudes entre 12°N e 55°S e longitudes entre 90°W e 40°W. A heterogeneidade climática dessa região provém da atuação e o desenvolvimento de diferentes sistemas atmosféricos, condicionados pelas variações na latitude e formas de relevo variadas (AB'SABER, 1977). Os principais domínios climáticos para o continente são: Clima Tropical ou Equatorial Úmido, Clima Árido a Semiárido, Clima Tropical de Savana, Clima Polar ou Temperado e Clima Subtropical.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais utilizados

Para investigar a altura de injeção das plumas de fumaça provenientes das queimadas na AS para a análise temporal proposta, foram utilizadas imagens do sensor MIRS para 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.

Para a recuperação das plumas foram obtidos os seguintes produtos MISR: produto de Radiância (GRP_Terrain), 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 MISR são gravados no formato HDF e podem ser baixados gratuitamente (MAZZONI et al., 2007).

Além dos produtos MISR, foram obtidos os dados de localização dos focos de queimadas, 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, 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 1 km.

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 radiativo 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:

$$FRP = \epsilon \sigma \sum_{i=1}^n A_n T_n^4$$

(Equação 1)

em que FRP representa a potência radiativa do fogo ([J.s] ⁻¹), σ é a constante de Stefan-Boltzmann (5,67x10⁻⁸ J.s⁻¹.m⁻² [K] ⁻⁴), A_n representa a área fracional (m²) 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).

Metodologia

O processo para a geração da altura das plumas de fumaça é de forma manual e assistida por meio computacional. Para obter as plumas de fumaça foi utilizado o programa *Misr Interactive eXplorer* (MINX), software desenvolvido no *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) na 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).

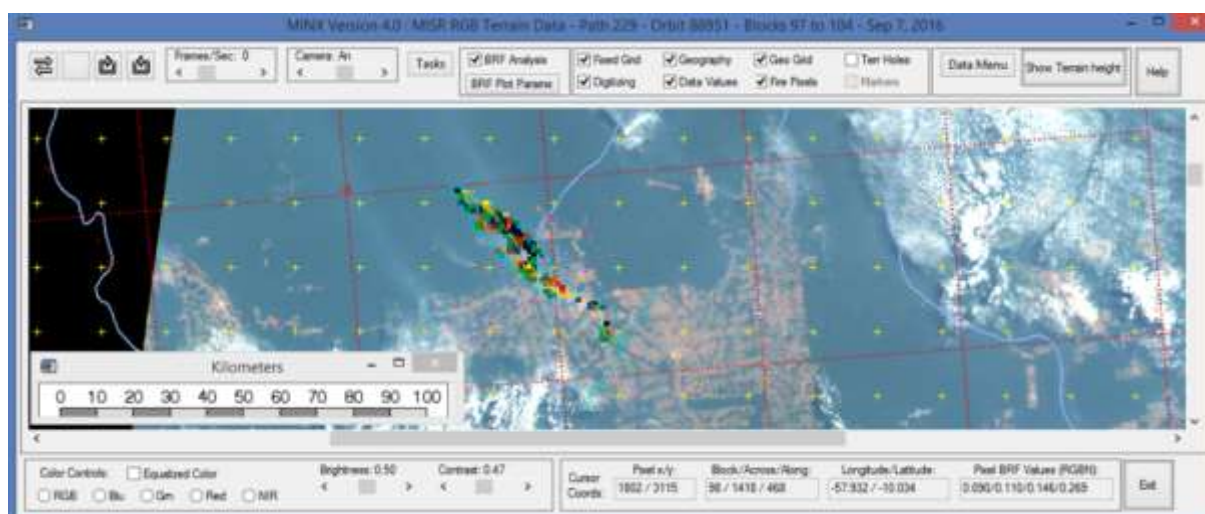
Neste software (Figura 1), as plumas de fumaça são digitalizadas nas imagens do sensor MISR, proporcionando recuperações com detalhes espaciais suficientes para fornecer informações valiosas para estudos da dinâmica das plumas e para estudos climatológicos em larga escala, fornecendo aos usuários a capacidade 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 através 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 (do inglês Fire Radiative Power, FRP). Ainda, antes de iniciar o processamento das plumas foi necessário carregar os produtos de Radiância (GRP_Terrain), o produto referente à parâmetros geométricos (MIB2GEOP).

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

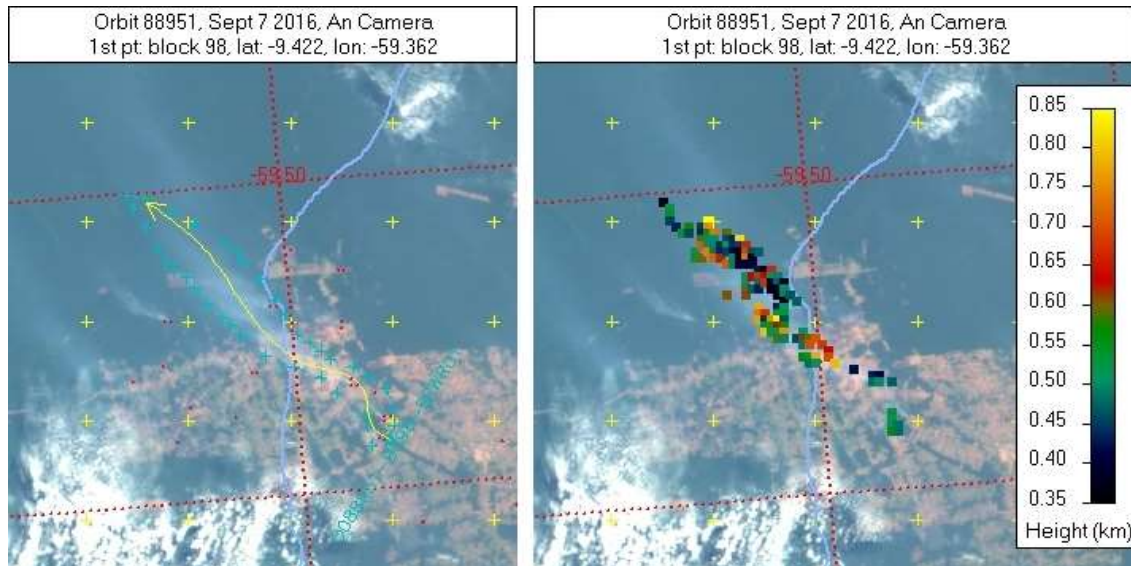
Figura 2 - Painel de trabalho do software MINX com um bloco de dados carregados. Os contornos tracejados do polígono da pluma em azul e a indicação da orientação do vento em amarelo.



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 1.1 km de resolução espacial em todas as câmeras, exceto a nadir.

A faixa azul é preferida para o estudo de plumas menores e mais difusas, principalmente sobre o continente (NELSON et al., 2013).

Figura 3 - 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 de queimadas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o processamento e filtragem das plumas digitalizadas com o *script* elaborado, foram registradas um total de 2083 colunas de plumas na AS nos anos 2015 e 2016, entre os meses de julho a outubro. Esta seção do trabalho apresentará todos os resultados obtidos em geral, em gráficos e mapas, e destacará algumas das plumas de fumaça maiores e que mais se destacaram para este estudo, encontradas durante a digitalização do projeto, sugerindo interpretações de alguns dos fenômenos observados.

Optou-se pela escolha de quatro casos específicos de focos em que as recuperações do MINX estão disponíveis em alta qualidade. 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 ótica do aerossol suficiente para que os recursos de contraste da pluma sejam claramente visíveis nas imagens e distintos da superfície. O critério de espessura ótica é avaliado através da inspeção visual de cada cena usando a função de animação da câmera MINX.

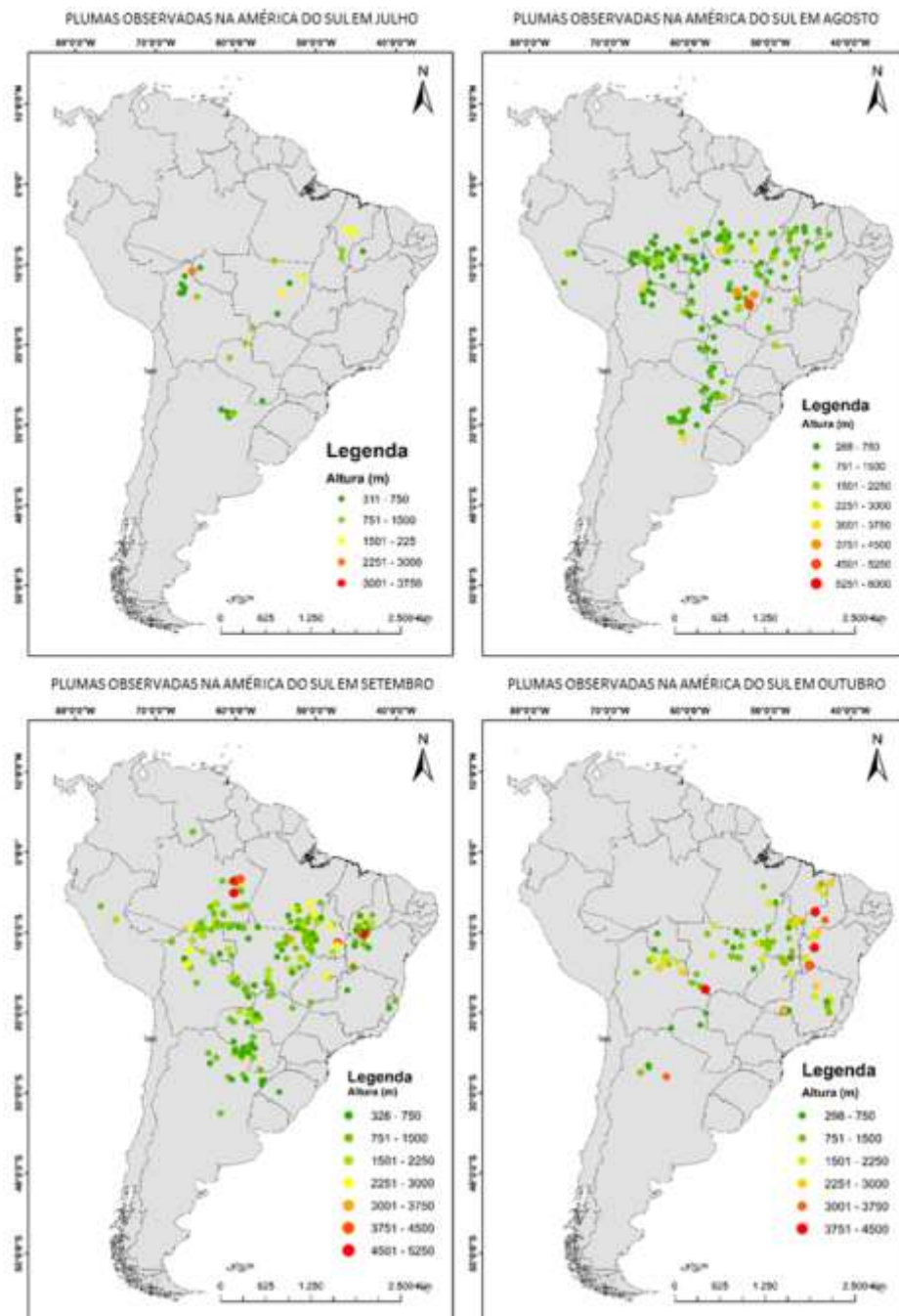
Os quatro casos selecionados para este estudo são: (1) Pluma de fumaça gerada em 06 de setembro de 2015 na latitude -10.157 e longitude -44.020; (02) Pluma de fumaça gerada em 28 de setembro de 2015 na latitude -3.359 e longitude -59.823; (3) Pluma de fumaça gerada em 03 de setembro de 2016 na latitude -

8.660 e longitude -64.871; (4) Pluma de fumaça gerada em 17 de outubro de 2016 na latitude -8.020 e longitude -45.170.

Mapeamento e processamento das plumas para o ano de 2015

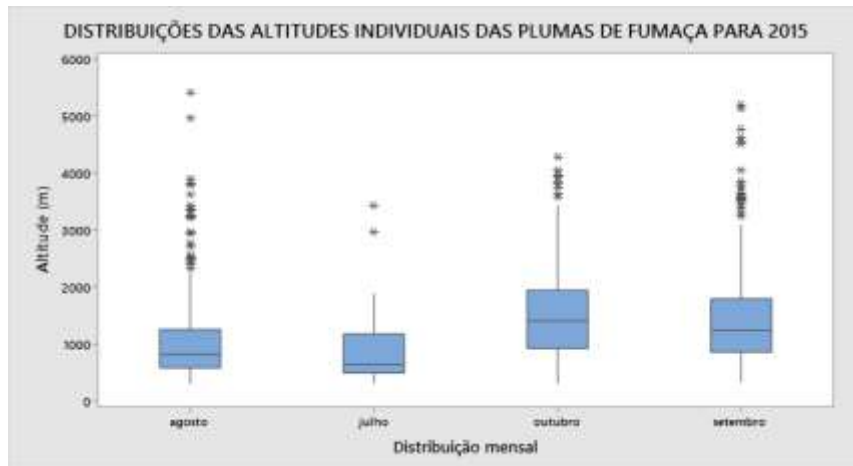
A Figura 6 apresenta a distribuição dos focos de origem das plumas durante a estação seca, compreendida entre os meses de julho a outubro. Foram observadas no total 968 colunas de plumas para toda a América do Sul para o ano de 2015. A escala de cores determina a altura em metros das plumas que variam de centenas de metros chegando a ultrapassar os 3000 metros acima do terreno em certas regiões.

Figura 4 - Distribuição espacial dos locais de emissões das plumas para o ano de 2015.



A altura média de todas as plumas registradas no continente foi de 827 metros. O Brasil foi o país que registrou um expressivo número de ocorrências, sendo a região Nordeste brasileira a área mais ativa, onde as maiores médias de alturas ocorreram durante o mês de agosto (1056 m.), enquanto no Centro-Oeste e na borda da região Amazônica ocorreram no mês de setembro (748,5 m.). A fim de comparar a distribuição mensal das alturas das plumas, foi elaborado o gráfico boxplot que pode ser visualizado na Figura 5:

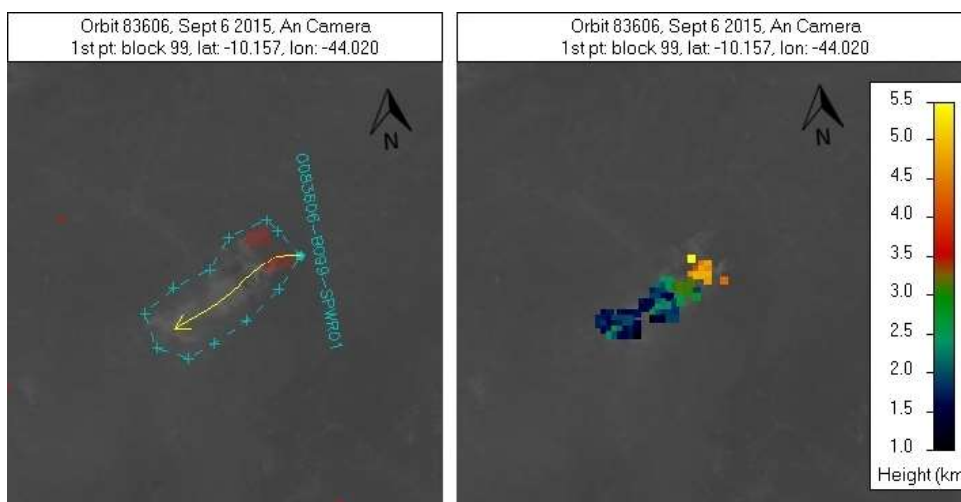
Figura 5 - Distribuição mensal por altitude das recuperações de 2015.



Verifica-se que as alturas das plumas foram altamente variáveis em relação ao período analisado, onde as maiores alturas registradas foram 3400 m. para mês de julho, 5700 m. no mês de agosto, 3600 m. para setembro e 3500 m. para outubro. Analisando o número de ocorrências, os maiores registros de injeção de pluma na atmosfera aconteceram no mês de setembro (404), seguido de agosto (344), outubro (164) e julho (56) com o menor registro entre os meses analisados. As concentrações dos focos ocorreram no leste e sul do Pará, Mato Grosso, Rondônia e Acre, justificada pela grande quantidade de queimadas que ocorrem associados com a expansão agropecuária nessa região (MARENGO et al., 2010; CARDOZO et al., 2014).

Um dos casos de detecção de pluma de fumaça na atmosfera para o ano de 2015 é mostrado na Figura 8. A figura apresenta uma pluma gerada em 06 de setembro de 2015 na latitude -10.157, longitude -44.020, derivados do software MINX, distante 7 km do município de Avelino Lopes, na microrregião das Chapadas do Extremo Sul Piauiense, sudoeste do estado.

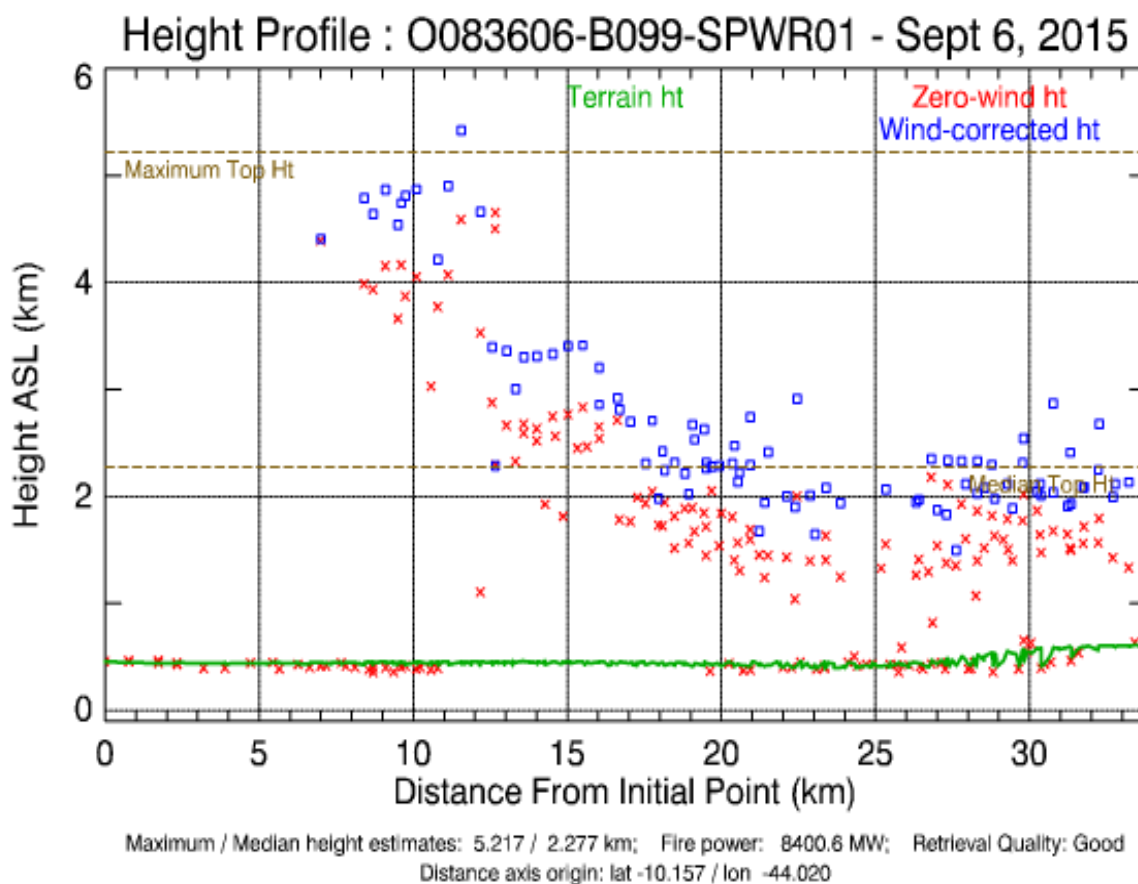
Figura 6 - Registro de pluma de fumaça em 06 de setembro de 2015, na órbita MISR 83606.



Com altitudes que variam entre 1 e 5 km, este caso apresentam dois focos de emissão que avançam para a sudoeste. Na ascensão flutuante inicial da pluma percebe-se que a média da altura de registro foi de 5 mil metros. Outra informação que pode ser extraída, neste caso, é sobre a intensidade da queimada com a presença de intensos pixels indicando o tamanho e a área de abrangência da queimada, onde a potência radiativa do fogo (8401 mw) pode estar intrinsicamente relacionado à ascensão intensa da pluma próximo ao foco, que é justificada pela cobertura da terra no foco da pluma no ano de 2015 como formação savânica (MAPBIOMAS, 2017).

A Figura 7 mostra os perfis de altura corrigida após o processamento gerado pelo MINX para a pluma digitalizada na Figura 6.

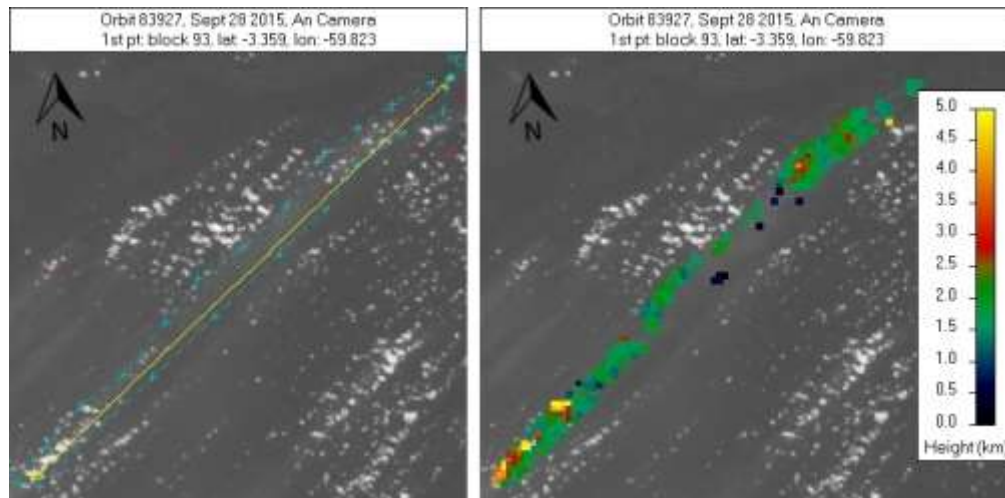
Figura 7 - Perfil de altura gerado pelo MINX para a pluma digitalizada na órbita 83606.



As alturas superiores detectadas da pluma estão a cerca de 5,2 km, aproximadamente 11 km de distância da abertura. Com deslocamento horizontal, numa distância de 15 km da sua origem, a pluma registou a média de altura de 2.500 metros. A área coberta foi de 418 km² com perímetro de 87 km.

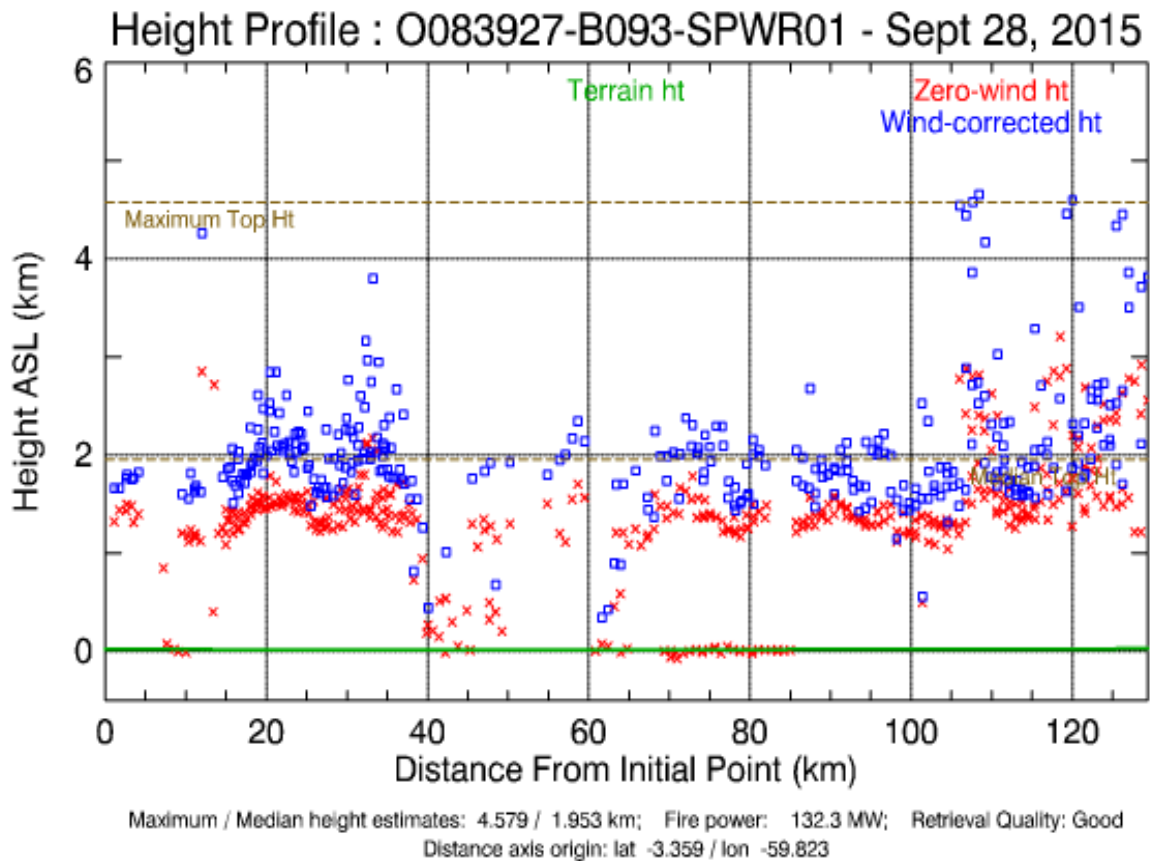
Outro caso de detecção de pluma de fumaça é mostrado na Figura 10, que apresenta uma captação bastante densa e longa. No quadro esquerdo está visualizada a imagem da câmera MISR nadir da captação da pluma de fumaça na latitude -3.359; longitude -59.823, distante cerca de 34 km ao sul da capital do estado do Amazonas, Manaus, capturada em 28 de setembro de 2015 durante a órbita da Terra 83927.

Figura 8 - 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 2,25 km de altura. De acordo com o projeto MapBiomás (2017), o uso da terra para o ano do foco é descrito como floresta de formação florestal. As alturas estereoscópicas corrigidas pelo vento são mostradas na Figura 11 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 9 - Perfil de altura gerado pelo MINX para a pluma digitalizada na órbita 83927.

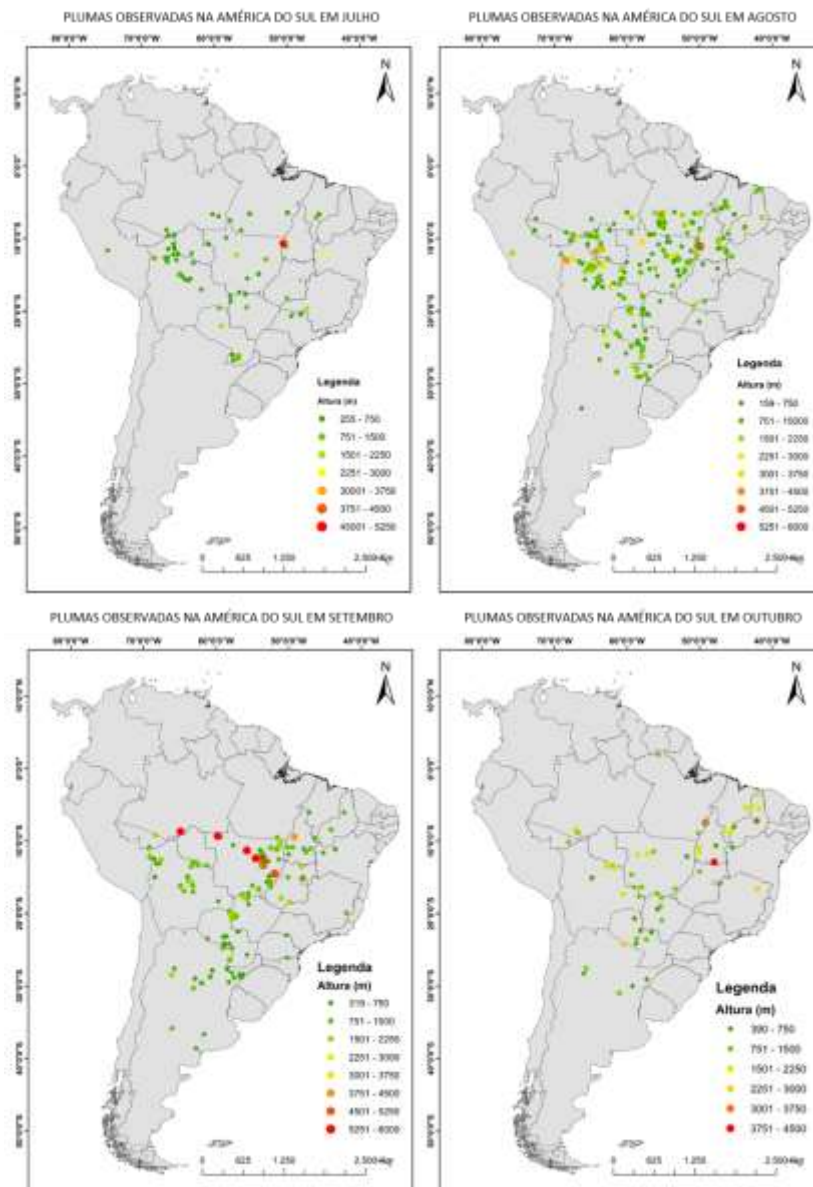


A Figura 10 mostra os perfis de altura gerado pelo MINX para a pluma digitalizada na Figura 10. Analisando o transporte da mesma, é possível descrever que o valor máximo de altura registrado foi de 4,3 km de altura. Percebe-se que o transporte foi uniforme, desde o foco de emissão até os 120 km de distância, mantendo um média de altura de 1,9 metros.

Mapeamento e processamento das plumas para o ano de 2015

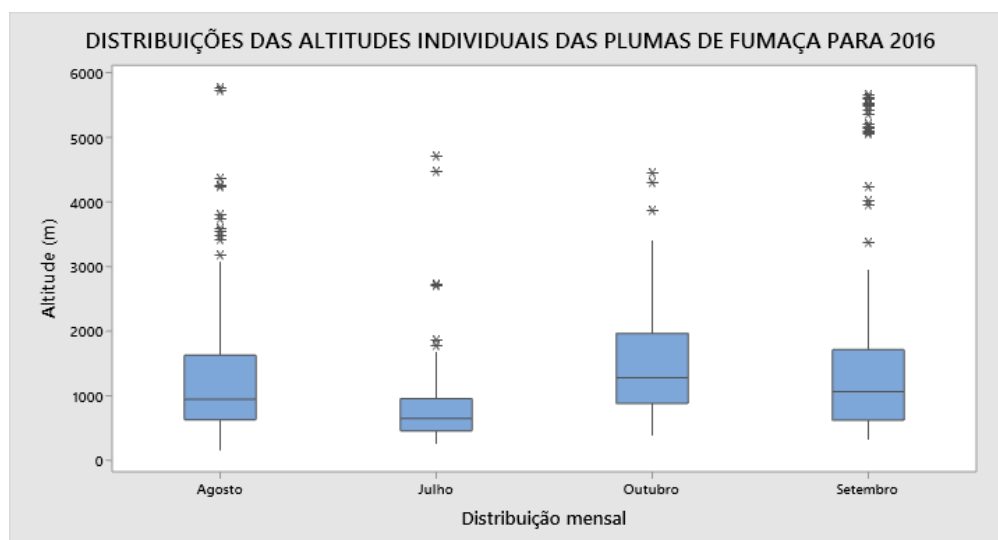
A Figura 10 mostra a distribuição espacial dos focos das plumas no continente para os meses analisados no ano de 2016. Foram observadas 792 plumas de fumaça. Na figura, é notável como as concentrações dos focos ocorreram principalmente nos estados de Rondônia, Acre e Mato Grosso, e na região Norte com grandes incidências no estado do Pará, coincidindo com as áreas mapeadas para 2015. As nuvens de fumaça durante esse período de queima intensa na região dos estados citados, eram espacialmente expansivas, altamente visíveis e facilmente digitalizadas. A escala de cores determina a altura em metros das plumas que variam de algumas centenas de metros chegando a ultrapassar os 5000 metros acima do terreno em certas regiões.

Figura 10 - Distribuição espacial dos locais de emissões das plumas para 2016.



Os resultados dos processamentos das plumas de fumaça mostram que a região Centro-Oeste brasileira (Figura 10) é a área com mais focos, onde verifica-se um expressivo número de ocorrências, em contrapartida com as detecções de 2015. A fim de comparar a distribuição mensal das alturas das plumas foi construído, no software R, o gráfico *boxplot* que pode ser visualizado na Figura 11.

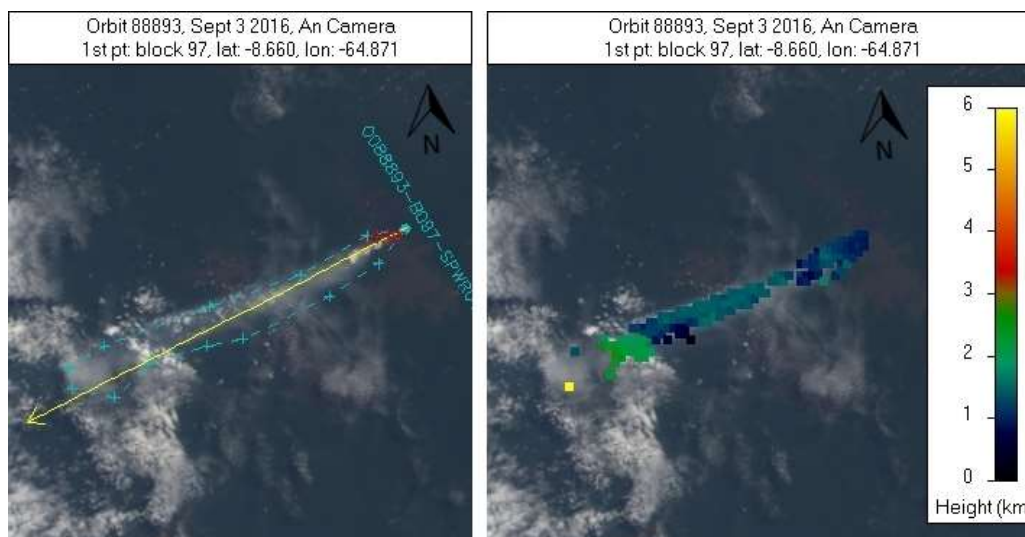
Figura 11 - Distribuição mensal por altura para as recuperações de 2016.



Verifica-se que as alturas das plumas foram altamente variáveis em relação ao período analisado. Os maiores registros obtidos após a filtragem dos dados para cada mês foram: 3421 m. para julho; 5427 m. em agosto; 5205 m. para setembro e 4994 m. para outubro. Analisando o número de ocorrências, os maiores registros de injeção das plumas na atmosfera aconteceram no mês de agosto (371), seguido de setembro (220), julho (109) e outubro (92) com o menor registro entre os meses analisados.

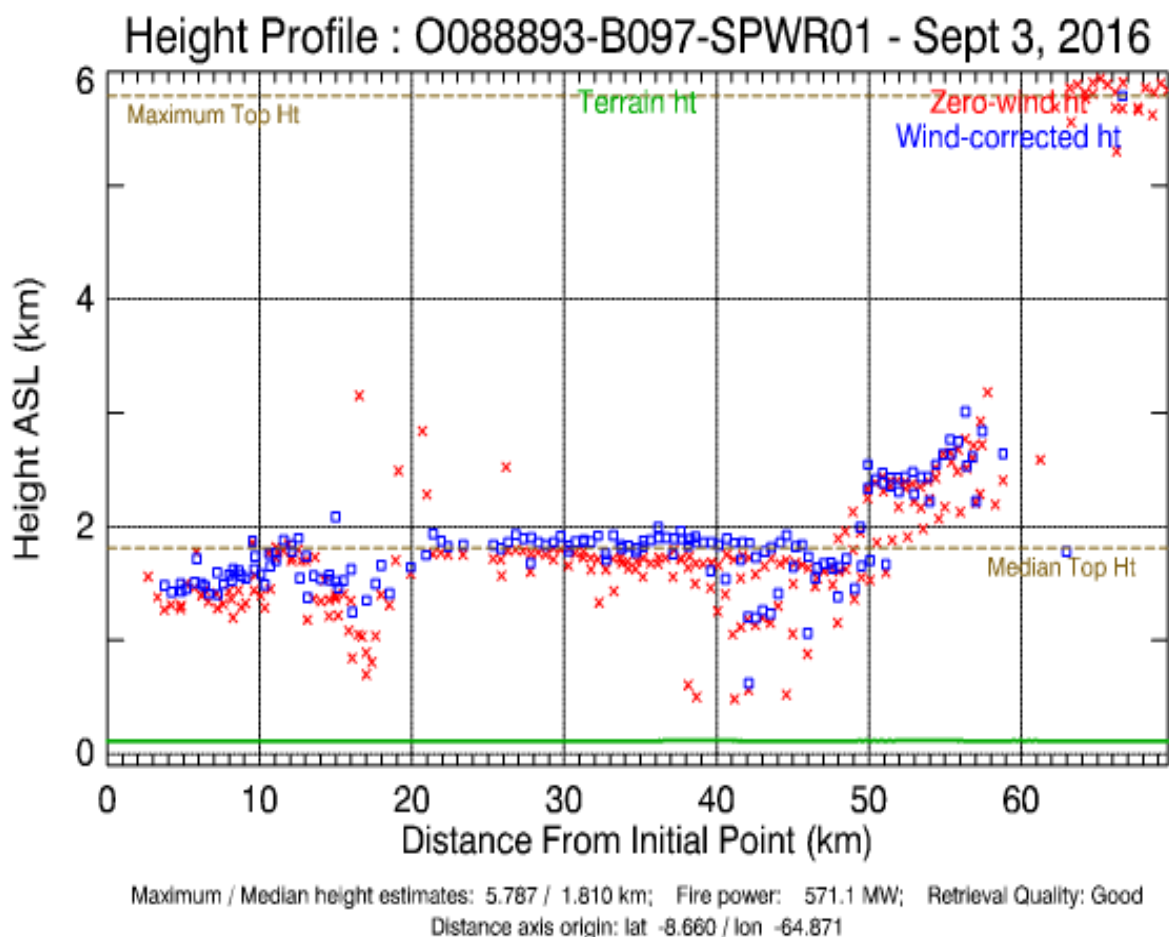
A Figura 12 mostra as imagens das alturas processadas na câmera nadir da pluma ativa na latitude - 8.660; longitude -64.871 (Microrregião de Purus, Sul Amazonense), capturada em 03 de setembro de 2016 durante a órbita da Terra 88893. No quadro esquerdo a imagem da câmera MISR nadir da pluma processada.

Figura 12 - Registro de pluma em 03 de setembro de 2016, na órbita MISR 88893.



Percebe-se que a altura das plumas (Figura 13) 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.

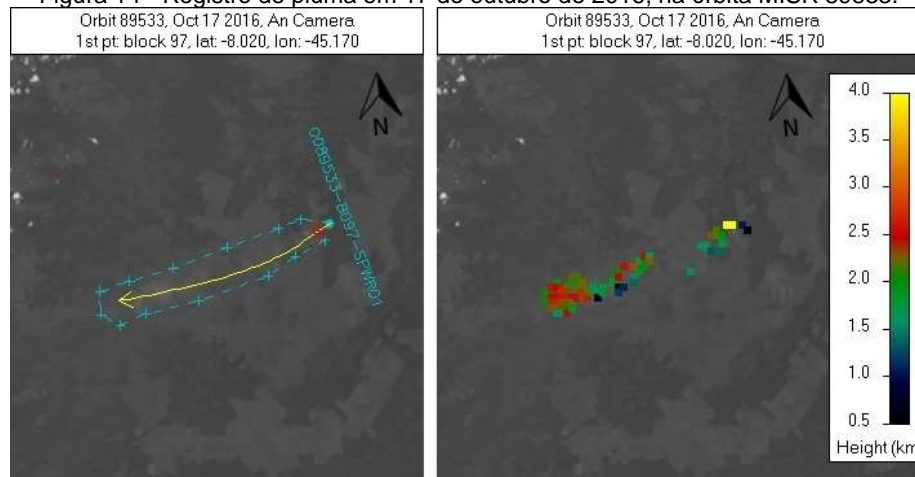
Figura 13 - Perfil de altura gerado pelo MINX para a pluma digitalizada na órbita 88893.



No perfil de altura da pluma recuperada na órbita 88893, 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 2,5 km de altitude. Cobrindo uma área de 438 km² e com perímetro de 147 km. A cobertura do solo no foco da queimada é descrita pelo MapBiomias (2017) como formação florestal e o valor da FRP detectada na queimada foi de 571 mw.

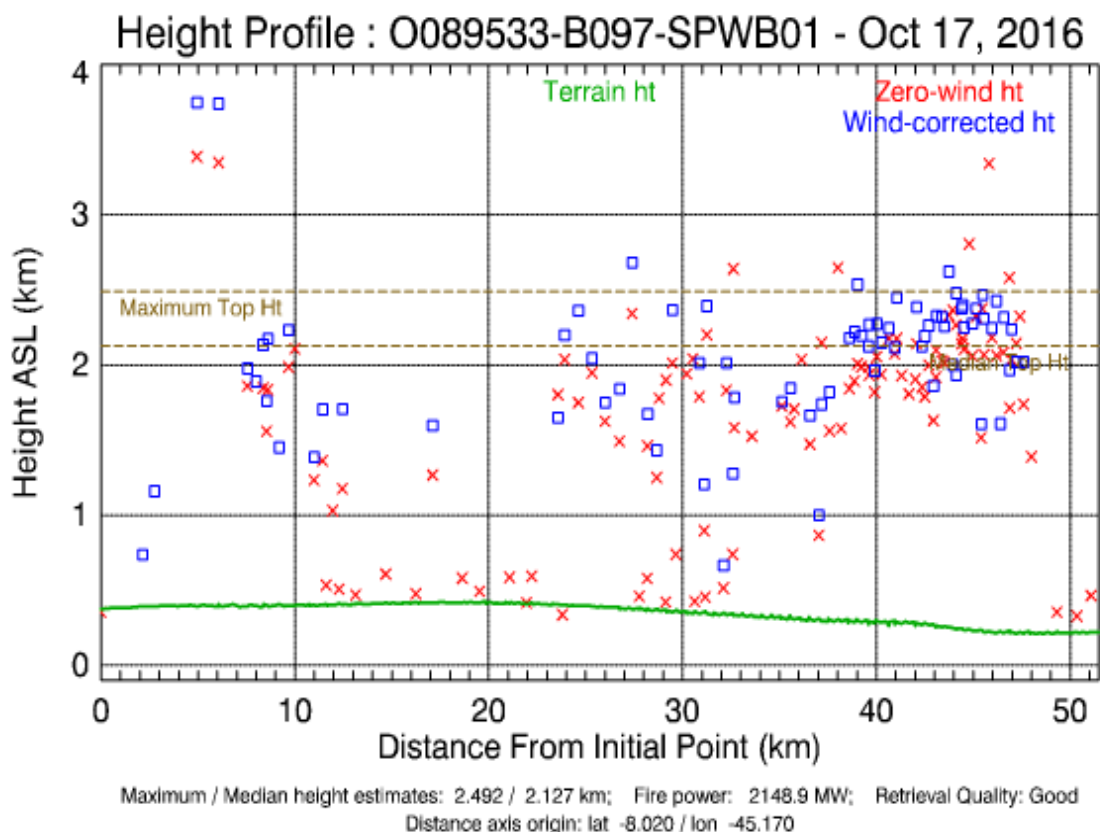
Na figura 14 é possível observar uma coluna de fumaça de 17 de outubro de 2016, observada na latitude -8.020, longitude -45.170, distante cerca de 20 quilômetros do município de Baixa Grande do Ribeiro, da microrregião do Alto Parnaíba, no Sudoeste do estado do Piauí. De acordo com o projeto MapBiomias (2017), a área do foco é caracterizada como agricultura, de cultivo anual e perene, demonstrando a prática do uso do fogo como ferramenta de manejo no campo, para abertura de novas áreas agrícolas, no controle de pragas e para remoção dos remanescentes agrícolas. A potência radiativa do fogo foi de 2148 mw.

Figura 14 - Registro de pluma em 17 de outubro de 2016, na órbita MISR 89533.



Este caso permite perceber que dentro de uma única pluma, há valores variados em altura, à medida que a pluma se desloca, revelando a presença de aerossóis em diferentes alturas ao longo da pluma, oscilando em altas (3 km ~ 4 km) e baixas (0,5 km ~ 1,5 km). Essas diferenças podem ser atribuídas a variações da direção do vento em função da altura. Verifica-se que a injeção foi transportada em direção SSW, onde a fumaça ficou concentrada na área de emissão inicial, registrando 4 km de altura, e ao distanciar ocorreu o espalhamento da fumaça e redução dos valores de altura.

Figura 15 - Perfil de altura gerado pelo MINX para a pluma digitalizada na orbita 89533.



A Figura 15 mostra os perfis de altura gerados pelo MINX para a pluma digitalizada na Figura 14. O perfil de altura corrigido pelo vento mostra a pluma mantendo-se na altura média de 2,3 km na direção do vento, permanecendo nessa altura até atingir a distância de 40 km da origem do perfil. Após essa distância, a pluma começa a se concentrar até ficar a algumas centenas de metros acima da superfície da terrestre, na altitude média de 2.127 metros. A pluma cobriu uma área de 387 km² dentro de um perímetro de 112 km.

CONCLUSÃO

O objetivo com esse trabalho foi de identificar o período e as principais áreas afetadas por entradas de plumas de aerossóis de queimada na atmosfera na América do Sul. Neste sentido, foram detectadas e analisadas 968 colunas de plumas para o ano de 2015 e 792 em 2016. A distribuição espacial dos focos de queimadas e sua relação com o UCT indicam que as áreas mais atingidas pelas queimadas. Verificou-se que as plumas observadas na AS exibiram uma direção e forma de transporte muito consistentes.

Compreender a dinâmica da injeção de plumas é um aspecto importante para quantificar melhor o impacto climático dos aerossóis emitidos por fogo. Vários são os estudos que destacam a necessidade de melhorar nossa capacidade de quantificar o impacto das plumas nos orçamentos de radiação atmosférica e de superfície da região.

Ressalta-se que as geotecnologias têm sido imprescindíveis, uma vez que permitem a visualização e a distribuição de fenômenos, auxiliando na tomada de decisões. Assim, a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto tem se mostrado fundamental, na medida em que os bancos de dados gerados através do uso de satélites correspondem a uma importante fonte de informações sobre os diversos fenômenos que ocorrem na superfície terrestre.

Logo, esta capacidade de investigar a geometria e dinâmica da pluma está se tornando cada vez mais importante para os estudos de clima e qualidade do ar, onde exigem maior conhecimento das injeções de aerossóis e a sua localização dentro da atmosfera. Ressalta-se que este trabalho irá complementar e ampliar nossos esforços anteriores por contabilizar a distribuição colunar das camadas de aerossol.

AGRADECIMENTOS

O presente projeto foi desenvolvido com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através do amparo financeiro à pesquisa e por meio da concessão dos projetos nº 307004/2020-1 e nº 441934/2018-8.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N.; Potencialidades paisagísticas brasileiras. **Seleção de Textos de Geomorfologia**. São Paulo, SP: Instituto de Geografia/USP, v.55, p. 01-05, 1977.
- AIKEN, S. R.; Runaway fires, smoke-haze pollution, and unnatural disasters in Indonesia. **Geographical Review**, 94, no. 1 (2004): 55-79. <https://doi.org/10.1111/j.1931-0846.2004.tb00158.x>
- ANDREAE, M. O.; ARTAXO, P.; FISCHER, H.; FREITAS, S. R.; Transport of biomass burning smoke to the upper troposphere by deep convection in the equatorial region. **Geophysical Research Letters**, v.28, n.6, p.951-954, 2001. <https://doi.org/10.1029/2000GL012391>

- ARANTES, A. E.; FERREIRA, L. G.; COE, M. T.; The seasonal carbon and water balances of the Cerrado environment of Brazil: Past, present, and future influences of land cover and land use. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 117, p. 66-78, 2016. ISSN 0924-2716, <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.02.008>. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.02.008>
- ARTAXO, P.; SETZER, A.; **Emissões de material particulado de queimadas na Floresta Amazônica e no Cerrado**. Subsídio Técnico ao Documento Básico do I Seminário sobre Incêndios Florestais e Queimadas. Brasília: IBAMA, abril de 1992. 23p.
- BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J.; **Atmosphere, weather and climate**. Routledge, 2009. <https://doi.org/10.4324/9780203871027>
- 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. <https://doi.org/10.3390/rs6098002>
- COCHRANE, M. A.; Fire and fire ecology: Concepts and Principles. In: **Tropical Fire Ecology, Climate Change, Land Use and Ecosystem Dynamics**, Springer: Chichester, UK, pp. 60-97, 2009. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77381-8>
- COUTINHO, L. M.; *et al.*; O Bioma do Cerrado e o Fogo. **Revista do Instituto de Estudos Avançados da USP**, 50 pp., 2002.
- DINER, D. J.; *et al.*, Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) instrument description and experiment overview, in **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 36, no. 4, pp. 1072-1087, July 1998. doi: 10.1109/36.700992. <https://doi.org/10.1109/36.700992>
- FEARNSIDE, P. M.; RIGHI, C. A.; GRAÇA, P. M. L. A.; KEIZER, E. W. H.; CERRI, C. C.; NOGUEIRA, E. M.; BARBOSA, R. I.; Biomass and greenhouse gas emissions from land-use change in Brazil's Amazonian "arc of deforestation": The states of Mato Grosso and Rondônia. **Forest Ecology and Management**, n. 258, p. 1968-1978, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.042>
- FIELD, R. D.; VAN DER WERF, G. R.; SHEN, S. SP.; Human amplification of drought-induced biomass burning in Indonesia since 1960. **Nature Geoscience** 2, no. 3 (2009): 185. <https://doi.org/10.1038/ngeo443>
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **State of the World's Forests**. Rome: 2007, 2007.
- FREITAS, S. R.; *et al.*; **Emissões de queimadas em ecossistemas da América do Sul**. Estudos Avançados, v. 19, n. 53, p. 167-185, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142005000100011>
- GARRATT, J. R.; The atmospheric boundary layer. **Earth-Science Reviews** 37, no. 1-2 (1994): 89-134. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90026-4)
- HERRERA, G. V.; Mexican forest fires and their decadal variations. **Advances in Space Research**, v. 58 (10), p. 2104-2115, 2016. ISSN 0273-1177, <http://doi.org/10.1016/j.asr.2016.08.030>. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.08.030>
- ICHOKU, C.; KAUFMAN, Y. J.; A method to derive smoke emission rates from MODIS fire radiative energy measurements. **IEEE Trans. on Geosc. & Rem. Sens.**, v. 43, n. 11, p. 2636-2649, 2005. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.857328>
- JIMENEZ, J. L.; CANAGARATNA, M. R.; DONAHUE, N. M.; PREVOT, A. S. H.; ZHANG, Q.; KROLL, J. H.; WORSNOP, D. R.; (2009). Evolution of Organic Aerosols in the Atmosphere. **Science**, 326(5959), 1525 LP – 1529. <https://doi.org/10.1126/science.1180353>. <https://doi.org/10.1126/science.1180353>

JUSTICE, C. O. et al. The MODIS fire products. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1-2, p. 244-262, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00076-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00076-7)

KAHN, R. A., GAITLEY, B. J.; (2015); An analysis of global aerosol type as retrieved by MISR. **J. Geophys. Res. Atmos.**, 120, 4248–4281. doi: 10.1002/2015JD023322. <https://doi.org/10.1002/2015JD023322>

KAHN, R. A.; *et al.*; Wildfire smoke injection heights: Two perspectives from space. **Geophysical Research Letters** 35.4 (2008). <https://doi.org/10.1029/2007GL032165>

KANAKIDOU, M.; SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N.; BARNES, I.; DENTENER, F. J.; FACCHINI, M. C.; VAN DINGENEN, R.; *et al.* Organic aerosol and global climate modelling: a review. **Atmospheric Chemistry and Physics**. no. 4 (2005): 1053-1123. <https://doi.org/10.5194/acp-5-1053-2005>

KAUFMAN, Y. J.; REMER, L.; OTTMAR, R.; WARD, D.; RONG-R, L.; KLEIDMAN, R.; FRASER, R.; FLYNN, L.; MCDOUGAL, D.; SHELTON, G. Relationship between remotely sensed fire intensity and rate of emission of smoke: SCAR-C experiment. In: Levine, J. (Ed.). **Global biomass burning**. Maryland: MIT Press, 1996. p. 685-696.

KIM, B. M.; SEO, J.; YOUNG KIM, J.; LEE, J.; KIM, Y.; Transported vs. local contributions from secondary and biomass burning sources to PM2.5. **Atmospheric Environment**, v. 144, p. 24-36, 2016. ISSN 1352-2310, <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.072>. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.072>

LAVOUE, D.; LIOUSSE, C.; CACHIER, H.; STOCKS, B. J.; GOLDAMMER, J. G. Modeling of carbonaceous particles emitted by boreal and temperate wildfires at northern latitudes. **J. Geophys. Res.**, v. 1035, p. 26871-26890, 2000. <https://doi.org/10.1029/2000JD900180>

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomás**. Disponível em: <<http://mapbiomas.org>>. Acesso em: 30 out. 2019.

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.

MAZZONI, D.; LOGAN, J. A.; DINER, D.; KAHN, R.; TONG, L.; LI, Q.; A data-mining approach to associating MISR smoke plume heights with MODIS fire measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 107 (1-2), p. 138-148, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.08.014>

MORONEY, C.; DAVIES, R.; MULLER, J-P.; Operational retrieval of cloud-top heights using MISR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** 40, no. 7 (2002): 1532-1540. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.801150>

OLIVEIRA, A. M.; MARIANO, G. L.; Identificação de Entrada de Plumás Queimada e Principais Áreas Afetadas na Região Sul do Brasil. **Ciência e Natura**, v. 36, n. 2, p. 241–249, 2014. <https://doi.org/10.5902/2179460X12806>

PAUGAM, R.; WOOSTER, M.; FREITAS, S.; A review of approaches to estimate wildfire plume injection height within large-scale atmospheric chemical transport models. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16 (2), p. 907-925, 2016. ISSN 1680-7316. <https://doi.org/10.5194/acp-16-907-2016>

PEREIRA, G.; FREITAS, S. R.; MORAES, E. C.; FERREIRA, N. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; RAO, V. B.; LONGO, K. M.; Estimating trace gas and aerosol emissions over South America: Relationship between fire radiative energy released and aerosol optical depth observations, **Atmospheric Environment**, v. 43, p. 6388-6397, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.09.013>

PRINS, E. M.; MENZEL, W. P. Geostationary satellite detection of biomass burning in South America. **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, n. 15, p. 2783-2799, 1992.

<https://doi.org/10.1080/01431169208904081>

PURNOMO, H.; SHANTIKO, B.; SITORUS, S.; GUNAWAN, H.; ACHDIAWAN, R.; KARTODIHARDJO, H.; DEWAYANI, 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>.

<https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.01.001>

RANDERSON, J. T.; VAN DER WERF, G. R.; GIGLIO, L.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P. S.; **Global Fire Emissions Database**, Version 4, (GFEDv4). ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <http://dx.doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1293>, 2015.

RECUERO, F. S.; **Estudo do transporte das partículas de aerossol de queimada via sensoriamento remoto**. PhD diss., Universidade de São Paulo, 2003.

ROBERTS, G.; WOOSTER, M. J.; PERRY, G. L. W.; DRAKE, N.; REBELO, L.-M.; DIPOTSO, F.; Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: Application to southern Africa using geostationary SEVIRI imagery. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 110, n. D21, 2005. <https://doi.org/10.1029/2005JD006018>

SEINFELD J.; PANDIS, S.; **Atmospheric Chemistry and Physics**. Hoboken, New Jersey. 2ed. John Wiley & Sons, Inc., 2006, 1248p.

STULL, R. B.; An introduction to boundary layer meteorology. Vol. 13. **Springer Science & Business Media**, 2012.

SULLA-MENASHE, D.; FRIEDL, M. A.; **User Guide to Collection 6 MODIS Land Cover (MCD12Q1 and MCD12C1) Product**. USGS: Reston, VA, USA (2018).

VAL MARTIN, M.; LOGAN, J. A.; KAHN, R. A.; LEUNG, F.-Y.; NELSON, D. L.; DINER, D. J.; Smoke injection heights from fires in North America: analysis of 5 years of satellite observations. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 10, p. 1491-1510, 2010. <https://doi.org/10.5194/acp-10-1491-2010>

VAN DER WERF, G. R.; RANDERSON, J. T.; GIGLIO, L.; COLLATZ, G. J.; KASIBHATLA, P. S.; ARELLANO JR., A. F.; Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. **Atmospheric Chemistry and Physics**, n. 6, p. 3423-3441, 2006. <https://doi.org/10.5194/acp-6-3423-2006>

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V.; **Atmospheric science: an introductory survey**. Vol. 92. Elsevier, 2006.

WOOSTER, M. J.; ROBERTS, G.; PERRY, G. L. W.; KAUFMAN, Y. J.; (2005). Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, 110(24), 1–24. <https://doi.org/10.1029/2005JD006318>

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. <https://doi.org/10.1029/2005JD006318>

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.

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.012>

Recebido em: 24/08/2020

Aceito para publicação em: 06/11/2021