

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

GABRIELA LIMA DA SILVA

**PIROCUMULONIMBUS NA AMÉRICA DO SUL: UM ESTUDO DE CASO**

SÃO PAULO

2021

GABRIELA LIMA DA SILVA

**PIROCUMULONIMBUS NA AMÉRICA DO SUL: UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Bacharelado em  
Meteorologia da Universidade de São Paulo,  
como requisito necessário à obtenção do  
título de Bacharel em Meteorologia.

Orientadora: Profa. Dra. Márcia  
Akemi Yamasoe

SÃO PAULO

2021

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha mãe por ser minha maior heroína e me ensinar a ser uma guerreira mesmo nos tempos mais difíceis.

Ao Marcelo, por ser minha âncora nesse planeta. Sem você, esse trabalho não seria possível.

À minha orientadora, Márcia Akemi Yamasoe, por ser mais do que professora e me incentivar a ir além.

Aos meus gatinhos, Nonô (in memoriam) e Nimbus, por sempre oferecerem carinho à este coração ansioso.

Aos meus sogros, por sempre me apoiarem.

À professora Rita, que me ajudou a enfrentar dois anos de pandemia e isolamento.

À todos que, de alguma forma, me ajudaram a trilhar este caminho e me encorajaram a seguir meus sonhos.

“I’m young, scrappy and hungry.  
And I am not throwing away my shot.”

**Lin-Manuel Miranda**

## RESUMO

Pirocumulonimbus são nuvens de alto desenvolvimento vertical que se originam a partir de grandes fontes de calor, como incêndios florestais. A biomassa queimada pode ser carregada pela corrente ascendente da nuvem até altitudes elevadas, como a alta troposfera e baixa estratosfera. Deste modo, a fumaça permanecerá por mais tempo no ar e poderá atingir maiores distâncias. Devido ao fato de que a maior parte dos estudos nesta área se concentra em eventos localizados fora da América do Sul e que os incêndios florestais são uma prática regular neste continente, este trabalho buscou levantar e entender as semelhanças e diferenças da gênese de um pirocumulonimbus sul-americano de eventos não ocorridos na América do Sul. Para isto, o evento de pirocumulonimbus na fronteira Bolívia/Paraguai em 18 de agosto de 2019 foi estudado com o uso de sensoriamento remoto, radiossondagens e reanálise de modelos atmosféricos. Verificou-se que a nuvem sul-americana não possuía nenhuma diferença física de outros casos registrados na literatura, porém o incêndio que a gerou teve uma potência máxima em um único ponto 75% e 84% maior, respectivamente, do que os incêndios de Bald Fire e o Rocky Fire, ambos na Califórnia, Estados Unidos da América, apesar de estar sob o efeito de uma baixa atmosfera úmida e não ideal para propagação do fogo. É hipotetizado que o solo extremamente seco e os ventos intensos, gerados pela confluência entre uma frente fria e o Jato de Baixos Níveis, possibilitaram a intensificação da queimada. Além disso, também é levantada a hipótese de que apenas uma grande quantidade de energia como a observada seria capaz de gerar uma nuvem nas condições locais, uma vez que a média atmosfera se encontrava seca e não ideal para convecção. Por fim, é seguro afirmar ainda que a nuvem auxiliou na ascensão de aerossóis e gases carbonáceos para altitudes mais elevadas e que estes foram carregados até o sudeste brasileiro.

Palavras- Chave: Pirocumulonimbus, queimadas, poluição do ar.

## **ABSTRACT**

Pyrocumulonimbus are clouds of high vertical development that originate from large sources of heat, such as forest fires. The cloud's updraft can carry the burned biomass to high altitudes, such as the higher troposphere and low stratosphere. In this way, the smoke will remain in the air for a longer time and can reach greater distances. Due to the fact that most studies in this area focus on events localized outside South America and that forest fires are a regular practice in that continent, this work sought to raise and understand the similarities and differences of pyrocumulonimbus genesis in South America and other continents. For this, the pyrocumulonimbus event on the Bolivia/Paraguay border on August 18, 2019, was studied using remote sensing, radiosonde and reanalysis of atmospheric models. It was found that the South American cloud did not have any physical difference from other cases reported in the literature, however the fire that generated it had a maximum power at a single point 75% and 84% higher, respectively, than the Bald Fire and Rocky Fire fires, both in California, United States of America, despite the low atmosphere being more humid, not ideal for fire propagation. It is hypothesized that the extremely dry soil and intense winds, generated by the confluence between a cold front and the low-level jet, enabled the growth of the fire. Furthermore, it is also hypothesized that only a large amount of energy as observed would be able to generate a cloud, since the mid atmosphere was dry and not ideal for convection. Finally, it is safe to say that the cloud helped in the rise of carbonaceous aerosols and gases to higher levels of the atmosphere and that these were carried to the southeast of Brazil.

Keywords: Pyrocumulonimbus, biomass burning, air pollution.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Temperatura de brilho no canal 3,9 $\mu\text{m}$ do satélite GOES-1	18
Figura 2: Temperatura de brilho no canal 11,2 $\mu\text{m}$ do satélite GOES-1	18
Figura 3: Pirocumulonimbus vista pelo satélite Sentinel-2 às 10:18 LT.	19
Figura 4: Ciclo de potência e área instantânea dos incêndios analisados. Fonte dos dados: produtos do GOES-16.	19
Figura 5: Imagens do RGB do incêndio do dia 18 de agosto de 2019 superpostas pela potência do fogo estimada.	20
Figura 6: A mesma informação que a Figura 5, mas para o dia anterior	22
Figura 7: Menor temperatura do topo do pirocumulonimbus	23
Figura 8: Maior altitude do topo do pirocumulonimbus.	24
Figura 9: Evolução de propriedades da queimada e do PyroCb. Os dados utilizados para as formas estão normalizados de modo que sua extensão vertical máxima seja a mesma para cada variável. “Distância” se refere ao espaço entre a nuvem e seu local de origem.	25
Figura 10: Radiossondagem de Corumbá às 08:00 LT (12 Z) do dia 17 (à esquerda) e 18 (à direita). Em cada radiossondagem, a curva da mais à esquerda representa a temperatura do ponto de orvalho, enquanto a curva mais à direita representa a temperatura.	26
Figura 11: Variação diária antes do dia 18 (acima) e durante o dia 18 (abaixo) da umidade do solo estimada pelo modelo ERA5	28
Figura 12: Carta sinótica em 850 hPa das 18Z do dia 18 de agosto. Fonte: INPE	29
Figura 13: carta sinótica de 250 hPa das 00Z do dia 18 de agosto. Fonte: INPE	30
Figura 14: AI no dia 18 de agosto registrado pelo satélite Sentinel-5P	31

Figura 15: Altitude do aerossol no dia 17 de agosto registrado pelo satélite Sentinel-5P.	32
Figura 16: A mesma informação que a Figura 15, mas para o dia 18	32
Figura 17: Densidade média de <i>black carbon</i> [kg/m <sup>2</sup> ]. Fonte: MERRA-2	33
Figura 18: Concentração total de monóxido de carbono na coluna atmosférica no dia 17 de agosto registrada pelo satélite Sentinel-5P.	34
Figura 19: A mesma informação que a Figura 18, mas para o dia 18	34
Figura 20: : Trajetórias estimadas pelo HYSPLIT (linhas na figura). Cada parcela apresenta uma altitude inicial diferente, mas mesma localização inicial e tempo inicial (17Z de 18 de agosto de 2019) e final (17Z de 19 de agosto de 2019). Ao fundo, a concentração de CO estimada pelo Sentinel-5P.	35
Figura 21: Fluxo de radiação de onda curta no TOA estimada pelo CERES.	36
Figura 22: Fluxo de radiação de onda longa no TOA estimada pelo CERES.	37

## SUMÁRIO

<b>Introdução</b>	<b>9</b>
<b>Objetivos</b>	<b>12</b>
<b>Dados e Métodos</b>	<b>12</b>
<b>Resultados e Discussão</b>	<b>16</b>
Identificação e Classificação do Pirocumulonimbus	16
O incêndio	19
Incêndio Controle	21
O Pirocumulonimbus	22
Perfil Termodinâmico	25
Análise Sinótica	28
Pluma de fumaça	31
Balanço Radiativo	35
<b>Conclusão</b>	<b>37</b>
<b>Referências bibliográficas</b>	<b>38</b>
<b>APÊNDICE A — Figuras e Gráficos Complementares</b>	<b>42</b>

## 1. Introdução

Pirocumulos (PyroCu) são nuvens formadas ou alteradas com o auxílio de grandes fontes de energia, como incêndios florestais, que podem se desenvolver verticalmente em pirocumulonimbus (PyroCb) (TORY e THURSTON, 2015; Pirocumulonimbus, 2021). A existência dessas nuvens é conhecida há muito tempo (EBERT, 1963), entretanto a capacidade do PyroCb de injetar os poluentes emitidos pela fonte em altitudes elevadas, como na alta troposfera ou até na baixa estratosfera (FROMM e SERVIRANCKX, 2003) foi reconhecida apenas no início do século 21 (FROMM *et al.*, 2000).

Deste modo, pirocumulonimbus podem transformar um problema local em regional ou até mesmo global uma vez que a poluição terá um tempo de residência maior nas camadas mais altas da atmosfera e, conseqüentemente, poderá ser transportada por maiores distâncias e até alterar a dinâmica de ventos em altitudes elevadas, modificando a temperatura da camada por conta da interação entre as partículas injetadas e a radiação eletromagnética (FROMM *et al.*, 2000; CHRISTIAN *et al.*, 2019; KABLICK *et al.*, 2020). Portanto, essas nuvens podem auxiliar na dispersão de poluentes adversos à saúde humana como o material particulado fino (FERRO *et al.*, 2020; ALVES *et al.*, 2017), o monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos e compostos orgânicos voláteis e semivoláteis com alta toxicidade, e até contribuir para a geração de poluentes secundários como o ozônio troposférico (RIBEIRO e ASSUNÇÃO, 2002). Dentre estes, destaca-se o monóxido de carbono pois imagina-se ainda que seja um dos principais materiais a serem transportados para níveis superiores da atmosfera, uma vez que ele é carregado pela corrente ascendente de nuvens devido à sua baixa higroscopicidade (FREITAS *et al.*, 2005).

Nuvens do tipo PyroCu e PyroCb podem ser identificadas com a utilização de imagens de satélite. Os critérios adotados para a classificação de uma nuvem como pirocumulos, a partir de sensoriamento remoto, baseiam-se em detectar focos de incêndio nos canais 3,9  $\mu\text{m}$ , que aparecem como pontos de alta temperatura de brilho, e na presença de nuvens ancoradas aos focos no canal de 11,2  $\mu\text{m}$ , que possuem temperatura de brilho menor do que o ambiente ao seu redor. A transição para

pirocumulonimbus ocorre quando o topo da nuvem ancorada atinge uma temperatura de brilho menor ou igual a  $-40^{\circ}\text{C}$  (FROMM *et al.*, 2010). Uma evidência adicional para identificação de PyroCu e PyroCb são temperaturas de brilho acima de  $+10^{\circ}\text{C}$  no topo da nuvem no canal de  $3,9\ \mu\text{m}$  (LINDSEY e FROMM, 2008).

Em relação a uma nuvem cumulus comum, não formadas com o auxílio de plumas de fumaça, os PyroCu e PyroCb possuem características radiativas diferentes, já que a fumaça utilizada como núcleo de condensação aumenta seu albedo (TWOMEY, 1977).

Na região da radiação de onda longa, também conhecida por radiação terrestre (onde o comprimento de onda é superior a  $4\ \mu\text{m}$ ), o topo mais alto dessas nuvens diminui a quantidade de radiação emitida pela nuvem para o espaço, segundo a lei de Stefan-Boltzmann:

$$\epsilon(T) = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

Onde  $\epsilon$  é a irradiância emitida pelo corpo,  $\epsilon$  é a sua emissividade,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann e  $T$  é a temperatura do corpo.

Pelo mesmo princípio, também é reduzida a radiação de onda longa emitida da nuvem para a superfície, já que sua base é provavelmente mais alta do que o nível de condensação por levantamento (LAREAU e CLEMENTS, 2016), que é a base de cumulus comuns.

Outro impacto radiativo acontece pois a fumaça absorve radiação de onda curta, também chamada de radiação solar (com comprimento de onda menor que  $4\ \mu\text{m}$ ). A injeção atmosférica da pluma cria uma forçante radiativa, ou seja, uma perturbação no saldo radiativo causado pela interação do material com a energia eletromagnética (CHRISTIAN *et al.*, 2019). Esta diferença pode gerar uma alteração da temperatura da coluna atmosférica e, conseqüentemente, uma resposta meteorológica como a mudança na dinâmica de ventos ou formação de nuvens. Em queimadas florestais destaca-se o *black carbon*, conhecido também como fuligem. Esse importante aerossol (partícula líquida ou sólida em suspensão na atmosfera) é emitido pela combustão incompleta de biomassa e intensifica o efeito estufa com sua alta capacidade de absorver radiação solar. Sua forçante radiativa neste espectro é

positiva na camada atmosférica que o contém, e negativa em superfície e no topo da atmosfera (FOSTER *et al.*, 2007).

Ao absorver radiação solar a fumaça também estabiliza a atmosfera e atua como núcleo para condensação de gotículas de nuvem menores e mais numerosas do que o comum (KOREN *et al.*, 2004). Assim, a pluma injetada pode criar ambientes desfavoráveis à presença de nuvens e inibir a precipitação, desta forma impactando também o ciclo hidrológico. Se dispersa por maiores distâncias com o auxílio do pirocumulonimbus, este impacto pode atingir mais regiões.

A área de estudos é relativamente nova e as bases do conhecimento ainda estão sendo construídas. Por exemplo, o perfil termodinâmico ideal para a formação de nuvens a partir de incêndios florestais já é considerado consolidado como sendo aquele que apresenta o chamado “V invertido”: uma baixa atmosfera seca, que promove a dispersão do fogo, e uma média atmosfera úmida, que auxilia na formação de nuvens (TORY e KEPERT, 2021). Entretanto, o problema reside no fato de que a grande maioria dos estudos se concentra em casos não sul-americanos, como os eventos norte-americanos, australianos e russos. Assim, não se sabe se para gerar um pirocumulonimbus na América do Sul um incêndio precisa liberar mais ou menos energia do que um incêndio em outro continente, ou se o perfil termodinâmico do V invertido é uma exigência que independe do local.

Esta é uma questão que deve ser estudada, uma vez que os trópicos são responsáveis pela maior parte da queima de biomassa do mundo (ANDREAE, 1991). No Brasil, e em grande parte da América do Sul, as queimadas são provocadas anualmente nos meses de seca (COUTINHO; MIRANDA; MORAIS, 2002), principalmente para auxiliar o manejo agrícola (PMELLO *et al.*, 2021). Ainda, a quantidade de queimadas no Brasil, por exemplo, vem aumentando ao longo dos últimos anos, principalmente nos biomas Amazônia e Pantanal (INPE, 2020) e é esperado que as condições favoráveis para incêndio aumentem no país com as mudanças climáticas (COLLINS *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2016).

É possível prever que o aparecimento de pirocumulonimbus em locais onde as queimadas são comuns na América do Sul, como no arco do desmatamento, Pantanal e chaco boliviano, pode auxiliar que mais biomassa queimada seja transportada para

regiões da costa brasileira pelo corredor de ventos formado pelo Jato de Baixos Níveis (FREITAS *et al.*, 2005). Um exemplo disso ocorreu em 19 de agosto de 2019, quando a fumaça de queimadas na Bolívia e Amazônia foi transportada até a região metropolitana de São Paulo e, apesar de não ter sido observado aumento na concentração de poluentes em superfície, pode ser encontrada na precipitação local, causando mudanças na cor, odor e composição da chuva (PEREIRA *et al.*, 2021).

Levando a problemática levantada em consideração e sua importância, e também o fato de que no dia 18 de agosto de 2019 um pirocumulonimbus surgiu na fronteira entre Bolívia e Paraguai, foi realizado um estudo de caso com o intuito de entender os aspectos que levaram à geração dessa nuvem e seu impacto, local e regional, buscando encontrar suas semelhanças e diferenças com eventos que não ocorreram na América do Sul.

## **2. Objetivos**

O objetivo do presente estudo foi analisar o caso de pirocumulonimbus sul-americano ocorrido na fronteira entre Bolívia e Paraguai no dia 18 de agosto de 2019, a fim de compreender como se comportou o incêndio que o gerou, quais as condições atmosféricas que possibilitaram sua geração, seu impacto no fluxo de radiação, sua participação na injeção e dispersão dos poluentes emitidos pelo incêndio e, por fim, suas semelhanças e diferenças com eventos ocorridos fora da América do Sul.

## **3. Dados e Métodos**

O presente estudo de caso buscou abranger toda informação disponível e relevante para alcançar os objetivos. Deste modo, foram utilizados dados brutos e de produtos de sensoriamento remoto, radiossondagens e dados de modelos meteorológicos.

Todos os valores obtidos foram comparados, quando disponíveis, com dados de outros eventos mundiais de pirocumulonimbus registrados na literatura acadêmica. Foram coletados os valores de Fromm *et al.* (2010), Lareau e Clements (2016) e também do banco de dados de casos de pirocumulos e pirocumulonimbus do Instituto Cooperativo de Estudos de Satélite Meteorológico (CMISS, do inglês *Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies*) da Universidade de Wisconsin-Madison<sup>1</sup>. Para os casos deste site, foram coletados manualmente valores de temperaturas de brilho mínimas do topo de pirocumulonimbus estimadas a partir de canais do infravermelho e também o Índice de Aerossol máximo do evento, que é estimado a partir dos canais do ultravioleta. Os dados coletados nesse caso se limitaram apenas aqueles divulgados explicitamente no texto descrevendo cada evento no site. No caso de eventos com geração de mais de um pirocumulonimbus, foi coletado o menor valor de temperatura do topo.

A identificação da nuvem pirocumulonimbus foi feita utilizando dados do satélite GOES-16 e aplicando os critérios de Fromm *et al.* (2010) e Lindsey e Fromm (2008): os focos de incêndios foram detectados pela alta temperatura de brilho no canal de 3,9  $\mu\text{m}$  e as nuvens pela baixa temperatura de brilho no canal de 11,2  $\mu\text{m}$  e temperatura de brilho acima de 10°C em 3,9  $\mu\text{m}$ . Feito isto, realizou-se uma análise da queimada que a gerou. Foi investigada a evolução temporal e espacial do incêndio, sua área instantânea total e potência radiativa total (FRP, do inglês *Fire Radiative Power*) com os dados de resolução espacial de 2 km e temporal de 10 minutos do produto *Fire Characterization and Detection* do satélite GOES-16<sup>2</sup>. Tanto a área total quanto a potência radiativa total foram calculadas somando-se os dados de cada ponto do incêndio de maior extensão entre as latitudes 18,3°S e 19,75°S e entre as longitudes 60°W e 58°W, de modo que outros incêndios vizinhos não fossem contabilizados.

Como forma de complementar a análise, devido à baixa resolução espacial do produto mencionado anteriormente, foram utilizados também os dados de FRP dos sensores gêmeos *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo dos satélites Aqua e Terra, cuja resolução espacial é de 1 km, e também do sensor

---

<sup>1</sup>Disponível em <<http://pyrocb.ssec.wisc.edu/>>

<sup>2</sup>Disponível em: <[home.chpc.utah.edu/~u0553130/Brian\\_Blaylock/cgi-bin/goes16\\_download.cgi?source=aws&satellite=n0aa-goes16&domain=F&product=ABI-L2-FDC](http://home.chpc.utah.edu/~u0553130/Brian_Blaylock/cgi-bin/goes16_download.cgi?source=aws&satellite=n0aa-goes16&domain=F&product=ABI-L2-FDC)>

*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) presente no satélite Suomi-NPP, com 375 m de resolução<sup>3</sup>. Neste trabalho, apenas foram considerados os dados de qualidade cuja confiança fosse superior à 50%, no caso do MODIS, e nominal ou alta, no caso do VIIRS.

Para que as possíveis características que levaram à geração do pirocumulonimbus no dia 18 de agosto fossem isoladas, foi eleito um “incêndio controle”, isto é, uma queimada de proporções parecidas que ocorreu em condições climáticas semelhantes às do caso mas que não houvesse gerado uma nuvem. A busca por candidatos e escolha foi feita analisando-se os valores de FRP máximo dos produtos do MODIS e VIIRS no mesmo local e época do ano da queimada do dia 18.

Finalmente, foi aplicado o índice *Pyrocumulonimbus Firepower Threshold*, PFT, (TORY e KEPERT, 2021) que visa calcular o FRP, a partir de dados do perfil termodinâmico do ambiente, necessário para uma queimada desenvolver um pirocumulonimbus. Neste caso, o perfil termodinâmico usado foi o disponibilizado para as 08:00 LT da radiossondagem lançada em Corumbá, distante cerca de 185 km do local.

No passo seguinte, o pirocumulonimbus em si foi estudado. Foram utilizados os valores e evolução temporal dos seguintes dados dos produtos de topo de nuvem do satélite GOES-16: altura, temperatura, pressão e fase da água. Do mesmo modo, foi verificada a estimativa de precipitação.

Feito isso, partiu-se para a investigação do ambiente que favoreceu o incêndio e também a geração da nuvem. Esta etapa foi feita pensando-se na pequena escala, avaliando o perfil termodinâmico por radiossondagens reais realizadas no aeroporto de Corumbá e também radiossondagens estimadas utilizando dados do perfil vertical de temperatura, umidade específica, velocidade do vento, pressão e umidade volumétrica do solo de reanálises do modelo ERA5 (gerado usando o sistema *Copernicus Climate Change*, 2021, com resolução temporal de 1h e espacial de 0,25°), e na grande escala, analisando-se as condições sinóticas que resultaram no comportamento da pequena escala a partir das cartas sinóticas emitidas pelo Centro

---

<sup>3</sup>Disponível em <<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>>

de Previsões do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)<sup>4</sup>.

Após isto, procurou-se verificar se a nuvem auxiliou na injeção atmosférica de poluentes. O conteúdo da pluma de fumaça e sua altura foram analisados com o Índice de Aerossol (TORRES, 2019) do sensor *Ozone Mapping and Profiler Suite* (OMPS) a bordo do satélite Suomi-NPP e o mesmo produto do sensor *TROPOspheric Monitoring Instrument* (TROPOMI) a bordo do satélite SENTINEL-5P. A altura da camada de aerossol, concentração de metano, monóxido de carbono, formaldeído, dióxido de nitrogênio, ozônio e dióxido de enxofre também foram analisadas por meio dos dados do último sensor. Analisou-se a profundidade óptica do aerossol (AOD) estimada com o sensor MODIS. A concentração de *black carbon* foi verificada com o gráficos do modelo *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Versão 2* (MERRA-2) gerado por meio do sistema de dados online *Giovanni*, desenvolvido e mantido pelo *Data and Information Services Center* do *Goddard Earth Sciences* da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA GES DISC) (ACKER e LEPTOUKH, 2007). Os dados MERRA-2 usados neste estudo foram fornecidos pelo *Global Modeling and Assimilation Office* (GMAO) no *Goddard Space Flight Center* da NASA.

A trajetória da pluma de fumaça foi verificada com o uso do modelo Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) (STEIN *et al.*, 2015; ROLPH, STEIN e STUNDER, 2017)<sup>5</sup>. No modo normal, foram utilizadas as variáveis meteorológicas de entrada obtidas do modelo *Global Forecast System* (GFS) com resolução de 0,25°, utilizando como tipo de movimento vertical a velocidade vertical do modelo, e calculando trajetórias com altitudes iniciais de 0 metros acima do nível do chão até a altura máxima da camada de aerossol identificada pelo passo anterior, em intervalos de 500 em 500 metros. As localizações finais das trajetórias foram utilizadas para identificar variações de irradiância solar global em estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) próximas.

Por fim, a estimativa da interferência da nuvem no albedo, fluxos de onda curta, longa e total no topo da atmosfera (TOA) foi realizada utilizando os dados do *Clouds*

---

<sup>4</sup>Disponível em <<http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt>>

<sup>5</sup>Disponível em <<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>>

and the Earth's Radiant Energy System (CERES) cuja resolução é de  $1^\circ \times 1^\circ$  e que também estima as variáveis citadas sem a presença de nuvens, obtidas pelo Nasa Langley Research Center Atmospheric Sciences Data Center<sup>6</sup>. A forçante radiativa foi estimada subtraindo o fluxo de radiação de ondas curtas no TOA estimada para uma atmosfera sem nuvens do valor real, considerando nuvens.

## 4. Resultados e Discussão

### 4.1. Identificação e Classificação do Pirocumulonimbus

O ano de 2019 foi marcado por uma série de incêndios florestais em toda a América do Sul. Na região boliviana do Chaco, queimadas com intuito de promover a limpeza do pasto para agricultura, conhecidas como *chaqueo*, se alastraram por toda a região da Chiquitania, ultrapassando os territórios agrícolas e causando devastação às reservas ecológicas. Após uma série de incêndios em agosto, na região fronteira entre Paraguai e Bolívia, uma queimada sobre o Parque Ñembi Guasú e o Monumento Nacional Cerro Chovoreca (aproximadamente  $19,3^\circ\text{S } 59,4^\circ\text{W}$ , Figura A-1 do Apêndice A) causou a gênese de duas nuvens. De acordo com dados do programa de queimadas do INPE, o local estava até 23 dias sem chuva e com risco crítico de incêndio.

A nuvem com maior desenvolvimento vertical foi primeiramente registrada por Bachmeier (2019) como um pirocumulonimbus no site CMISS. Esta nuvem foi a segunda, e última, catalogada para a região da América do Sul no site. Não há menção, contudo, da presença da outra nuvem gerada, do tipo pirocumulos, no banco de dados. Dias após a ocorrência, uma nota emitida pelo INPE registrou a colaboração desta queimada no transporte de fumaça para o sudeste brasileiro. Na nota uma imagem de satélite é apresentada, onde o pirocumulonimbus está presente e discernível pelo formato de bigorna, no entanto não há reconhecimento da particularidade da nuvem no texto<sup>7</sup>. O possível impacto do incêndio na alteração da

---

<sup>6</sup>Disponível em <<https://ceres.larc.nasa.gov/data/>>

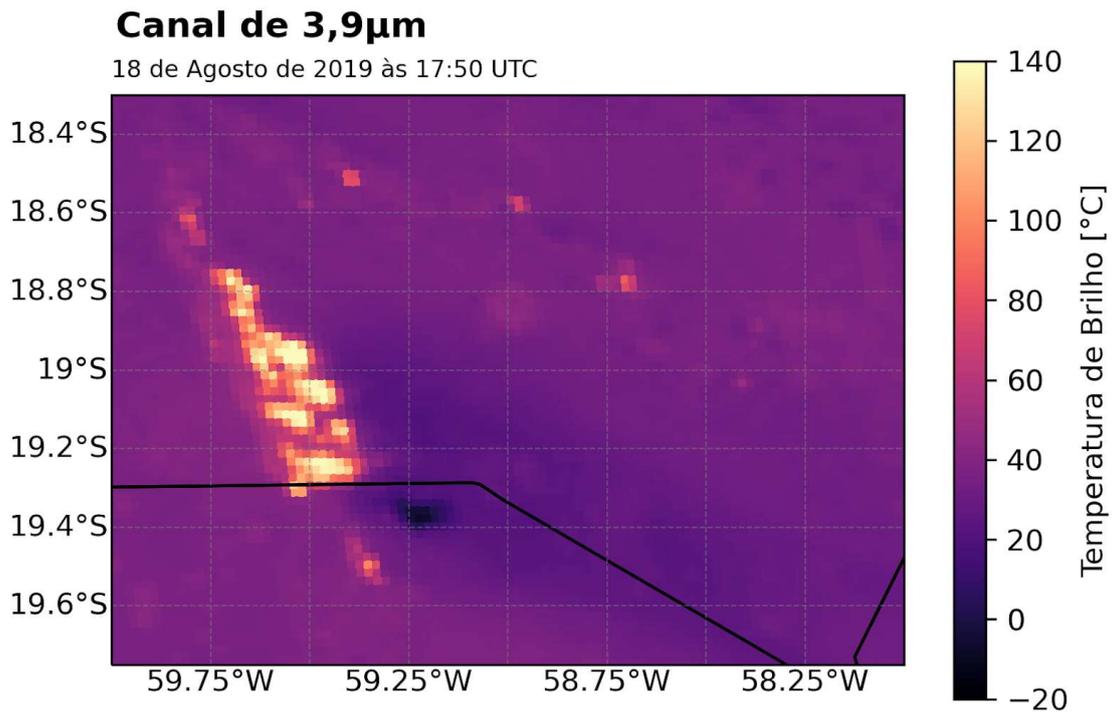
<sup>7</sup>Disponível em: <[https://www.oeco.org.br/wp-content/uploads/2019/08/EventoNuvemEcuridaoFumaca\\_SaoPaulo\\_SP-1.pdf](https://www.oeco.org.br/wp-content/uploads/2019/08/EventoNuvemEcuridaoFumaca_SaoPaulo_SP-1.pdf)>

precipitação em São Paulo, causando uma chuva de coloração escura e com odor remetente à material queimado, conhecido como “chuva preta”, também foi registrado por Pereira *et al.* (2021), mas a presença do PyroCb também não foi notada.

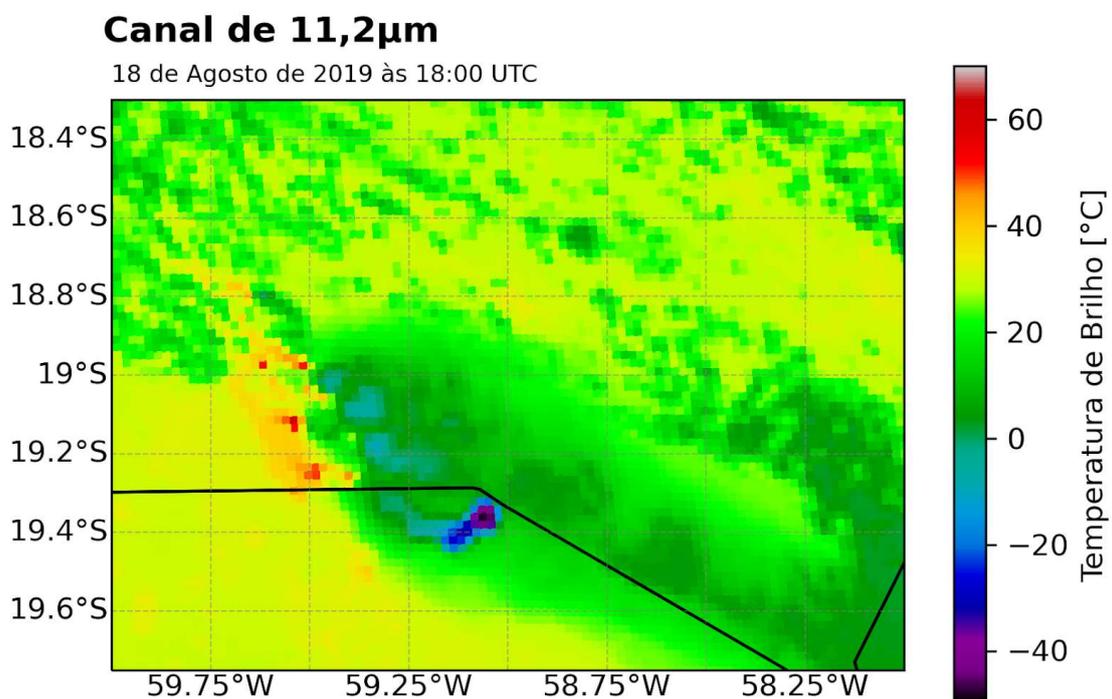
A classificação de uma nuvem como pirocumulus, conforme consta na introdução, baseou-se na presença de *hotspots* no canal de ondas curtas, com nuvens presentes, identificáveis pelas temperaturas de brilho mais frias do que a superfície na faixa do infravermelho e também pela coloração esbranquiçada e forma de cumulus na imagem RGB. No canal de 3,9  $\mu\text{m}$  do satélite GOES-16, os focos de queimadas estão destacados e alcançaram temperaturas de brilho superiores a 130°C (Figura 1). A temperatura de brilho no canal de infravermelho termal (11,2  $\mu\text{m}$ ) destacou duas nuvens (apenas a primeira nuvem é apresentada nas figuras) que se originaram na linha de fogo em momentos diferentes e se desprenderam conforme o passar do tempo, tendo topos mais esbranquiçados e destacados da pluma de fumaça (Figura 3) fazendo com que pudessem ser classificadas como pirocumulus. Ainda, a primeira nuvem se desenvolveu verticalmente de tal maneira que seu topo adquiriu temperaturas neste canal abaixo de -40°C elevando sua categoria à de pirocumulonimbus. A temperatura mínima atingida pelo seu topo (-47,8°C às 14:00 LT, apresentado na Figura 2) está dentro dos valores de temperatura de brilho mínima do topo de PyroCb's catalogados por Fromm *et al.*, 2010 e também dos presentes no banco de dados de pirocumulonimbus da CMISS (Figura A-4 do Apêndice A).

Apesar disso, o critério adicional não foi cumprido já que a mais alta temperatura da nuvem em 3,9  $\mu\text{m}$  estava em torno dos -8°C, distante do esperado. Ainda assim, devido ao fato de que os principais critérios foram satisfeitos, pode-se concluir que as nuvens em questão eram pirocumulus, sendo que uma delas apresentou características de pirocumulonimbus.

**Figura 1:** Temperatura de brilho no canal 3,9  $\mu\text{m}$  do satélite GOES-16



**Figura 2:** Temperatura de brilho no canal 11,2  $\mu\text{m}$  do satélite GOES-16.



As demais análises focaram-se em estudar o evento do ponto de vista da geração do pirocumulonimbus visto que esta nuvem é mais incomum. Deste modo, o emprego do termo “nuvem” no restante do trabalho se refere ao pirocumulonimbus.

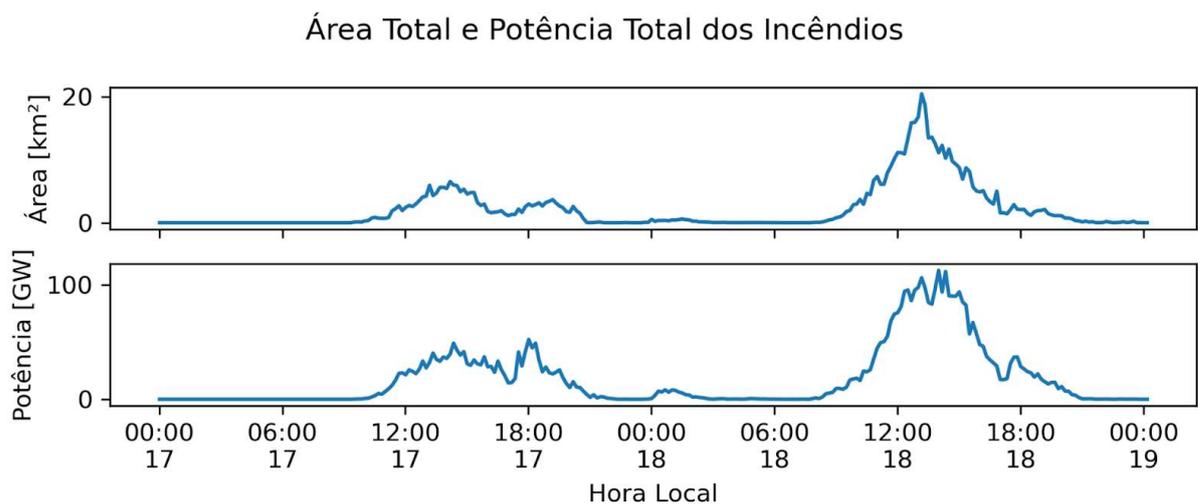
**Figura 3:** Pirocumulonimbus vista pelo satélite Sentinel-2 às 10:18 LT.



## 4.2. O incêndio

Diversas queimadas ocorreram durante a semana que precedeu à geração do pirocumulonimbus naquela mesma área. Os incêndios obedeciam a um ciclo diurno, se desenvolvendo pela manhã, atingindo o pico durante a tarde e se apagando à noite. Todavia, a intensidade de cada incêndio na fronteira Bolívia/Paraguai aumentou dia após dia até atingir os valores de área e potência observados em 18 de agosto (Figura 4).

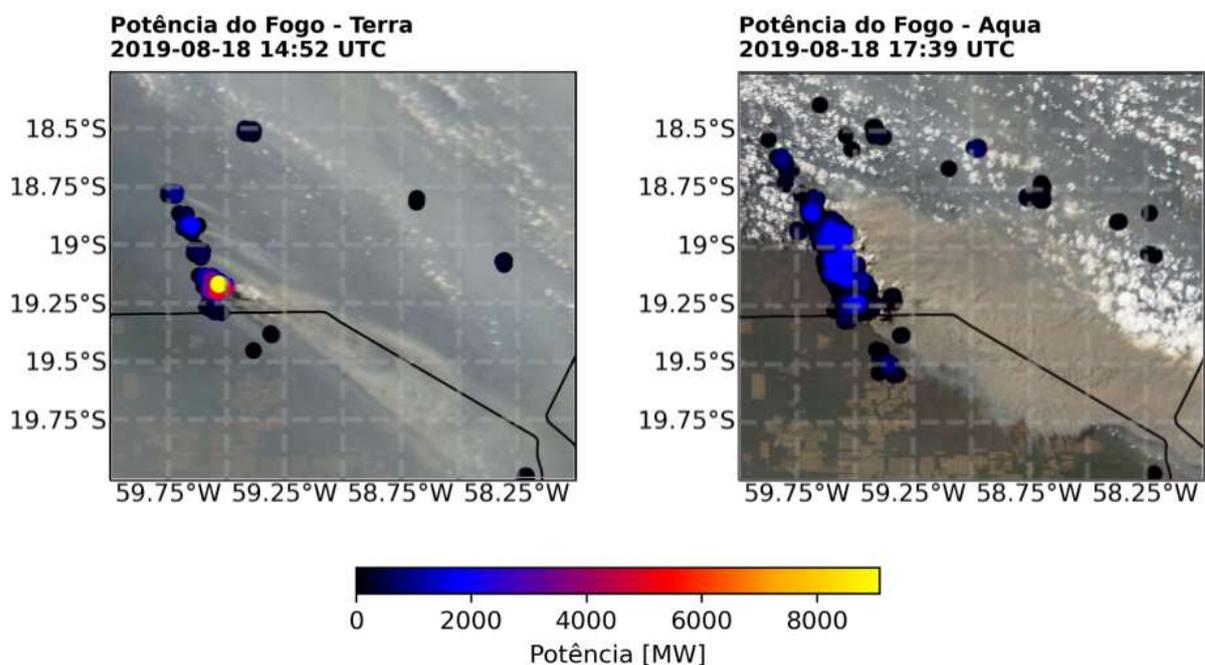
**Figura 4:** Ciclo de potência e área instantânea dos incêndios analisados. Fonte dos dados: produtos do GOES-16.



O incêndio do dia 18 de agosto alcançou uma área instantânea máxima de 20,5 km<sup>2</sup> aproximadamente às 13:10 LT (Figura 4). Menos de uma hora depois, atingiu seu pico de potência total máxima com 112,9 GW, sendo que a maior potência de um único ponto foi de 9,1 GW, atingida mais cedo, às 10:50 LT. Apesar dos altos valores registrados, imagina-se que estejam subestimados pois a presença de nuvens e fumaça interfere nas estimativas do satélite. Este fato pode ser observado na Figura 5, onde não foi possível estimar a potência do fogo nas áreas com a pluma de fumaça, o que sugere que parte do incêndio possa ter sido encoberto pela fumaça, assim como explicado por Gatebe *et al.* (2012).

Este incêndio foi capaz de superar a energia total emitida instantaneamente por queimadas conhecidas que geraram PyroCb's como as de *Bald Fire* e *Rocky Fire* (LAREAU e CLEMENTS, 2016) que atingiram uma potência do fogo (FRP) máxima para um único ponto de 2,3 GW e 1,5 GW no dia em que geraram pirocumulonimbus, respectivamente, sendo 75% e 84% menor do que o FRP máximo do caso. Somando-se o FRP de todos os pontos do incêndio, a queimada analisada neste estudo obteve um valor 83% maior do que o do *Bald Fire* (19,7 GW).

**Figura 5:** Imagens do RGB do incêndio do dia 18 de agosto de 2019 superpostas pela potência do fogo estimada.



O índice Pyrocumulonimbus Firepower Threshold (PFT) visa calcular o FRP mínimo necessário para a formação de um pirocumulonimbus. Para o dia 18 de agosto, utilizando a radiossondagem real das 08:00 LT, esse valor era de 523 GW, sendo mais do que 4 vezes maior do que o FRP total observado. Entretanto, devido ao fato de que o horário e localização da radiossondagem não serem ideais para a caracterização do ambiente onde a nuvem foi gerada, imagina-se que este número seja pouco confiável.

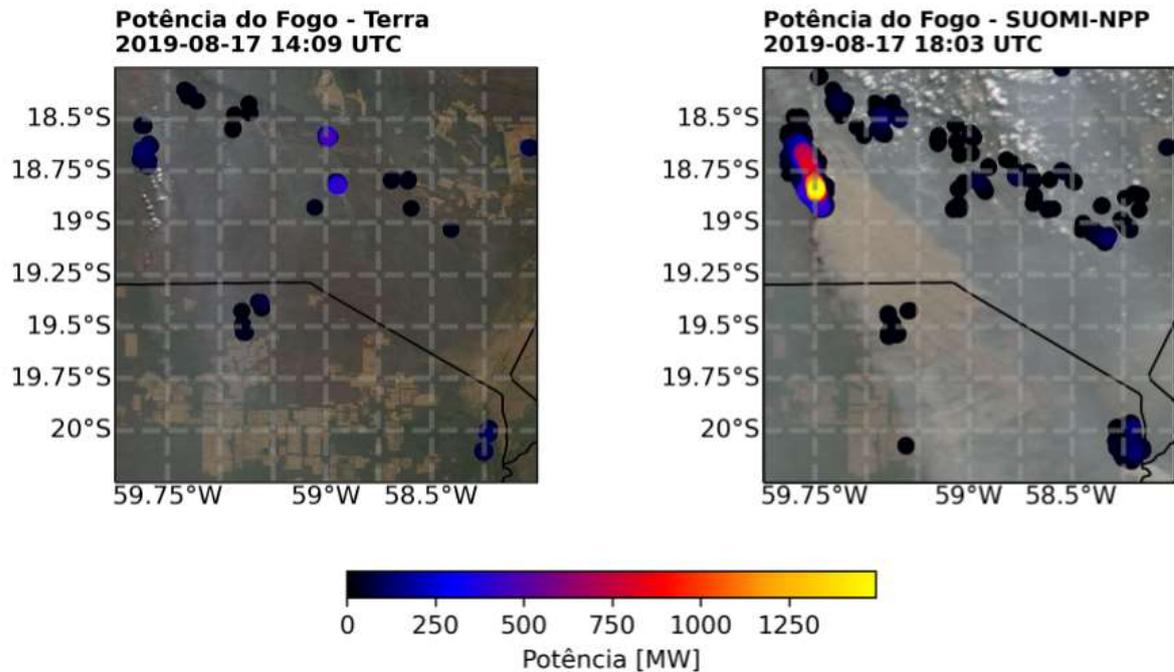
### **4.3. Incêndio Controle**

Para entender as possíveis particularidades do dia 18 em gerar um pirocumulonimbus, um incêndio “controle”, isto é, sem geração de nuvens desse tipo, foi escolhido de modo que ambos houvessem ocorrido em condições meteorológicas similares e com uso de solo parecido. Após examinar diversas queimadas, conforme descrito na Metodologia, a escolhida foi a que aconteceu no dia 17 de agosto de 2019, o dia anterior à geração do pirocumulonimbus, no mesmo local do incêndio do dia 18 (Figura 6).

Foi verificada e descartada a presença de pirocumulonimbus no incêndio controle, aplicando-se os mesmos critérios adotados para o dia 18. O ciclo diurno de área instantânea e energia do incêndio controle foi similar ao do dia 18 (Figura 4), sendo que no primeiro dia o fogo se inicia mais tarde do que no segundo e atinge uma área instantânea máxima e potência total máxima menor (6,5 km<sup>2</sup>, 52,4 GW). O padrão de propagação do incêndio também é similar nos dois dias (Figuras 5 e 6).

Durante a madrugada, nos dois dias, ocorreu a passagem de nuvens direcionadas para nordeste e, durante a tarde, nuvens cumulus esparsas típicas foram transportadas até o local vindas de norte/nordeste, indicando condições meteorológicas similares. A presença de nuvens deste tipo não é exclusiva do caso de estudo, sendo registrada interferência parecida no caso de pirocumulonimbus registrado por Gatebe *et al.* (2012).

**Figura 6:** A mesma informação que a Figura 5, mas para o dia anterior.



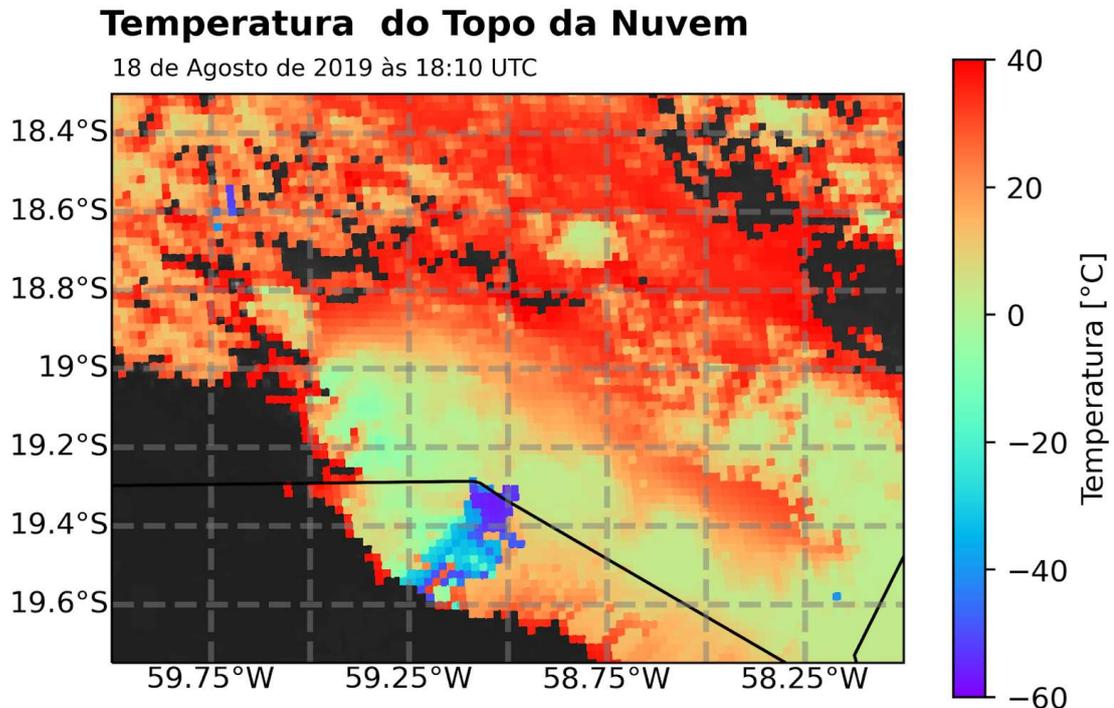
Para o dia 17, também utilizando a radiossondagem real das 08:00 LT, o índice PFT apontava que a gênese de um pirocumulonimbus ocorreria apenas na presença de um incêndio de pelo menos 1430 GW de FRP. O valor é maior que o dobro do PFT para o dia seguinte e demonstra como o dia 18 possuía maior probabilidade de gerar pirocumulonimbus.

#### 4.4. O Pirocumulonimbus

Voltando à análise da queimada do dia 18 de agosto, é possível identificar o aparecimento de uma nuvem ancorada ao fogo, identificada pelo produto de caracterização de nuvens do GOES-16, por volta das 08:30 LT. A temperatura de seu topo atingiu valores menores do que  $-50^{\circ}\text{C}$  durante horas, com um mínimo de  $-57,15^{\circ}\text{C}$  às 14:10 LT (Figura 7). A presença de gelo no topo é confirmada pelo produto às 14:00 LT, após o aparecimento das fases de água líquida, água super-resfriada e fase mista. Além disso, apesar da fumaça suprimir a precipitação ao

criar gotículas de nuvens menores e mais numerosas (REUTTER *et al.*, 2014), foi observada chuva com até 4 mm/h em um único ponto.

**Figura 7:** Menor temperatura do topo do pirocumulonimbus.

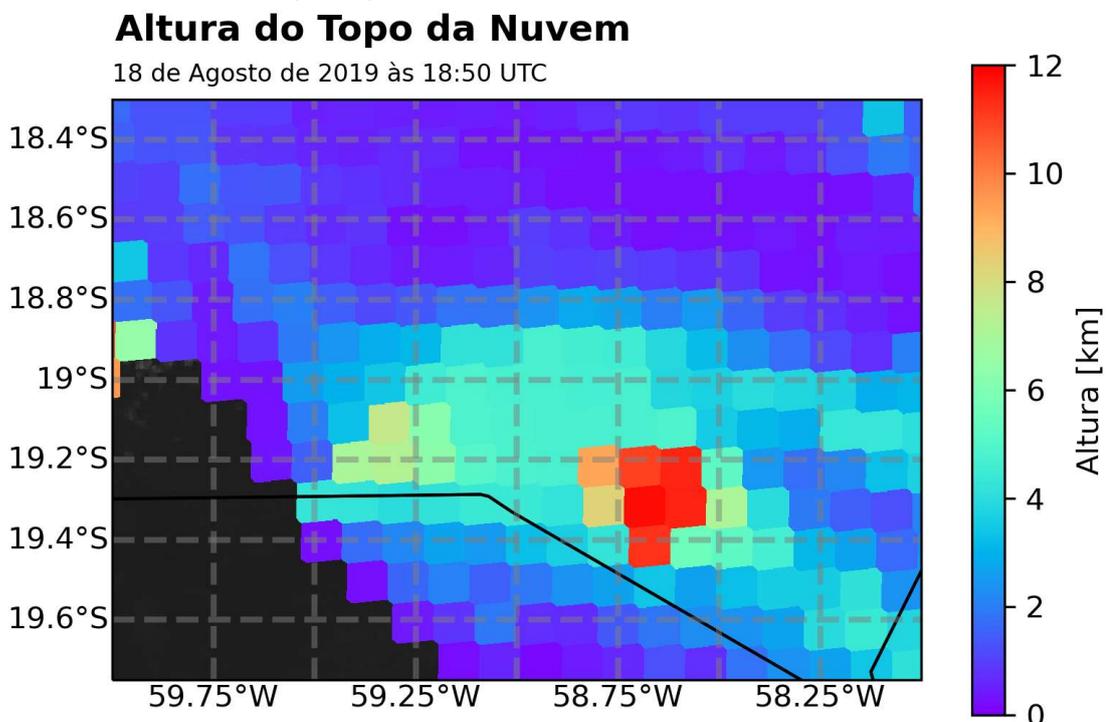


Ao contrário de cúmulos comuns, a altura da base não pode ser estimada pelo nível de condensação por levantamento (LCL), pois a presença da fumaça suprime a convecção e, deste modo, a base da nuvem é alcançada em níveis mais altos (LAREAU e CLEMENTS, 2015). É mais indicado, portanto, estimar a base de um pirocumulonimbus pelo nível de condensação por levantamento da parcela mais instável, o MULCL, (PETERSON *et al.*, 2017). Deste modo, o PyroCb boliviano possuía uma base entre 825 hPa, quando ocorre o mínimo de MULCL, e 750 hPa, valor próximo do horário no qual a nuvem apresentou o maior desenvolvimento. Essas alturas de base para pirocumulonimbus também não são diferentes das registradas por Peterson *et al.* (2017). Utilizando a equação hipsométrica para calcular a espessura entre o topo (aproximado para 350 hPa) e a base (utilizando o MULCL calculado de 750 hPa) da nuvem às 14:00 LT, próximo do horário em que a temperatura apresentou seu menor valor, estima-se que a nuvem teria alcançado 6 km de extensão neste momento. Este valor está entre a extensão que é esperada para

uma cumulonimbus comum, que pode ir desde 2 km nos oceanos polares a 20 km no equador (NORTH, 2015).

Por fim, a altura máxima do topo (11,78 km, Figura 8) e a pressão mínima do topo (216 hPa) desta nuvem também não estão fora da distribuição registrada na literatura consultada. Pelo fato de todas as características físicas da nuvem, conforme as variáveis analisadas neste trabalho, estarem dentro de suas respectivas distribuições reportadas na literatura (Figuras A-4 e A-5 no Apêndice A), conclui-se que o pirocumulonimbus estudada não apresentou diferença física de outras nuvens do mesmo tipo que ocorreram fora da América do Sul.

**Figura 8:** Maior altitude do topo do pirocumulonimbus.

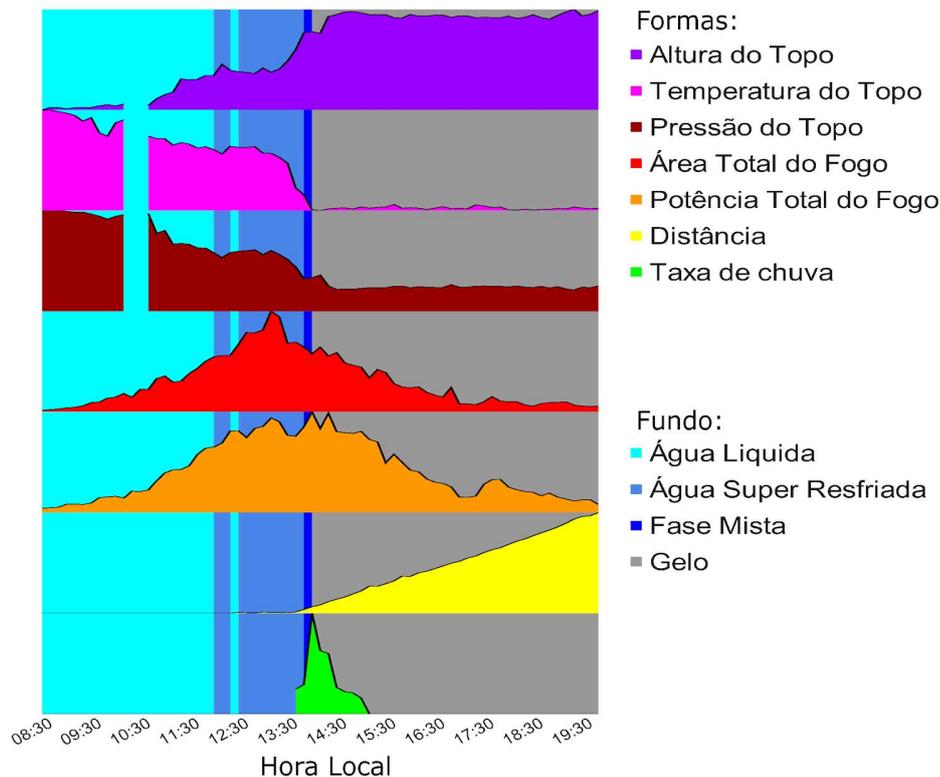


Um dos detalhes observados é que a evolução temporal da nuvem acompanha a do fogo (Figura 9). No momento em que é atingido o ápice de energia instantânea e área da queimada, a nuvem adquire rapidamente os valores extremos de temperatura, altitude e pressão, com formação de gelo em sua bigorna e precipitação. Além disso, isto acontece quando a nuvem começa a ganhar distância do ponto onde foi gerada ao ser transportada pelo vento. Este comportamento pode demonstrar que ambos os ciclos estão, de alguma forma, conectados. Por outro lado, o fato do incêndio perder área instantânea e potência quando a nuvem se desenvolve pode ser pela diminuição

da energia solar incidente bloqueada pela nuvem ou pela extinção das chamas com a precipitação.

**Figura 9:** Evolução de propriedades da queimada e do PyroCb. Os dados utilizados para as formas estão normalizados de modo que sua extensão vertical máxima seja a mesma para cada variável. “Distância” se refere ao espaço entre a nuvem e seu local de origem.

### Evolução da queimada e pirocumulonimbus



Durante o incêndio controle, conforme citado anteriormente, algumas nuvens penetraram na camada de fumaça. Porém, a temperatura mínima alcançada pelo topo de qualquer nuvem dentro da pluma foi de  $-5^{\circ}\text{C}$ , com altura máxima de 4,5 km, sem que houvesse a presença de chuva.

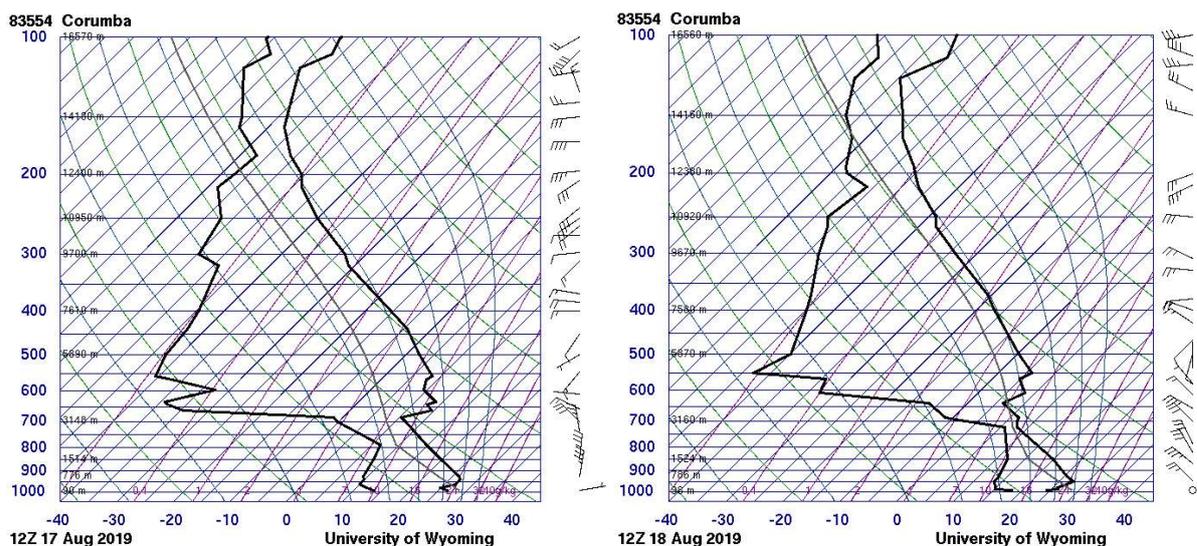
## 4.5. Perfil Termodinâmico

Ao analisar os perfis de temperatura da atmosfera (Figura 10), o “V invertido” pode ser visto tanto no dia 17 quanto no dia 18, sendo mais definido no último. Apesar da coluna atmosférica como um todo estar mais úmida no dia em que a nuvem foi gerada do que no anterior, a média atmosfera estava seca. Idealmente, para que a formação de nuvens fosse favorecida, as curvas definidas pela temperatura e temperatura do ponto de orvalho deveriam seguir próximas conforme a pressão

diminui acima do V invertido, indicando um ambiente próximo da saturação. Entretanto, a média atmosfera seca, apesar de não ideal, foi observada em casos localizados fora da América do Sul também. O incêndio de Hayman Fire em 2002, por exemplo, gerou diversas nuvens pirocumulonimbus nos seus dias de ocorrência e dentre eles destaca-se o dia 10 de junho, quando havia uma média atmosfera seca acima de um V invertido.

Em relação ao incêndio controle, aquele que gerou o pirocumulonimbus foi mais frio, ainda que até 10°C mais quente do que a média climatológica, e mais úmido do que o do dia anterior, apesar de ser mais seco do que a média climatológica em níveis médios.

**Figura 10:** Radiossondagem de Corumbá às 08:00 LT (12 Z) do dia 17 (à esquerda) e 18 (à direita). Em cada radiossondagem, a curva da mais à esquerda representa a temperatura do ponto de orvalho, enquanto a curva mais à direita representa a temperatura.



A inversão do padrão de umidade esperado que foi observada, isto é, idealmente mais seco em superfície do que em níveis mais altos, e o fato de que a temperatura do ar estava menor do que o dia anterior fez com que outras variáveis fossem procuradas para explicar porque aquele ambiente foi capaz de gerar uma nuvem com desenvolvimento vertical tão intenso a partir de uma queimada. A fuga do padrão termodinâmico ideal também pode explicar o fato de que para gerar a nuvem, o incêndio teve que ter mais potência e atingir uma área maior, provendo deste modo energia suficiente para geração do pirocumulonimbus. Duas possíveis explicações

para a criação de uma queimada de grandes proporções, apesar da baixa atmosfera mais úmida e fria, são a umidade do solo e a velocidade do vento.

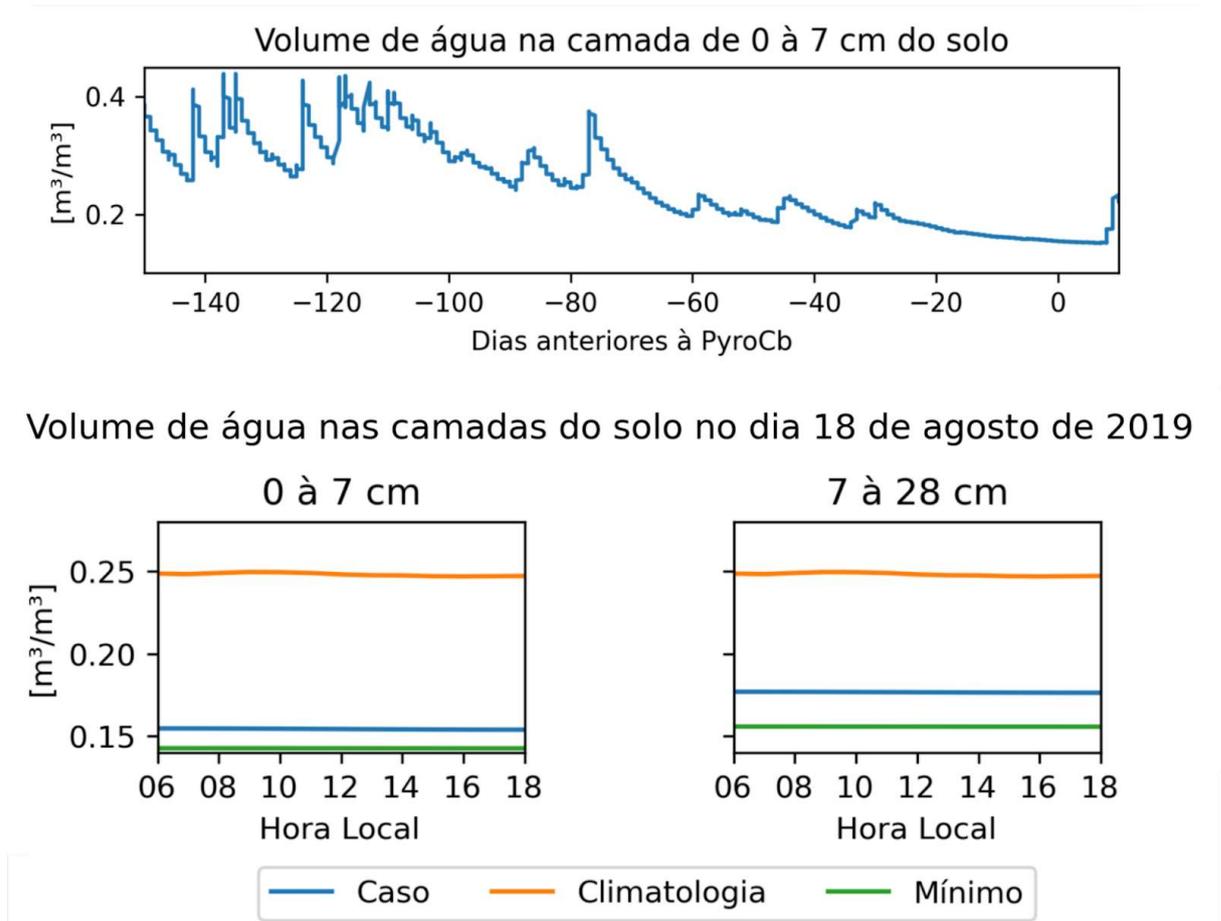
Sabe-se que grandes incêndios estão relacionados à anomalias prévias de umidade no solo, sendo que em regiões tropicais esta anomalia é negativa (O *et al.*, 2020). Esse fato é refletido nos dados de volume de água no solo do modelo ERA5, principalmente nas camadas mais superficiais que se aproximavam do mínimo histórico de umidade. Por exemplo, havia no dia 40% menos água do que a média climatológica na camada de solo compreendida entre a superfície e 7 cm de profundidade (Figura 11, gráficos inferiores). A diminuição do volume de água na camada mais superficial havia se iniciado meses antes do incêndio estudado e só voltou a aumentar alguns dias depois (Figura 11, gráfico superior). A falta de umidade do solo, ao invés de uma baixa atmosfera mais seca e mais quente, pode ter fornecido condições necessárias para que o fogo se espalhasse e se sustentasse, atingindo a extensão e potência observados. Solos mais úmidos terão sua temperatura menos elevada, já que seu calor específico é menor do que o de um solo seco e, deste modo, é necessário que o incêndio ceda uma maior quantidade de energia para esquentá-lo. Além disso, o solo seco proporciona a existência de queimadas mais energéticas pois não há troca de calor para a evaporação da água no solo (COSTA; RODRIGUES, 2015).

O vento, também obtido com o ERA5, apresentou grande diferença de um dia para o outro. O pirocumulonimbus foi gerado em um dia com ventos mais fortes (até 20 m/s a mais, tendo um valor máximo de 17,8 m/s em 1000 hPa) e com menos cisalhamento de velocidade e direção no dia controle. O vento intenso também pode ter ajudado o fogo a se espalhar carregando suas brasas. Além disso, o baixo cisalhamento observado (menos do que 5 m/s a partir das 14:00 LT) também pode ter favorecido o desenvolvimento da nuvem, visto que é um dos fatores comuns a eventos extremos de pirocumulonimbus na América do Norte (PETERSON *et al.*, 2017).

Apesar de não haver bibliografia relacionando a maior parte dos índices meteorológicos a eventos de pirocumulonimbus, a baixa Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE) (menos de 4 J/kg) e o índice de potencial de incêndios Haines (5, indicando potencial moderado de fogo) estimados estão dentro da distribuição

catalogada por Fromm *et al.* (2010) (Figura A-6 do Apêndice A). Todos os outros índices meteorológicos, tanto os da radiossondagem de Corumbá quanto os estimados por produtos do GOES-16, apontavam para estabilidade ou instabilidade condicional.

**Figura 11:** Variação diária antes do dia 18 (acima) e durante o dia 18 (abaixo) da umidade do solo estimada pelo modelo ERA5.



#### 4.6. Análise Sinótica

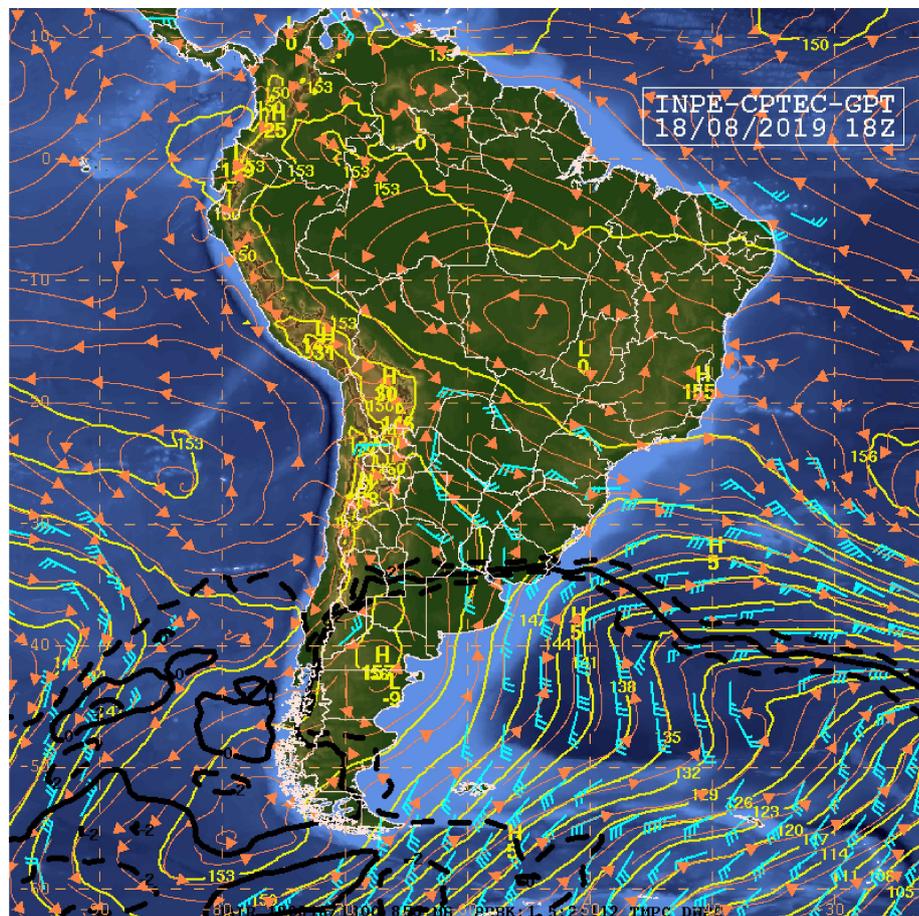
A diferença de temperatura, umidade e vento entre os dias 17 e 18 descrita no subcapítulo anterior pode ser explicada pela variação dos sistemas sinóticos que atuavam sobre o local.

O vento em baixos níveis no dia 17 de agosto é fruto apenas do Jato de Baixos Níveis atuando sobre o local. No dia seguinte, a aproximação de uma frente fria

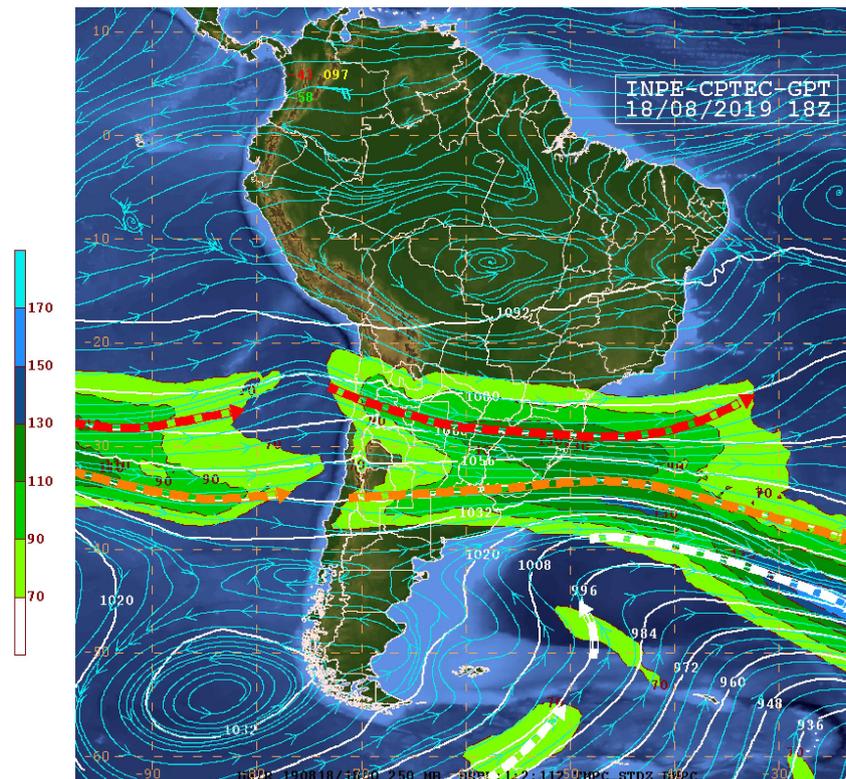
bloqueou a saída do jato exatamente na fronteira entre Bolívia e Paraguai, criando uma zona de confluência no local e alterando a direção dos ventos para sudeste/leste em 850 hPa (Figura 12).

Em ambos os dias, um sistema de alta pressão em 250 hPa no norte da Bolívia influenciava a direção do vento em altitudes elevadas no local de estudo (Figura 13). O deslocamento para leste desse sistema de um dia para o outro, entretanto, fez com que a direção do vento no ramo anticiclônico que atingiu o local se modificasse. Deste modo, em 250 hPa, o dia 17 apresentou ventos de sudoeste para nordeste, enquanto, no dia 18, a direção era de oeste para leste. Além disso, a passagem do jato subtropical próximo à área (linha tracejada vermelha na Figura 12), no dia 18, também contribuiu para a direção final observada. Por fim, uma leve diferença entre a direção do vento mais influenciada pela alta pressão e pelo jato criou uma zona de difluência em altos níveis.

**Figura 12:** Carta sinótica em 850 hPa das 18Z do dia 18 de agosto. Fonte: INPE



**Figura 13:** carta sinótica de 250 hPa das 00Z do dia 18 de agosto. Fonte: INPE.



Com este mecanismo fica claro o porquê do perfil do vento em altitude ser constante em direção e ter maior intensidade. Ademais, a junção desses sistemas sinóticos é capaz de explicar também o comportamento de outras variáveis meteorológicas. A temperatura do ar no dia 18, por exemplo, era mais baixa do que a do dia 17, ainda que acima de seu valor climatológico, por conta da aproximação da massa de ar mais fria. Já a quantidade de água na atmosfera local, enunciada pela umidade específica, foi maior no segundo dia pois havia confluência de ventos que transportavam umidade, principalmente da floresta amazônica, em baixas altitudes. Deste modo, um ambiente mais favorável ao desenvolvimento de nuvens foi criado no dia 18.

A difluência e confluência, juntamente com a presença de uma baixa térmica em superfície no local (Figura não apresentada), a baixa umidade no solo e ventos fortes e constantes, conforme visto no subcapítulo anterior, podem ser os fatores que explicam porque um pirocumulonimbus se formou no dia 18 e não no dia anterior.

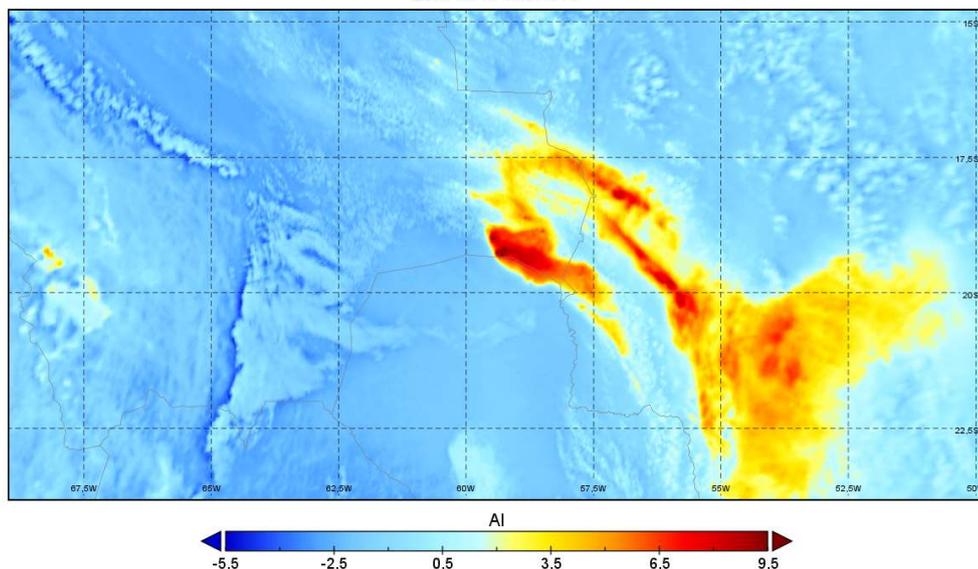
## 4.7. Pluma de fumaça

Tanto no incêndio do pirocumulonimbus quanto no incêndio controle havia a presença de aerossol capaz de absorver radiação solar, em particular, no espectro ultravioleta. O segundo dia, entretanto, teve uma presença maior desse material e em maior altitude, pois o Índice de Aerossol (AI) máximo em diversos pontos foi de 9,5 (Figura 14) enquanto no dia anterior o máximo estava em torno de 6 (não ilustrado).

O valor do Índice de Aerossol observado no dia 18 (Figura 14) é classificado pelo SUOMI-NPP como aerossóis em altitude elevada, não ultrapassando o limite de 10 para ser classificado como aerossóis na alta troposfera e/ou baixa estratosfera injetado por um pirocumulonimbus (QUAYLE, 2021). Porém, este valor máximo observado está dentro dos valores registrados pela bibliografia consultada citada anteriormente como provenientes de incêndios com geração de pircumulonimbus (Figuras A-7 do Apêndice A).

**Figura 14:** AI no dia 18 de agosto registrado pelo satélite Sentinel-5P

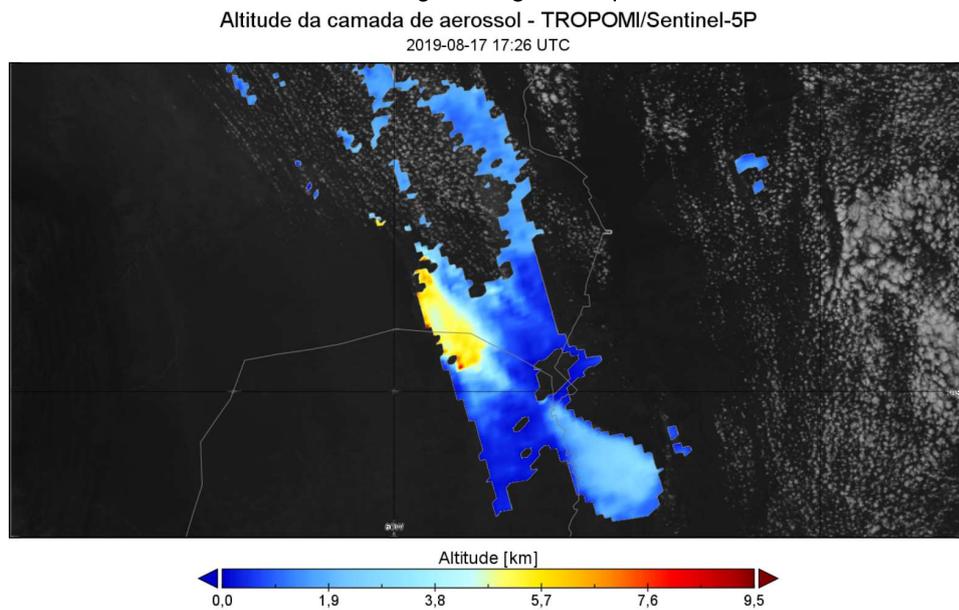
Índice de Aerossol em 380 e 340 nm - TROPOMI/Sentinel-5P  
2019-08-18 17:07 UTC



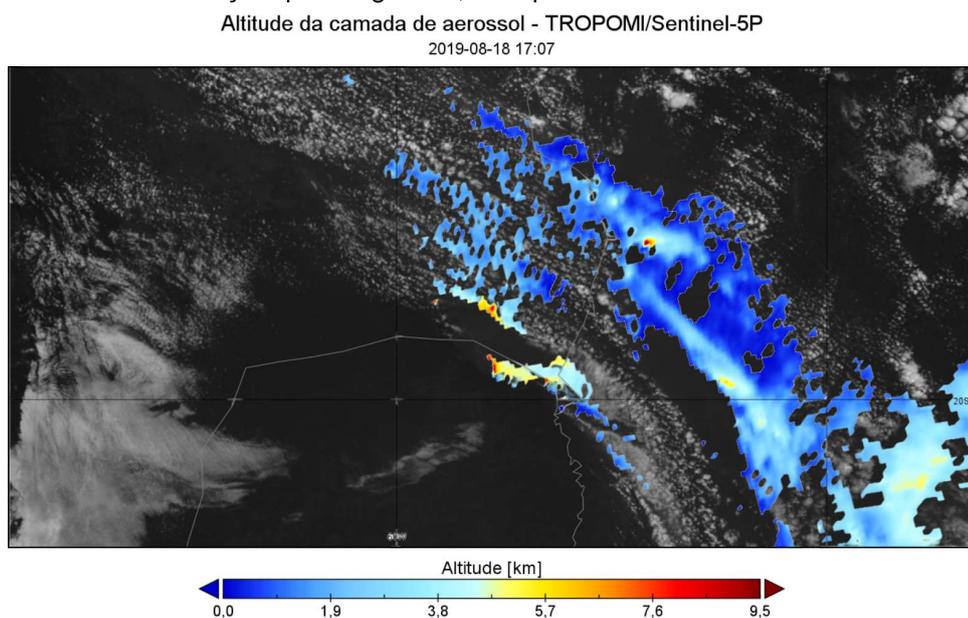
A altitude máxima do aerossol no da 18 é de 9,5 km (Figura 16), não ultrapassando os 16 km de altitude da tropopausa de acordo com as estimativas do *Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)* a bordo do satélite *Aqua*, mas ainda assim

acima da camada limite planetária, que estava abaixo de 2,5 km de acordo com o modelo MERRA-2. A altura máxima estimada da camada de aerossol é até 3 km superior à alcançada no dia anterior (Figura 15) e esta diferença pode ter sido causada pela injeção atmosférica pelo pirocumulonimbus. Ressalta-se que a própria presença da nuvem limitou determinar a altura máxima da camada de aerossol para o dia 18, como ilustrado na Figura 15.

**Figura 15:** Altitude do aerossol no dia 17 de agosto registrado pelo satélite Sentinel-5P.

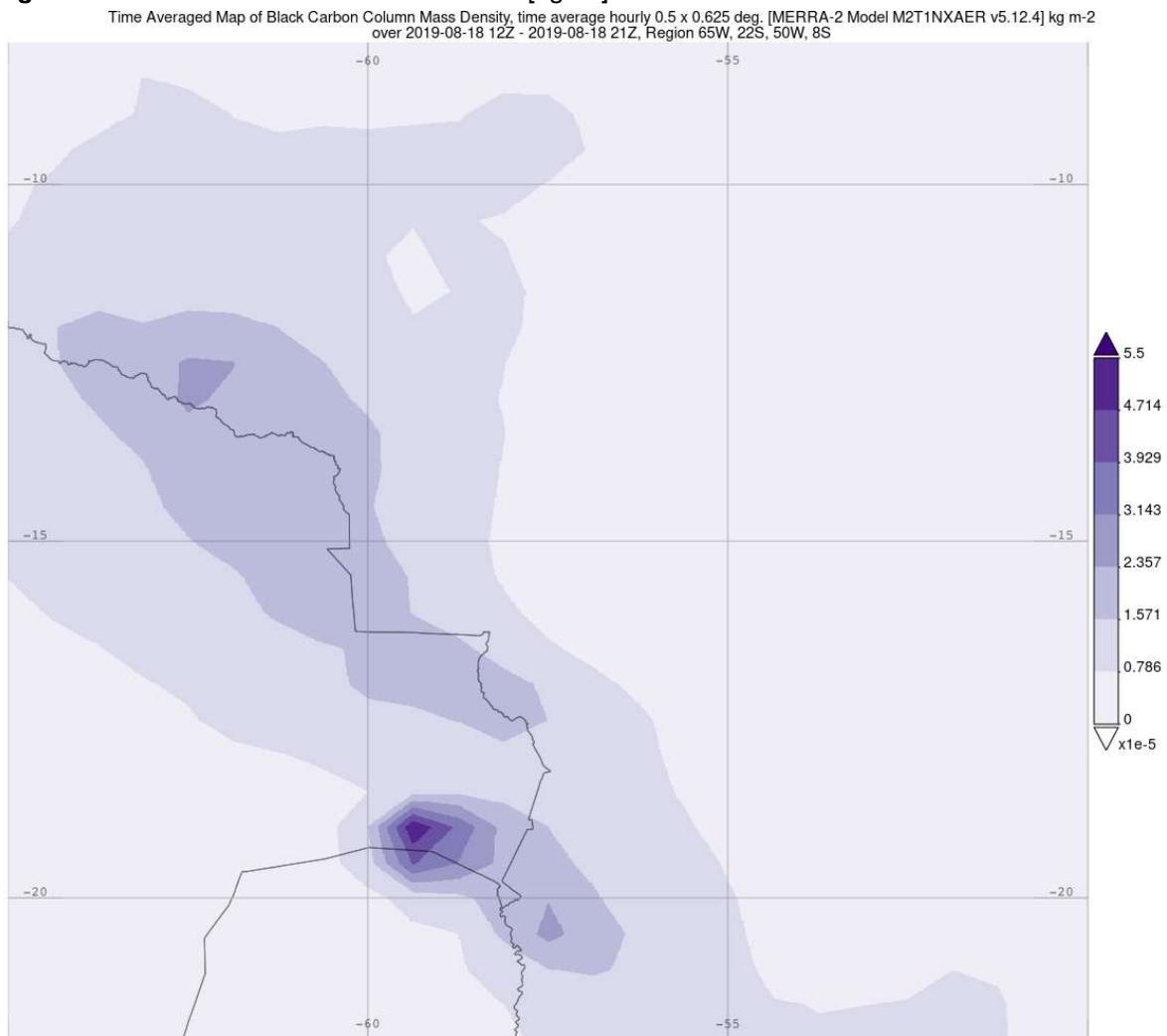


**Figura 16:** A mesma informação que a Figura 15, mas para o dia 18.

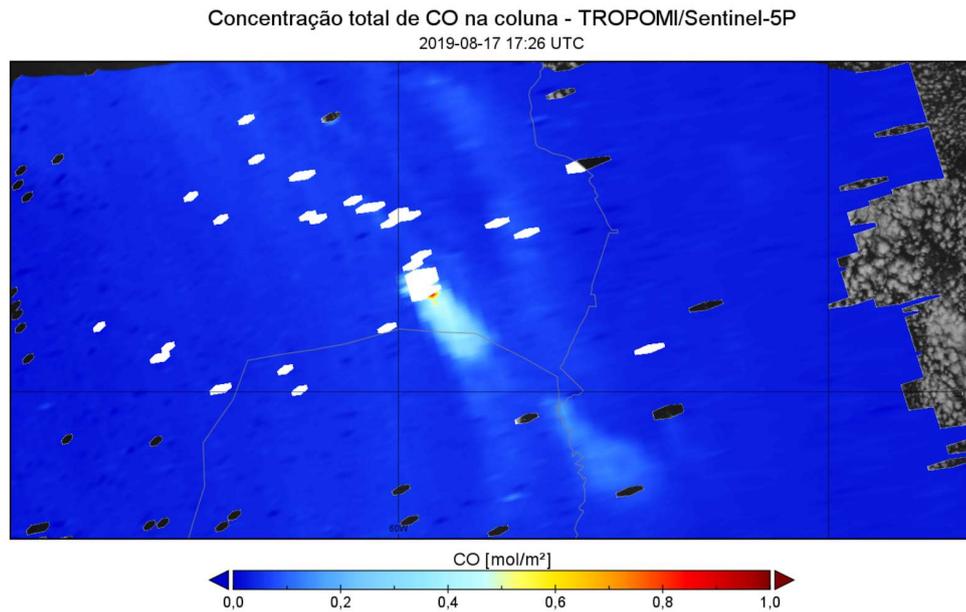


A queimada do dia 18 de agosto de 2019 se destacou do restante das queimadas no continente pela quantidade de aerossol carbonáceo presente. Entre as 08:00 LT e 18:00 LT, o incêndio do caso apresentou, segundo dados do modelo MERRA-2, a maior concentração de *black carbon* em superfície (não ilustrado) e na coluna atmosférica total, tanto em relação ao dia anterior (não ilustrado) quanto em relação a qualquer outra queimada na América do Sul no momento (Figura 17). O mesmo comportamento se repetiu para a concentração de monóxido de carbono (Figura 18, Figura 19 e Figura A-8).

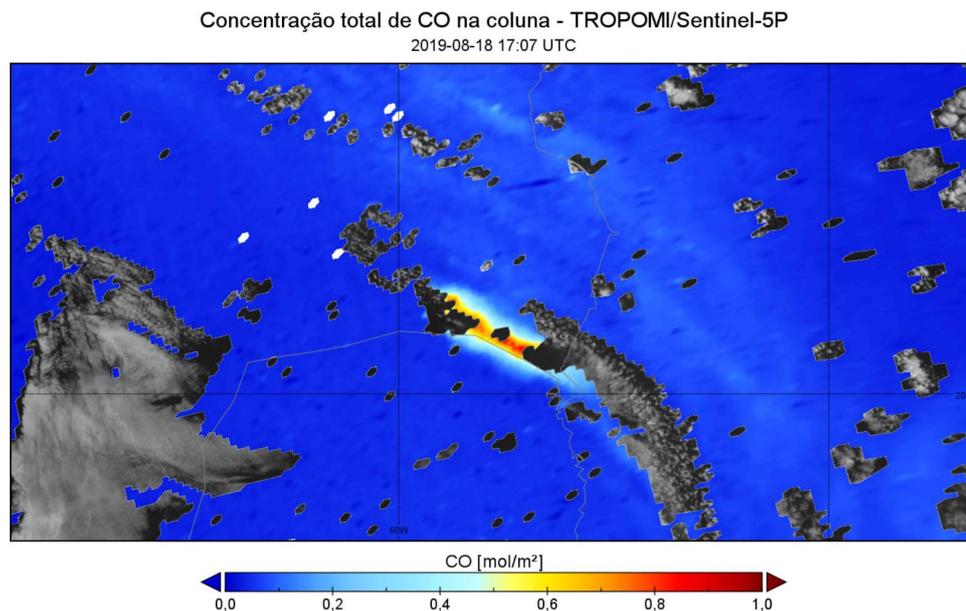
**Figura 17:** Densidade média de black carbon [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ]. Fonte: MERRA-2



**Figura 18:** Concentração total de monóxido de carbono na coluna atmosférica no dia 17 de agosto registrada pelo satélite Sentinel-5P.



**Figura 19:** A mesma informação que a Figura 18, mas para o dia 18

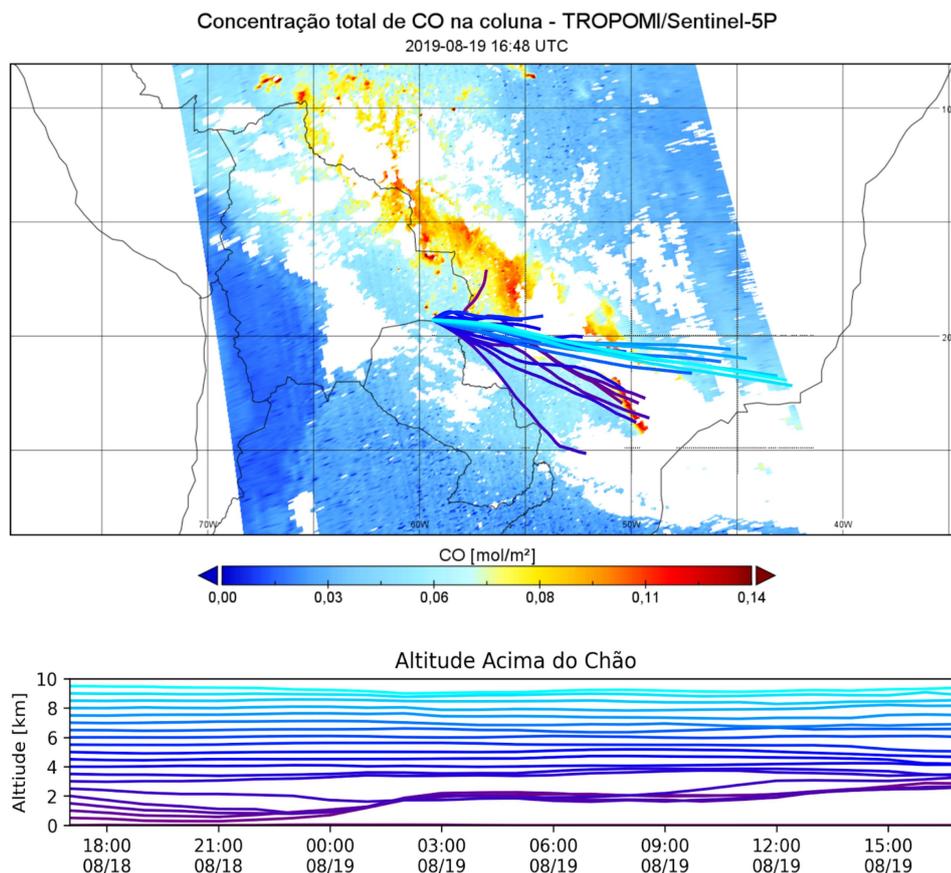


A localização do pirocumulonibus está conectada às maiores concentrações de monóxido de carbono (Figura 20), Profundidade Óptica do Aerossol (Figura A-9), Índice de Aerossol (Figura A-10) e altitude da camada de aerossol (Figura A-11), transportadas até o Sul/Sudeste brasileiro no dia seguinte. A maioria das parcelas partindo da localização da nuvem, com altitude inicial abaixo do máximo observado,

9,5 km, é transportada até o sudeste brasileiro. Desse modo, o pirocumulonimbus pode ter auxiliado na injeção da poluição que contribuiu para o evento de chuva preta.

Além do *black carbon* e monóxido de carbono, foi verificada também a concentração de formaldeído, dióxido de nitrogênio e ozônio e, apesar de sempre apresentarem valores superiores aos observados no dia anterior, o incêndio do dia 18 não se destacou dentre os outros que ocorriam simultaneamente na Amazônia brasileira e no restante da Bolívia.

**Figura 20:** : Trajetórias estimadas pelo HYSPLIT (linhas na figura). Cada parcela apresenta uma altitude diferente, mas mesma localização inicial e tempo inicial (17Z de 18 de agosto de 2019) e final (17Z de 19 de agosto de 2019). Ao fundo, a concentração de CO estimada pelo Sentinel-5P.



#### 4.8. Balanço Radiativo

Devido ao fato de que a resolução espacial do CERES ( $1^\circ \times 1^\circ$ ) não é ideal para aplicações na escala deste caso, não há como obter uma avaliação quantitativa do

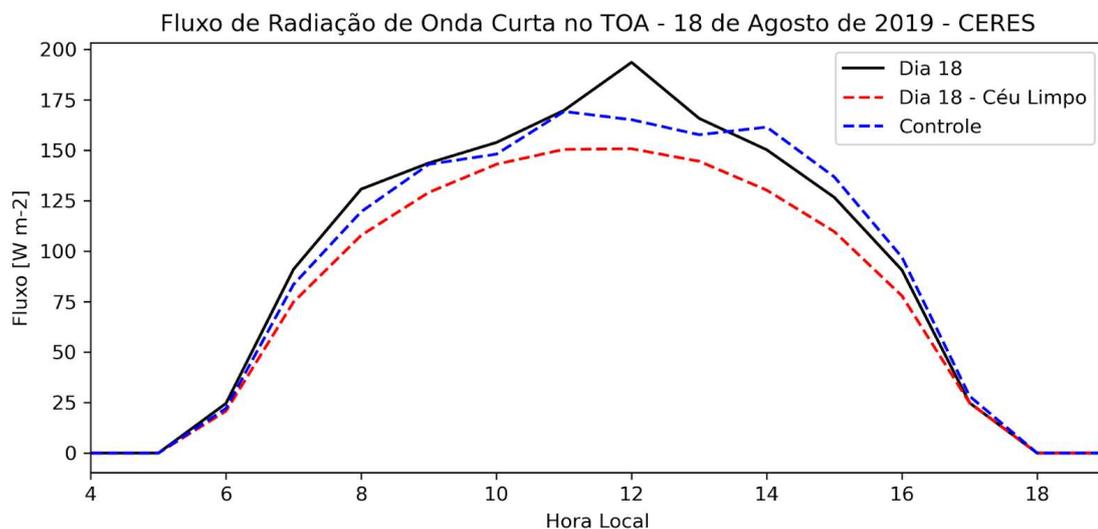
impacto radiativo da nuvem e separar o efeito da nuvem do da fumaça, do incêndio, da superfície e etc. Entretanto, é possível avaliar qualitativamente e comparar com o resultado esperado.

O fluxo de radiação de onda curta no TOA (Figura 21), e consequentemente o albedo, foi sempre maior para o dia 18 do que para o mesmo dia em condições de céu claro, como esperado, já que nuvens, em particular as do tipo pirocumulus e pirocumulonimbus, refletem radiação de onda curta. Além disso, esta radiação é mais refletida no dia 18 do que no dia anterior até as 13:00 LT quando isto se inverte. Uma das hipóteses para explicar esta inversão é a de que, após as 13:00 LT, a maior quantidade de aerossol no dia 18, em relação ao dia anterior, aumentou a ocorrência de espalhamento múltiplo entre as gotículas de nuvens e a fumaça e, assim, aumentou a probabilidade da radiação ser absorvida pelo meio (PETTY, 2006). Lembrando que o aerossol de queimada apresenta albedo simples menor do que 1,0.

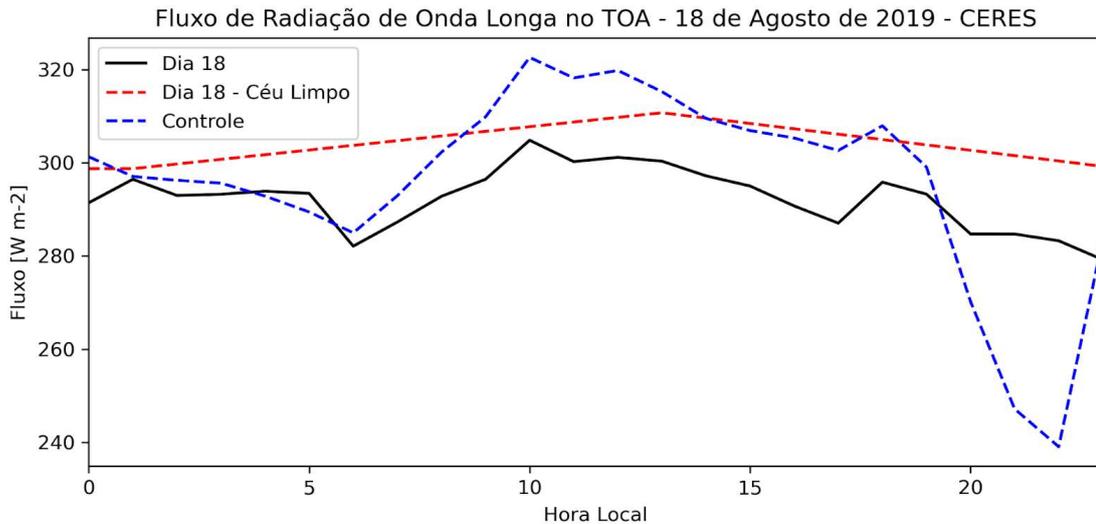
Em relação às ondas longas (Figura 22), o fluxo no TOA foi menor no dia 18 tanto em relação às condições de céu limpo para o mesmo dia quanto em relação ao incêndio controle. Essa diferença pode ser atribuída à presença da nuvem com topo mais frio que, segundo a lei de Stefan-Boltzmann, emite menos energia.

A forçante radiativa no TOA em ondas curtas para o dia 18 foi sempre positiva, como esperado, chegando a  $+40 \text{ Wm}^{-2}$ . Este comportamento indica que na presença das nuvens, incluindo o PyroCb, mais radiação de ondas curtas foi refletida para o espaço.

**Figura 21:** Fluxo de radiação de onda curta no TOA estimada pelo CERES.



**Figura 22:** Fluxo de radiação de onda longa no TOA estimada pelo CERES.



O impacto da pluma de fumaça vento abaixo é complexo de ser estimado, pois a entrada da frente fria trouxe consigo uma banda de nuvens. Nos locais próximos à passagem da pluma no dia 19 de agosto, uma diminuição da radiação solar global é evidente, mas a causa não pode ser atribuída somente à fumaça.

## 5. Conclusão

A nuvem pirocumulonimbus que se desenvolveu na fronteira entre Paraguai e Bolívia no dia 18 de agosto de 2019 foi semelhante, de acordo com as características levantadas de temperatura, pressão e altura do topo, a outros eventos ocorridos fora da América do Sul. A diferença entre o caso e os eventos registrados na literatura se encontra no incêndio gerador, que emitiu uma quantidade elevada de energia. Entretanto, imagina-se que as grandes proporções desta queimada foram justamente responsáveis por auxiliar a formação da nuvem, visto que a média atmosfera local estava seca. Por sua vez, a baixa atmosfera se encontrava mais úmida e fria, no dia, por conta da confluência do Jato de Baixos Níveis e de uma frente fria, prejudicando o desenvolvimento do fogo. Para este fato, foi levantada a hipótese de que a baixa umidade do solo, variável pouco utilizada em estudos sobre pirocumulonimbus, e os

ventos intensos e com baixo cisalhamento causados pelo encontro dos sistemas citados anteriormente contribuíram para a sustentação e propagação da queimada.

O impacto radiativo da nuvem foi complexo de ser estimado por conta da baixa resolução do instrumento e da quantidade de elementos envolvidos (a pluma de fumaça, nuvens vizinhas e o próprio pirocumulonimbus) que podem contribuir de maneira inversa para o saldo radiativo: por exemplo, o aerossol da fumaça absorve radiação de onda curta, enquanto a nuvem reflete. Entretanto, conforme foi esperado, a presença da nuvem aumentou a reflexão de radiação de ondas curtas e diminuiu o fluxo de radiação de onda longa no topo da atmosfera.

O pirocumulonimbus estudado, muito provavelmente, auxiliou a injeção da fumaça gerada pelo incêndio, especificamente o monóxido de carbono e o *black carbon*, em altitudes mais elevadas. A pluma foi transportada diretamente até o sudeste brasileiro, onde pode ter colaborado para o evento de chuva preta observado.

A partir das conclusões e hipóteses levantadas neste trabalho recomenda-se a realização de mais pesquisas na área. É necessário entender se os fatos aqui levantados são uma regra ou exceção para a geração de pirocumulonimbus na América do Sul. Um melhor entendimento é necessário para que pirocumulonimbus possam ser previstos, visto que tais nuvens podem ser extremamente prejudiciais para brigadas de bombeiros ou moradores locais, e também porque eles facilitam o transporte da fumaça para mais locais, contribuindo como fontes externas de poluição.

## 6. Referências bibliográficas

ACKER, J. G.; LEPTOUKH, G. Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 88, n. 2, p. 14, 2007. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/240492075\\_Online\\_analysis\\_enhances\\_use\\_of\\_NASA\\_Earth\\_Science\\_Data](https://www.researchgate.net/publication/240492075_Online_analysis_enhances_use_of_NASA_Earth_Science_Data).

ALVES, N. O. *et al.* Biomass burning in the Amazon region causes DNA damage and cell death in human lung cells. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, 2017.

ANDREAE, M. O., Biomass burning: Its history, use and distribution and its impact on environmental quality and global climate. *In*: LEVINE, J. S., **Global Biomass Burning:**

**Atmospheric, Climatic and Biospheric Implications.** MIT Press, Cambridge, Mass. p. 3-21, 1991.

BACHMEIER, S. **PyroCb over Bolivia | PyroCb.** Disponível em: <<http://pyrocb.ssec.wisc.edu/archives/2335>>. Acesso em: 08 mar. 2021.

CHRISTIAN, K. *et al.* Radiative Forcing and Stratospheric Warming of Pyrocumulonimbus Smoke Aerosols: First Modeling Results With Multisensor (EPIC, CALIPSO, and CATS) Views from Space. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 16, p. 10061–10071, 2019.

COLLINS, M., *et al.* **Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility.** In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex e P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge, Reino Unido e Nova York, NY, Estados Unidos da América. Cambridge University Press, 2013.

COSTA, Y. T.; RODRIGUES, S. C. EFEITO DO FOGO SOBRE VEGETAÇÃO E SOLO A PARTIR DE ESTUDO EXPERIMENTAL EM AMBIENTE DE CERRADO. **Geography Department University of Sao Paulo**, v. 30, p. 149, 15 dez. 2015.

COUTINHO, L. M.; MIRANDA, H. S.; MORAIS, H. C. de. O bioma do cerrado e o fogo: I - Caracterização. **Estudos avançados. Coleção documentos. Ciências ambientais**, São Paulo, n. 2002, p. 1-46, 2002.

EBERT, C. H. V. The Meteorological Factor in the Hamburg Fire Storm. **Weatherwise**, v. 16, n. 2, p. 70–75, 1963.

FERRO, I.; SANTOS, A. L. S.; MARTINS, S. M. Queimadas e Doenças Respiratórias. **Sociedade Brasileira de Medicina de Família e Comunidade**. Rio de Janeiro, 10 set. de 2020. Disponível em: <https://www.sbmfc.org.br/noticias/queimadas-e-doencas-respiratorias/>. Acesso em 07 de junho de 2021.

FORSTER, P., *et al.* **Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing.** In: **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge, Reino Unido e Nova York, NY, Estados Unidos da América. Cambridge University Press, 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.

FROMM, M. *et al.* Observations of boreal forest fire smoke in the stratosphere by POAM III, SAGE II, and lidar in 1998. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 9, p. 1407–1410, 2000.

FROMM, M. D.; SERVRANCKX, R. Transport of forest fire smoke above the tropopause by supercell convection. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 10, p. n/a-n/a, 2003.

FROMM, M. *et al.* The Untold Story of Pyrocumulonimbus. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, n. 9, p. 1193–1210, 2010.

GATEBE, C. K. *et al.* Taking the pulse of pyrocumulus clouds. **Atmospheric Environment**, v. 52, p. 121–130, 2012.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Portal do Monitoramento de Queimadas e Incêndios Florestais**. Disponível em <<http://www.inpe.br/queimadas>>. Acesso em: 07 de junho de 2021.

KABLICK, G. P. *et al.* Australian PyroCb Smoke Generates Synoptic-Scale Stratospheric Anticyclones. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 13, 2020.

KOREN, I. Measurement of the Effect of Amazon Smoke on Inhibition of Cloud Formation. **Science**, v. 303, n. 5662, p. 1342–1345, 2004.

LAREAU, N. P.; CLEMENTS, C. B. Environmental controls on pyrocumulus and pyrocumulonimbus initiation and development. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16, n. 6, p. 4005–4022, 2016.

LINDSEY, D. T.; FROMM, M. Evidence of the cloud lifetime effect from wildfire-induced thunderstorms. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 22, 2008.

NORTH, G. R. **Encyclopedia of atmospheric sciences**. Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 2015.

PEREIRA, G. M. *et al.* Physical and chemical characterization of the 2019 “black rain” event in the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil. **Atmospheric Environment**, Amsterdam, v. 248, 2021.

PETERSON, D. A. *et al.* A Conceptual Model for Development of Intense Pyrocumulonimbus in Western North America. *Monthly Weather Review*, v. 145, n. 6, p. 2235–2255, 2017.

PIVELLO, V. R., *et al.* Understanding Brazil’s catastrophic fires: Causes, consequences and policy needed to prevent future tragedies. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 19, n. 3, p. 233–255, 1 jul. 2021.

**Pyrocumulonimbus.** In *Glossary of Meteorology*. American Meteorological Society, 2021. Disponível em: <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Pyrocumulonimbus>. Acesso em: 03 de nov. de 2021.

QUAYLE, B., 2021. **Where 's the smoke coming from?** Earthdata Wiki, 15 de julho de 2021. Disponível em: <https://wiki.earthdata.nasa.gov/pages/viewpage.action?pageId=215449905>.

REUTTER, P. *et al.* 3-D model simulations of dynamical and microphysical interactions in pyroconvective clouds under idealized conditions. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, n. 14, p. 7573–7583, 29 jul. 2014.

RIBEIRO, H.; ASSUNÇÃO, J. V. DE. Efeitos das queimadas na saúde humana. **Estudos Avançados**, v. 16, n. 44, p. 125–148, 2002.

ROLPH, G.; STEIN, A.; STUNDER, B. Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY. **Environmental Modelling & Software**, v. 95, p. 210–228, 2017.

SILVA, P. *et al.* Future Projections of Fire Occurrence in Brazil Using EC-Earth Climate Model. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, p. 288–297, 2016.

STEIN, A. F. *et al.* NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 96, n. 12, p. 2059–2077, 2015.

PETTY, G. W.. **A first course in atmospheric radiation**. Madison: Sundog Pub., Cop, 2006.

O, S.; HOU, X.; ORTH, R. Observational evidence of wildfire-promoting soil moisture anomalies. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, 2020.

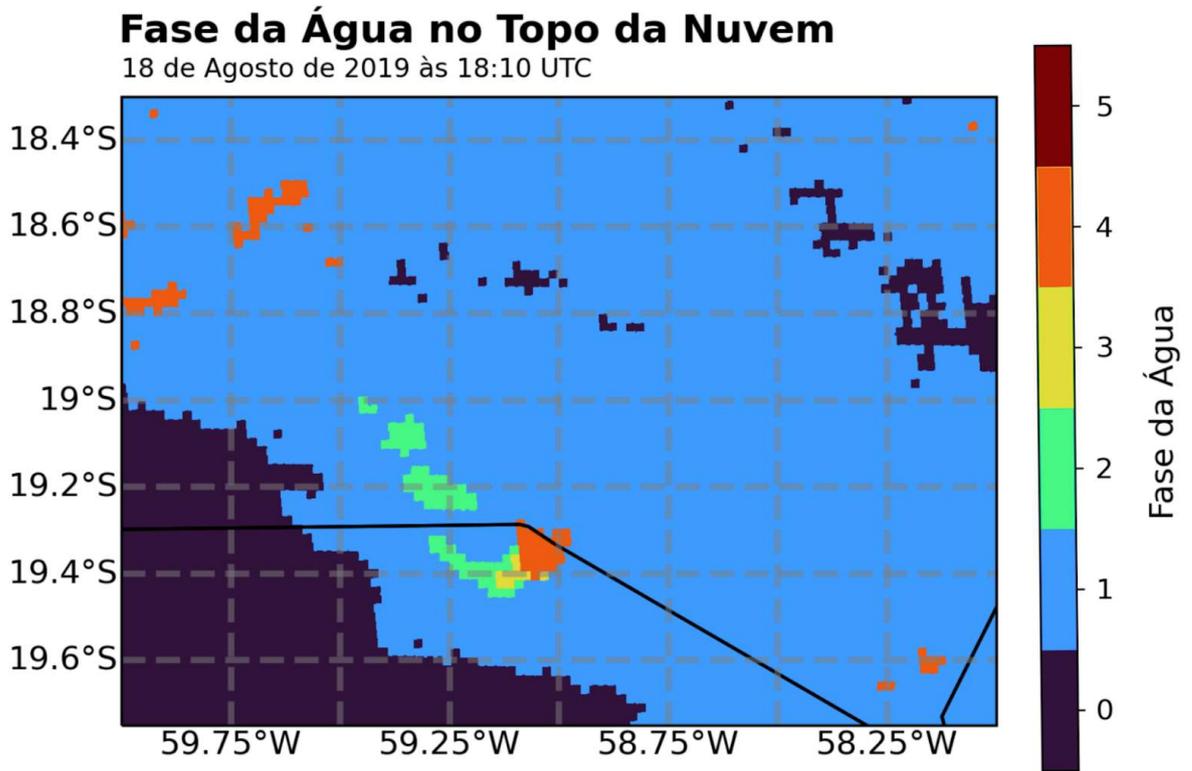
OMAR, T. OMPS-NPP L2 NM Aerosol Index swath orbital V2, Greenbelt, MD, USA, **Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)**, 2019. Disponível em: [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OMPS\\_NPP\\_NMMIEAI\\_L2\\_2/summary](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OMPS_NPP_NMMIEAI_L2_2/summary).

TORY, K.; THURSTON, W. **Pyrocumulonimbus: A Literature Review**. Australia: Bushfire and Natural Hazards CRC, 2015.

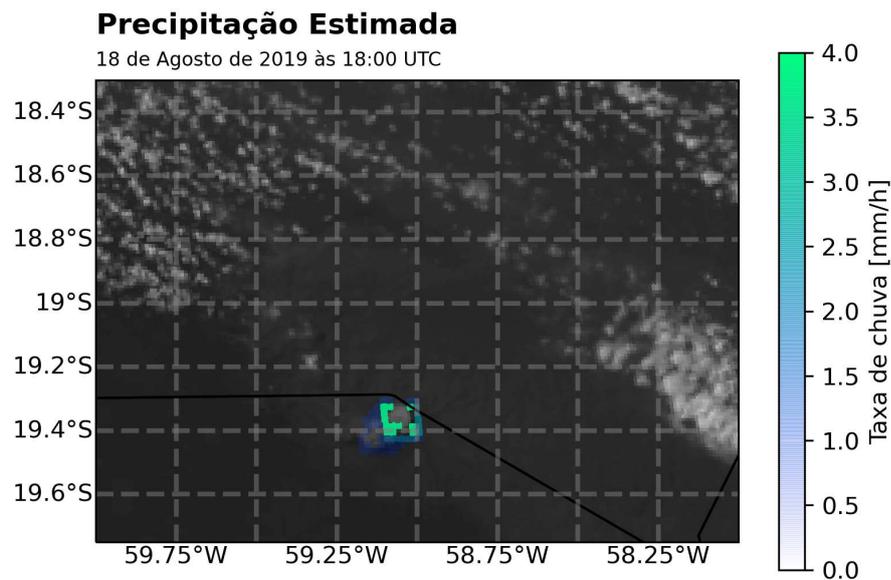
TORY, K. J.; KEPERT, J. D. Pyrocumulonimbus Firepower Threshold: Assessing the Atmospheric Potential for pyroCb. **Weather and Forecasting**, v. 36, n. 2, p. 439–456, 2021.



**Figura A-2:** Fase da água no topo da nuvem estimada pelo satélite GOES-16. Na barra de cores, os números de 0 a 5 significam, respectivamente: céu limpo, água líquida, água super-resfriada, mista, gelo desconhecida.



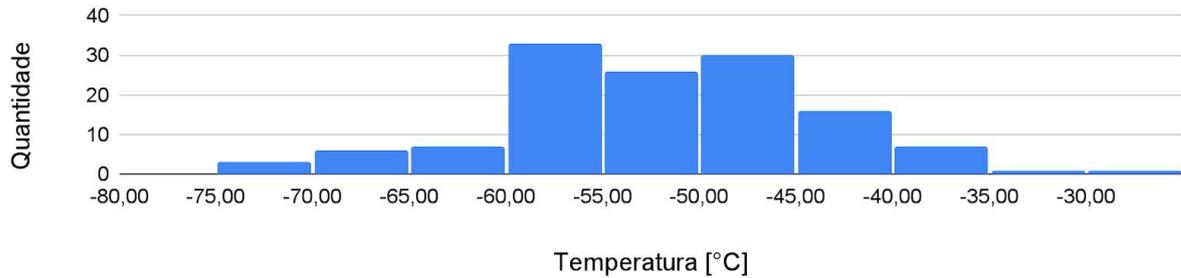
**Figura A-3:** Taxa de chuva estimada pelo satélite GOES-16. Em preto e branco, a imagem da banda azul do mesmo satélite e instante.



**Figura A-4:** Histograma da temperatura do topo de diversos pirocumulonimbus na faixa do infravermelho termal registradas por Fromm *et al.* (2010) e pelo site pyrocb.ssec.wisc.edu.

### Temperatura no Topo (Infravermelho Termal)

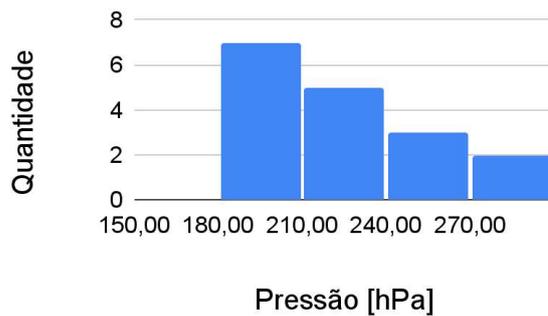
Retirado de: Fromm *et al.* (2010) e <http://pyrocb.ssec.wisc.edu/>



**Figura A-5:** Pressão (à esquerda) e altura (à direita) do topo de pirocumulonimbus registradas por Fromm *et al.* (2010).

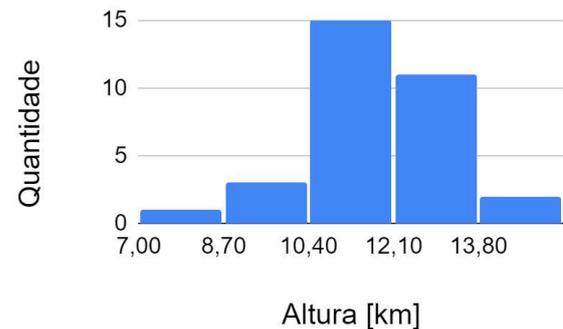
### Pressão no topo da nuvem

Fonte: Fromm *et al.* (2010)



### Altura do topo da nuvem

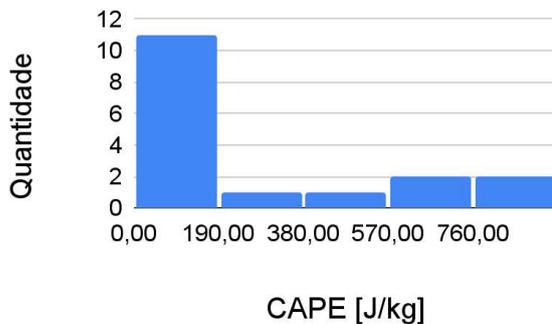
Retirado de: Fromm *et al.* (2010)



**Figura A-6:** Histograma da distribuição de índice CAPE (à esquerda) e Haines (à direita) de casos de pirocumulonimbus registradas por Fromm *et al.* (2010).

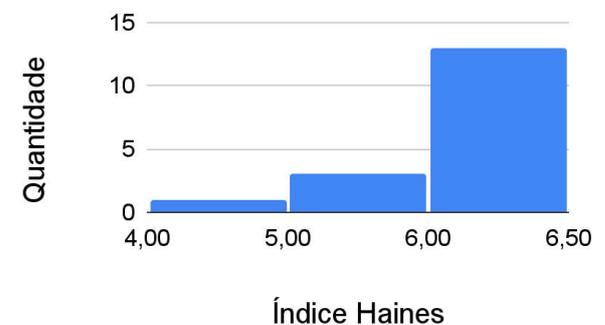
### CAPE

Fonte: Fromm *et al.* (2010)



### Índice Haines

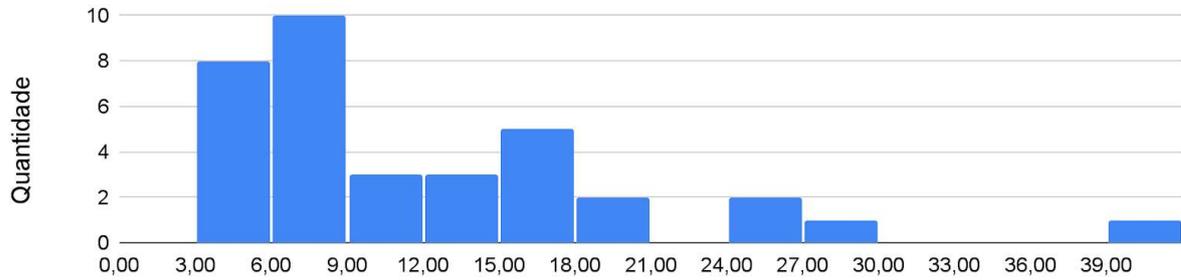
Fonte: Fromm *et al.* (2010)



**Figura A-7:** Histograma do Índice de Aerossol de queimadas que geraram PyroCb's registrados por Fromm *et al.* (2010) e pelo site pyrocb.ssec.wisc.edu

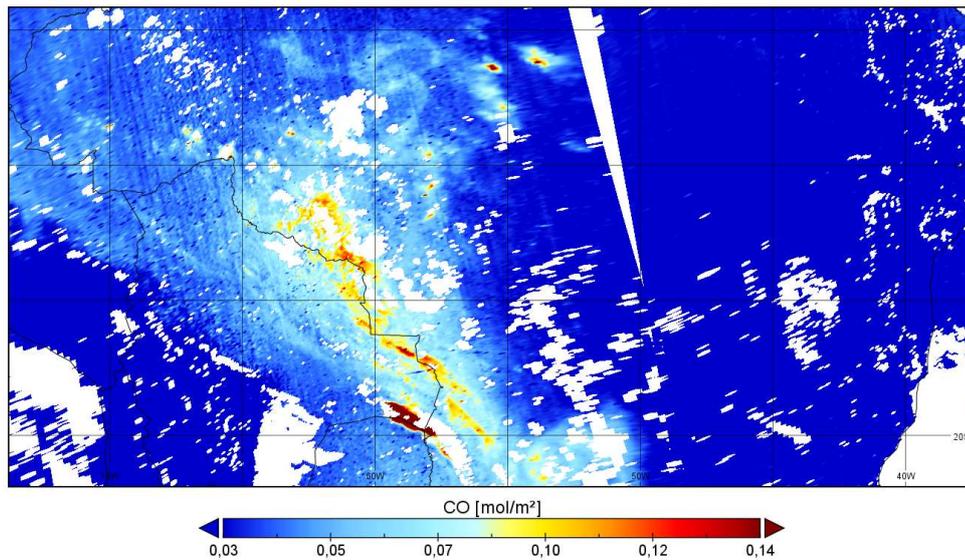
### Índice de Aerossol

Retirado de: Fromm *et al.* (2010) e <http://pyrocb.ssec.wisc.edu/>

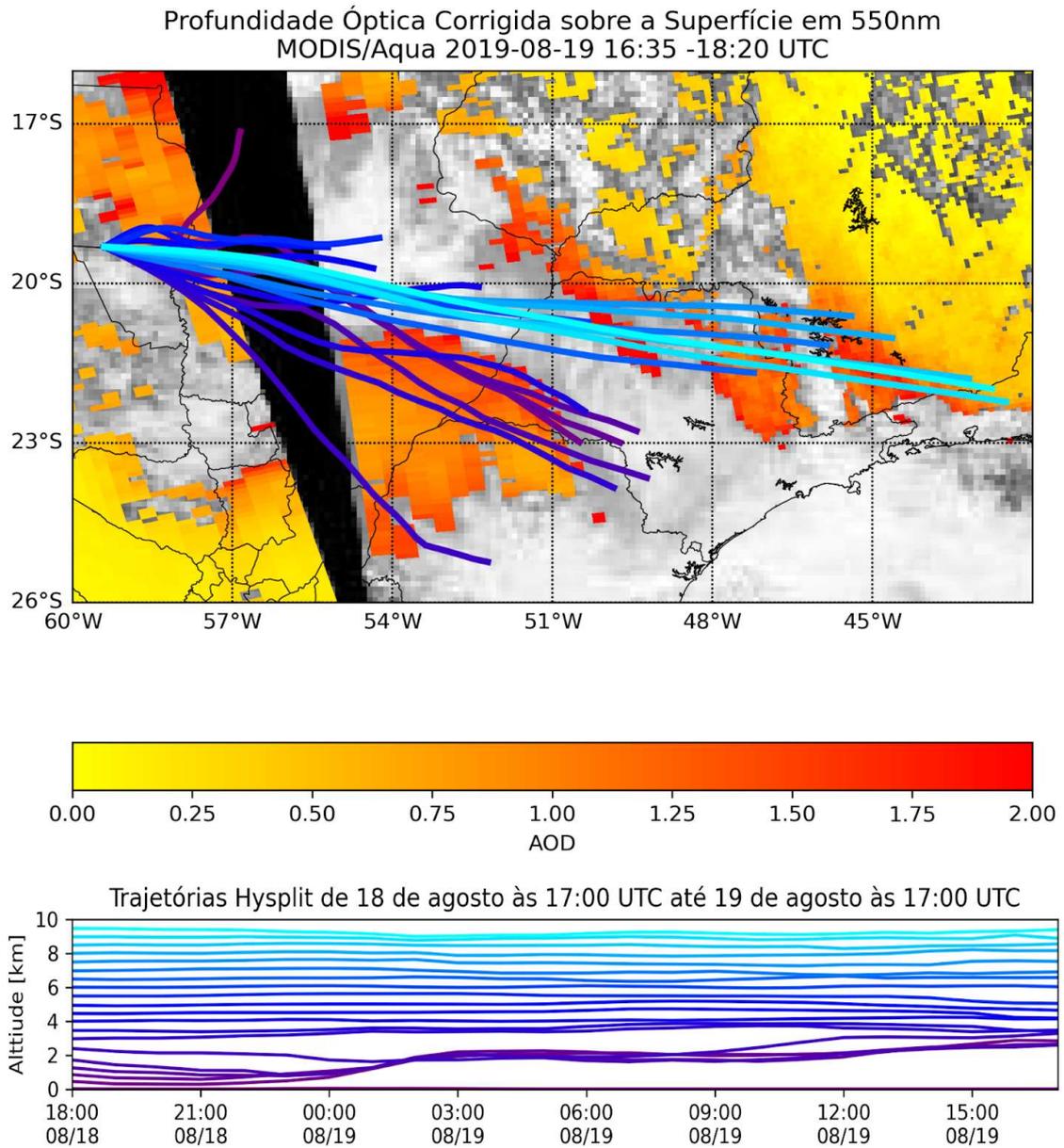


**Figura A-8:** Concentração total de monóxido de carbono na coluna atmosférica no dia 18 de agosto registrados pelo satélite Sentinel-5P. Destaca-se a maior concentração de CO no incêndio estudado entre a fumaça emitida pelo restante da Bolívia e Amazônia.

Concentração total de CO na coluna - TROPOMI/Sentinel-5P  
2018-08-18 17:07 UTC

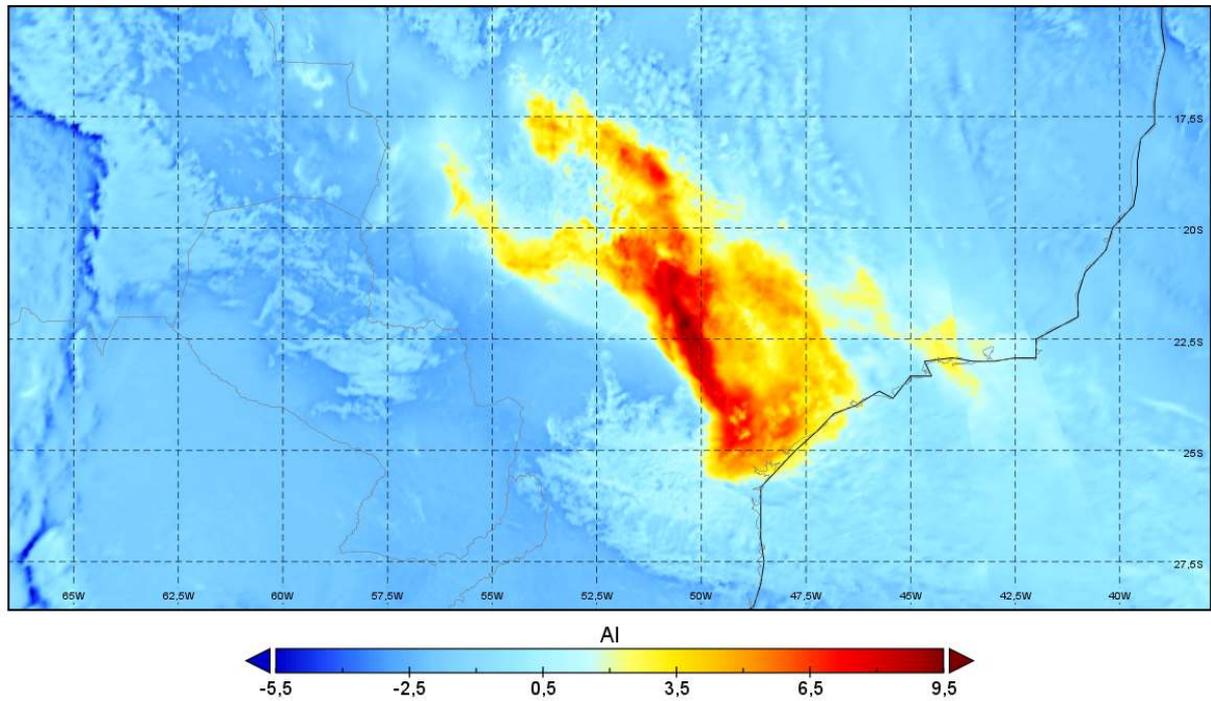


**Figura A-9:** Trajetórias estimadas pelo modelo HYSPLIT com altitudes iniciais entre 0 km e a 9,5 km saindo da nuvem e terminando às 17:00 UTC. Ao fundo, a AOD estimada no horário mais próximo.



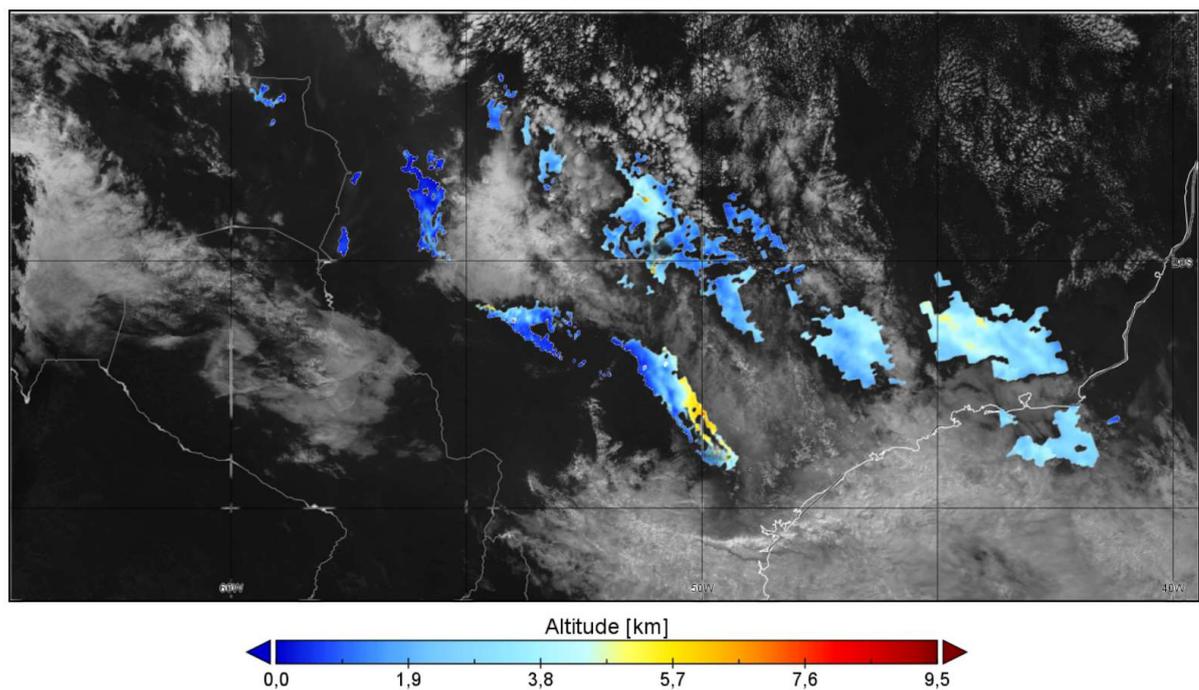
**Figura A-10:** Índice de Aerossol no dia 19 de agosto de 2019 estimado pelo TROPOMI.

Índice de Aerossol em 380 e 340 nm - TROPOMI/Sentinel-5P  
2019-08-19 16:48 UTC

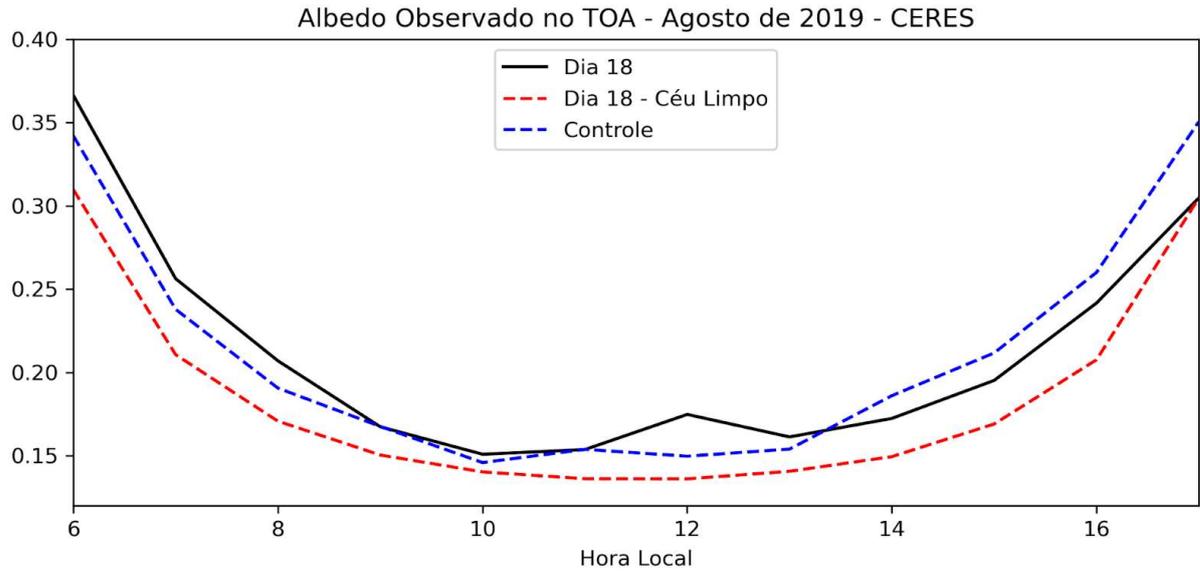


**Figura A-11:** Altitude da camada de aerossol no dia 19 de agosto de 2019 estimado pelo TROPOMI. Os maiores valores estão relacionados com trajetórias ligadas ao incêndio estudado.

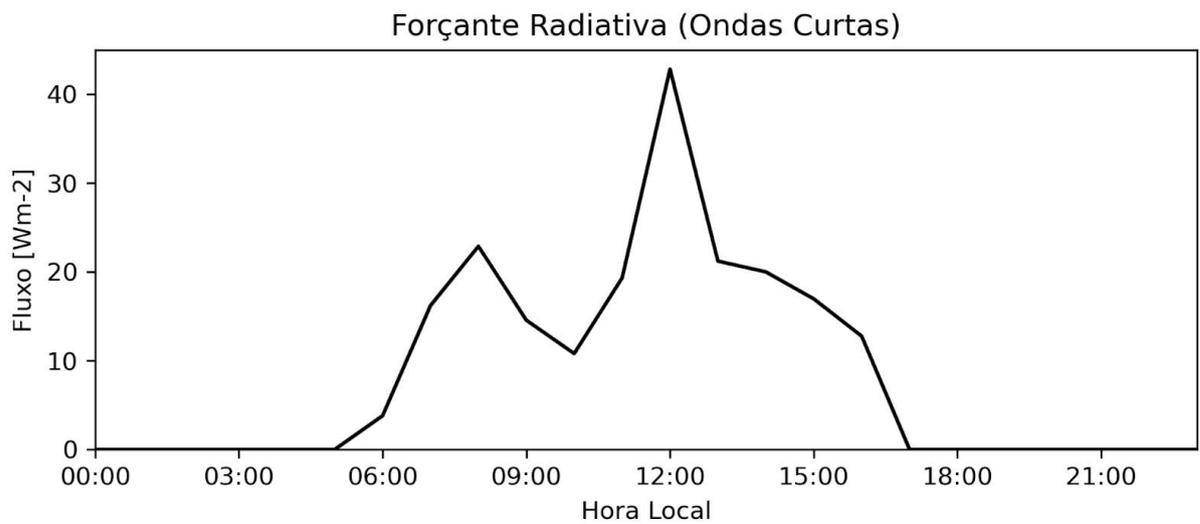
Altitude da camada de aerossol - TROPOMI/Sentinel-5P  
2019-08-19 16:48 UTC



**Figura A-12:** Evolução temporal do albedo no TOA.



**Figura A-13:** Evolução da forçante radiativa no TOA no dia 18 de agosto de 2019.



**Figura A-14:** Variação temporal da irradiação solar global nas estações do INMET próximas à localização final das parcelas de trajetórias do HYSPLIT com altitude inicial abaixo de 4 km.

### Irradiação Global em estações próximas da pluma de fumaça

Fonte: INMET, 2021

