Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

ESTUDO DE CASO DA TEMPESTADE DE AREIA OCASIONAL EM RIBEIRÃO PRETO (SP) EM SETEMBRO DE 2021

Case Study of the occasional sandstorm in Ribeirão Preto (SP) in september 2021

Estudio de caso de tormenta de arena ocasional en Ribeirão Preto (SP) en septiembre de 2021

Heleno Proiss Slompo
Departamento de Geografia – Instituto de Ciências Humanas
Universidade de Brasília (UnB)
heleno_slompo@hotmail.com

Ercília Torres Steinke
Departamento de Geografia – Instituto de Ciências Humanas
Universidade de Brasília (UnB)
erciliaunb@gmail.com

Rafael Rodrigues da Franca
Departamento de Geografia – Instituto de Ciências Humanas
Universidade de Brasília (UnB)
rrfranca@unb.br

Resumo: O objetivo deste trabalho é analisar um raro evento de tempestade de areia (TA) ocorrido em 26 de setembro de 2021, em Ribeirão Preto, no estado de São Paulo. Utilizou-se a metodologia da Análise Rítmica de Monteiro para investigar os principais fatores atmosféricos que contribuíram para a formação desse fenômeno, incluindo umidade relativa, temperatura, pressão e velocidade do vento. Verificou-se que condições climáticas extremas, como a seca prolongada e a precipitação abaixo da média, criaram um ambiente propício para a tempestade. Um estudo da circulação secundária a partir da análise sinótica revelou a presença de sistemas atmosféricos complexos que interagiram de forma a desencadear a tempestade de areia, especialmente a Linha de Instabilidade e frentes frias. A tempestade foi caracterizada como de areia, com duração de algumas horas e apresentou fases de formação por suspensão de partículas, seguidas por convecção com aumento da umidade relativa,

registro de elevada precipitação, e queda de temperatura e pressão. Embora o fenômeno não tenha registrado grandes repercussões na superfície, ele representa um alerta sobre as condições para futuros eventos como este.
Palavras-chave: Nuvem de areia; Análise Rítmica; Interior de São Paulo.

Abstract: The objective of this work is to analyze a rare sandstorm (SD) event that occurred on September 26, 2021, in Ribeirão Preto, in the state of São Paulo. The Análise Rítmica of Monteiro, is a methodology was used to investigate the main atmospheric factors that contributed to the formation of this phenomenon, including relative humidity, temperature, pressure, and wind speed. It was found that extreme weather conditions, such as prolonged drought and below-average precipitation, created an environment conducive to the storm. A study of the secondary circulation based on synoptic analysis revealed the presence of complex atmospheric systems that interacted in order to trigger the sandstorm, especially the Squall Line and cold fronts. The storm was characterized as a sandstorm, lasting a few hours, and presented phases of formation by particle suspension, followed by convection with increased relative humidity, high precipitation, and a drop in temperature and pressure. Although the phenomenon did not register major repercussions on the surface, it represents a warning about the conditions for future events like this.
Keywords: Sand Cloud; Análise Rítmica; Interior of São Paulo.

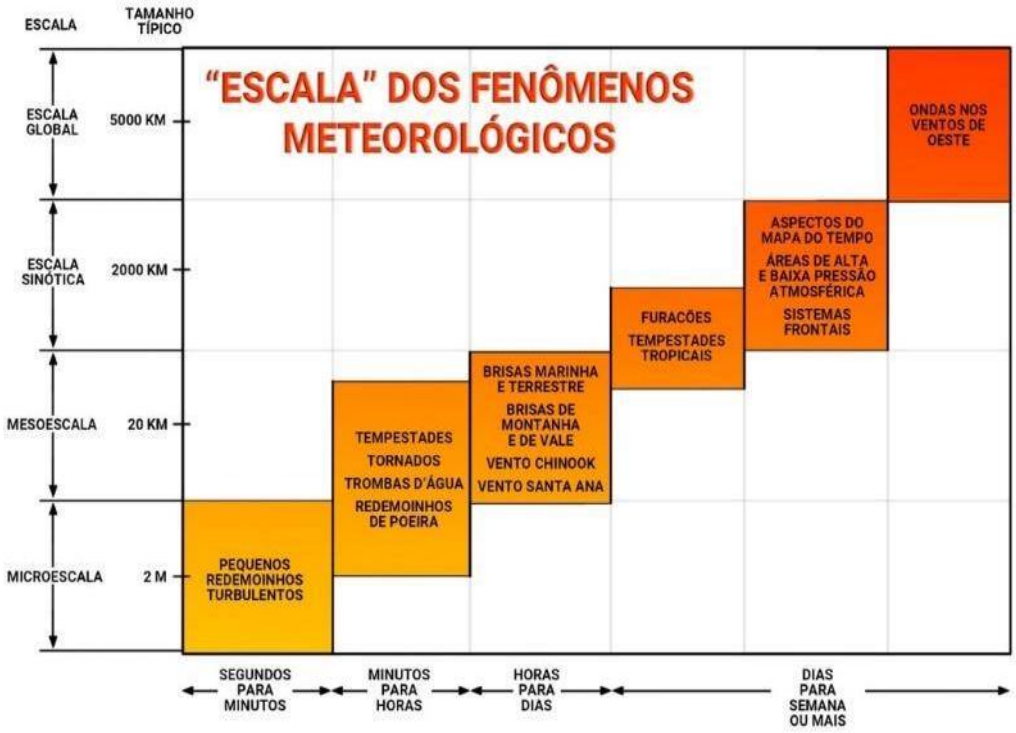
Resumen: El objetivo de este trabajo es analizar un raro evento de tormenta de arena (TA) ocurrido el 26 de septiembre de 2021 en Ribeirão Preto, en el estado de São Paulo. Se utilizó la metodología de Análise Rítmica de Monteiro, para investigar los principales factores atmosféricos que contribuyeron a la formación de este fenómeno, entre ellos la humedad relativa, la temperatura, la presión y la velocidad del viento. Se descubrió que las condiciones climáticas extremas, como la sequía prolongada y las precipitaciones inferiores al promedio, crearon un ambiente propicio para la tormenta. Un estudio de circulación secundaria basado en análisis sinópticos reveló la presencia de sistemas atmosféricos complejos que interactuaron para desencadenar la tormenta de arena, especialmente la Línea de Inestabilidad y los frentes fríos. La tormenta se caracterizó por ser arenosa, tuvo una duración de pocas horas y presentó fases de formación por suspensión de partículas, seguidas de convección con aumento de la humedad relativa, registro de altas precipitaciones y descenso de temperatura y presión. Si bien el fenómeno no tuvo mayores repercusiones en la superficie, representa una advertencia sobre las condiciones para futuros eventos como este.
Palabras clave: Nube de polvo; Análise Rítmica; Interior de São Paulo.

Submetido em: 20/06/2025
Aceito para publicação em: 21/07/2026
Publicado em: 10/11/2026

1. INTRODUÇÃO

A Organização Meteorológica Mundial conceitua a tempestade de areia (TA) como um conjunto de partículas de poeira ou areia soltas que são elevadas energicamente a grandes alturas por ventos fortes e turbulentos, podendo ter a aparência de uma parede larga e alta de rápido avanço (WMO, 2024). Esses eventos são naturais em áreas áridas e semiáridas ou de condição de solo descoberto, desempenhando um papel essencial no sistema terrestre. As TAs se caracterizam como um fenômeno de mesoescala (Figura 1) e contribuem para a ciclagem biogeoquímica, influenciando o comportamento climático e participando no processo de acúmulo de sedimentos (Goudie; Middleton, 2006).

Figura 1 - Diagrama esquemático de escalas espaciais e temporais importantes no sistema climático**.**



Fonte: Adaptado de AHRENS (2009).

Embora frequentemente tidas como sinônimos, a tempestade de areia e de poeira diferenciam-se como fenômenos de natureza ligeiramente distinta: as tempestades de areia são detectadas com mais frequência em ambientes desérticos, locais em que a areia é o tipo de sedimento prevalente quando o vento sopra sobre a superfície. O termo tempestade de

poeira já é mais habitual quando partículas mais finas são sopradas a longas distâncias e afetam áreas urbanas (Sissakian, 2013).

Ao longo da evolução da tempestade de areia, as condições climáticas são um controle ambiental fundamental, desde as fases de geração sedimentar, transporte e deposição dos sedimentos (Middleton, 2019). Somado a isso, as condições de superfície, a citar a desertificação, cobertura da vegetação e impactos das atividades humanas também são fatores para os chamados “haboobs”, como é conhecido o fenômeno em inglês. (Zhang *et al.* 2003). Um evento histórico foi o famoso caso Dust Bowl, nas Grandes Planícies dos Estados Unidos, em 1930, resultado da combinação entre seca e más práticas agrícolas (Hansen; Libecap, 2004). Condições de solo exposto e práticas agrícolas inadequadas são circunstâncias da superfície que possuem contribuição positiva para ocorrência destas tempestades fora de desertos.

Entre as suas repercussões na superfície habitada, é comum encontrar na literatura estudos que indicam que os agentes biológicos e as composições mineralógicas e químicas transportadas pela areia desértica são adversas à saúde humana, levando a problemas cardíacos e respiratórios (Soleimani *et al*., 2020; Goudie; Middleton, 2006). Além da qualidade do ar ser comprometida, a água também pode ser contaminada e trazer problemas de saúde aos humanos e animais. Além disso, a baixa visibilidade pode causar acidentes, e a erosão eólica acarretar danos físicos na infraestrutura e propriedades (Ekhtesasi, 2008).

Destaca-se que boa parte dos estudos contempla regiões do cinturão de poeira, localizadas no continente asiático ou em áreas desérticas do globo, devido à maior intensidade e frequência do fenômeno nestas regiões. Também há fontes de poeira distantes deste cinturão, a exemplo dos Estados Unidos, México, Austrália, Botswana, Namíbia, Bolívia (Altiplano) e áreas de deserto na América do Sul (Patagônia e oeste da Argentina) (Formenti *et al*., 2011). Devido ao clima predominantemente úmido, ao relevo irregular e à extensa cobertura vegetal, a ocorrência desses fenômenos em grande escala é mais difícil no Brasil. Eventos como o ocorrido no centro-sul do Brasil evidenciam a necessidade de novos estudos sobre tempestades de areia fora de regiões desérticas.

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (2012) alerta para um aumento potencial na erosão eólica, resultado de ventos mais intensos e o aumento da aridez em

virtude do mau uso do solo. No Brasil, Marengo (2014) destacou incertezas sobre o futuro climático, citando episódios de extremos climáticos mais frequentes, como secas prolongadas, sobretudo no Nordeste. Estas condições foram sentidas no centro-sul do Brasil entre 2019 e 2021, o que viabilizou o desenvolvimento de uma tempestade de areia, em setembro de 2021, quando o Monitor das Secas (2024) registrou seca de grande intensidade para as regiões de Minas Gerais e São Paulo.

O Monitor de Secas é uma iniciativa que realiza o acompanhamento sistemático da situação de seca no Brasil. Seus resultados consolidados são apresentados no Mapa do Monitor de Secas, que utiliza uma escala de cores para indicar a severidade do fenômeno: fraca, moderada, grave, extrema ou excepcional. O Monitor conta com a Agência Nacional de Águas (ANA) como instituição central do programa, sendo responsável pela articulação institucional entre todos os parceiros. O mapa também apresenta, com linhas em negrito, as três tipologias de seca: curto prazo, médio prazo ou longo prazo. Essas classificações são baseadas em indicadores específicos de curto prazo (1, 3, 4 e 6 meses) e de longo prazo (9, 12, 18 e 24 meses), utilizados na análise e elaboração do mapa.

Casos como o do centro-sul do Brasil demandam novos estudos que abranjam eventos meteorológicos raros e que podem se tornar mais frequentes. A falta de investigações no que se refere a relatos de tempestade de areia na América do Sul, como no caso o Brasil, indica a importância de se estudar quais fatores atmosféricos foram cruciais para o excepcional caso de TA no centro-sul do Brasil em setembro 2021. A técnica da Análise Rítmica (Monteiro, 1971) é uma proposta valiosa para a investigação de tais fenômenos episódicos, à medida que auxilia a explicar a gênese dos fenômenos atmosféricos e seus desdobramentos no espaço antropizado (Sant'Anna Neto, 2005).

Por meio da Análise Rítmica (Monteiro, 1971), é possível analisar a sucessão dos tipos de tempo atmosféricos em intervalos menores de tempo cronológico, buscando aproximar a realidade do fenômeno, ao possibilitar uma avaliação precisa em escalas diárias e, por vezes, horárias. Tanto os elementos atmosféricos quanto a circulação atmosférica podem ser estudados simultaneamente, resultando na concepção de um "ritmo do clima". Um estudo que utilizou essa técnica, por exemplo, foi Mello et al. (2017), enfocando os fenômenos

extremos de precipitação por meio da Análise Rítmica, e aprofundou a análise sobre a gênese desses eventos excepcionais.

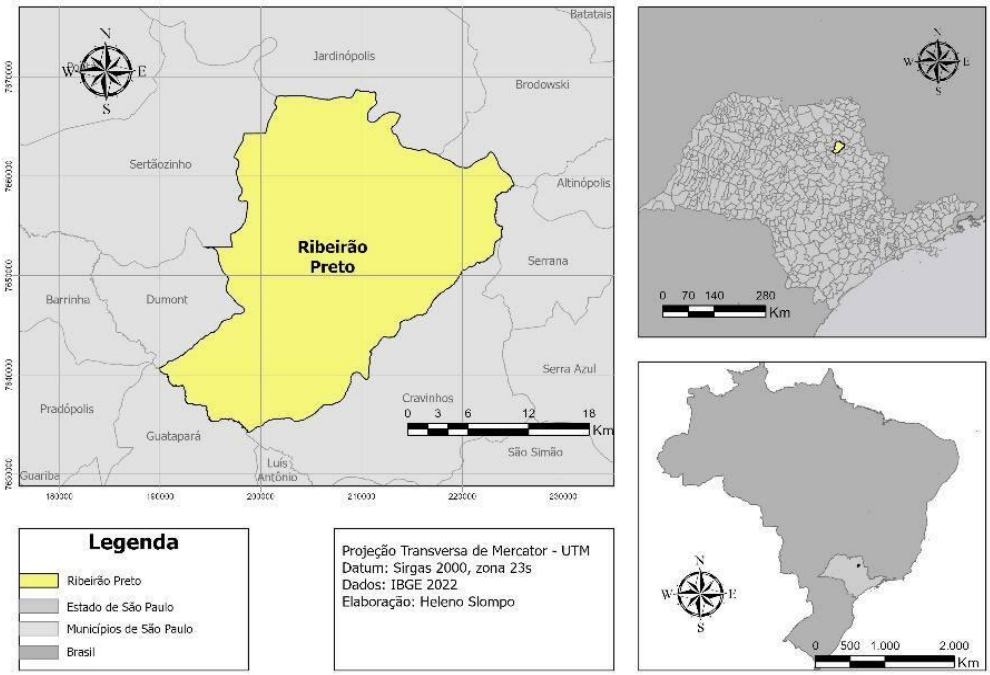
Essa técnica também foi empregada em pesquisas conduzidas por Kruk; Freitas (2017) e Verdan; Junior (2021), ambos realçando eventos de precipitação extrema. No entanto, é importante notar que há uma escassez de estudos que abordem outros tipos de fenômenos atmosféricos excepcionais, o que deixa lacunas significativas no entendimento desses eventos. Estudos de caso se tornam necessários à medida que melhor dimensionam o fenômeno em questão, suas características genéticas a fim de comparar com a escala considerada habitual, bem como contribuir para previsões futuras.

Este artigo tem como objetivo apresentar o resultado da análise do evento de tempestade de areia ocorrida em 26 de setembro de 2021, em Ribeirão Preto (SP), sob a perspectiva da Análise Rítmica. Neste estudo de caso, a intenção foi investigar os principais fatores atmosféricos envolvidos no desencadeamento deste evento considerado raro no Brasil. A pesquisa é uma oportunidade para examinar como casos semelhantes podem se desdobrar no Brasil, sobretudo em um contexto atual de mudanças ambientais. Além disso, consideram-se os potenciais riscos que o evento raro pode representar para a população. Neste estudo, adotou-se o termo “tempestade de areia” (TA) para se referir a “tempestade de areia/poeira.”

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para o estudo da tempestade de areia ocorrida em 26 de setembro de 2021, foi selecionada a cidade de Ribeirão Preto, no estado de São Paulo, como foco da análise, sendo uma das cidades em que o fenômeno foi registrado (INPE, 2021). A tempestade não se limitou a esta cidade, mas se expandiu por regiões urbanas dos estados de Minas Gerais e São Paulo. Os dados secundários foram adquiridos no sítio do Instituto de Controle do Espaço Aéreo - ICEA. O aeródromo é do Aeroporto Estadual de Ribeirão Preto – Doutor Leite Lopes: SBRP-AEROPORTO DE RIBEIRÃO PRETO, RIBEIRÃO PRETO / SP, posicionado nas coordenadas de 21°8'11"S 47°46'36"W. A Figura 2 mostra a localização da cidade de Ribeirão Preto, área utilizada para este estudo.

Figura 2 - Mapa da cidade de Ribeirão Preto, onde foi registrada a tempestade de areia.



Fonte: Elaboração dos autores com uso do software QGIS (2024).

Os dados do ICEA adquiridos para representar um fenômeno de escala regional foram: cobertura de nuvem (em oktas); precipitação (mm); pressão QFE - Pressão da estação ao nível médio da pista (hPa); temperatura do bulbo seco (°C); velocidade do vento (kt); direção do vento (°); Umidade Relativa (%). Para a velocidade do vento expressa na unidade de medida kt (nós), se converteu para quilômetros por hora (km/h) utilizando-se da conversão 1 kt = 1,852 km/h. Além destes dados, também se conferiu a visibilidade predominante (dam) e tipos de nuvens, dados horários disponibilizados pelo ICEA. A partir de uma revisão bibliográfica, observou-se que estes elementos meteorológicos são frequentemente associados à natureza da TA, mesmo que não necessariamente generalizáveis a toda a área afetada mas representantes de um caso local representativo.

Os dados foram organizados em planilhas do software Microsoft Excel, abrangendo um período de 31 dias: o dia do fenômeno, 15 dias anteriores e 15 dias posteriores ao evento ocorrido em 26/09/2021. Foram calculadas as estatísticas médias diárias dos elementos climáticos, os quais foram posteriormente organizados em gráficos para Análise Rítmica do mês. Para a data específica do fenômeno, os dados foram registrados em intervalos horários. O recorte deste período de 31 dias (incluindo o dia da tempestade de areia) atestam a

dimensão do contexto sinótico e do comportamento atmosférico da região. Desta forma, traz uma base para a compreensão do quadro representativo das condições do tempo à época e o desenvolvimento do fenômeno.

Para a análise sinótica, em vista a identificar os sistemas atmosféricos atuantes, foram utilizadas cartas sinóticas da Marinha do Brasil referentes ao período de 31 dias, entre setembro e outubro de 2021. As cartas analisadas correspondem aos horários zulu 00HMG e 12HMG, que equivalem a 9h e 21h no horário local, respectivamente. A análise sinótica viabiliza avaliar as mudanças no padrão atmosférico no dia do fenômeno, complementada pelas imagens de satélite fornecidas pela Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (Redemet) nos mesmos horários diários.

Os parâmetros climáticos e os sistemas atmosféricos foram organizados em dois gráficos de Análise Rítmica: o primeiro referente ao período de 31 dias (temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, velocidade do vento, precipitação, nebulosidade, direção dos ventos e os sistemas atmosféricos) e o segundo gráfico, um recorte temporal estrito ao intervalo do fenômeno no dia 26 de setembro e analisado em intervalos horários utilizando dos mesmos parâmetros, excetuando os sistemas. Os gráficos de Análise Rítmica, como proposta de Monteiro (1971), permitem analisar a combinação dos elementos climáticos simultaneamente com a circulação secundária para se entender os diversos fenômenos atmosféricos e possibilitar estudos de caso.

Para estudar o fenômeno foram consultados os dados da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2024) sobre poluição atmosférica, incluindo MP10 e MP2,5 (materiais particulados), além da Radiação Solar Global. Esses dados são fundamentais para compreender as características dos materiais particulados suspensos na data do fenômeno e, de maneira geral, inferir suas interações físicas e associações com a evolução da tempestade de areia. Esses dados servem como subsídio para a Análise Rítmica, permitindo entender como as propriedades dos aerossóis observadas na cronologia do fenômeno alteraram as propriedades da evolução da tempestade.

Além de um estudo mais detalhado do fenômeno e seus elementos de controle meteorológico, buscou-se também discutir o contexto ambiental, como a situação hídrica do período estudado e suas repercussões na TA. Com isso, foram abordadas brevemente

questões como a situação de seca, a qualidade do ar, os impactos na saúde pública, bem como alguns danos reportados pela imprensa e relatórios técnicos do estado de São Paulo.

3. DESENVOLVIMENTO

A tempestade de areia de grandes proporções atingiu, no dia 26 de setembro de 2021, diversas cidades do Centro e Norte do estado de São Paulo e do Triângulo Mineiro com uma enorme nuvem escura que causou apreensão na população e acarretou transtornos em algumas localidades. Fortes rajadas de vento ocorreram em diferentes pontos e, no caso do aeroporto de Ribeirão Preto, chegaram aos 92 km/h, como indicou o Instituto de Controle do Espaço Aéreo (2024).

A elevada intensidade do evento meteorológico se deu em função da criação de circunstâncias favoráveis ao longo dos meses anteriores à sua ocorrência. O período de estiagem prolongada e precipitações muito abaixo dos padrões históricos na região são apontados como fatores desencadeadores (ANA, 2024). Os meses de inverno tradicionalmente correspondem à temporada seca no Centro-Oeste e no Sudeste do Brasil.

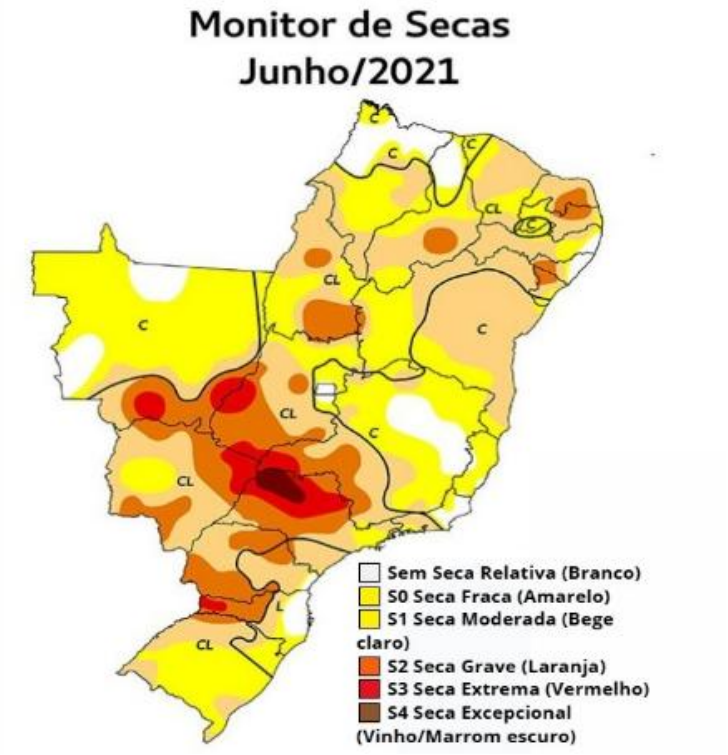
Quando a precipitação começa a retornar entre os meses de setembro e outubro com temporais de vento, aumenta-se a probabilidade da ocorrência de tempestades de areia quando há ventania, uma vez que o solo está exposto e recoberto de areia produzidas no período seco. Essas foram as condições que levaram à ocorrência da TA do dia 26 de setembro.

As condições de escassez de precipitação, em 2021, estão de acordo com o mapa de seca do Brasil de agosto de 2021 (antes do fenômeno), e disponibilizado pela Agência Nacional de Águas (ANA) (Figura 3). A região em que se originou a tempestade de areia foi a que apresentou o quadro mais grave de seca no Brasil.

Na Região Sudeste, devido à persistência de chuvas abaixo da média, houve o avanço das secas nas categorias excepcional e extrema, no Norte e Noroeste de São Paulo e no Triângulo Mineiro, segundo informações da ANA (2024), além do agravamento da seca em uma porção no norte mineiro, que passou de moderada para grave. A coincidência espacial entre a área de seca excepcional e a ocorrência da tempestade sugere uma associação entre os dois fenômenos, embora não seja possível estabelecer causalidade direta apenas com os

dados disponíveis. A zona compreendida entre o noroeste paulista e o Triângulo Mineiro era a única com seca em agosto na categoria excepcional. Todo o Centro-Norte do estado de São Paulo estava na categoria de seca extrema.

Figura 3 - Mapa de seca do Brasil de agosto de 2021.

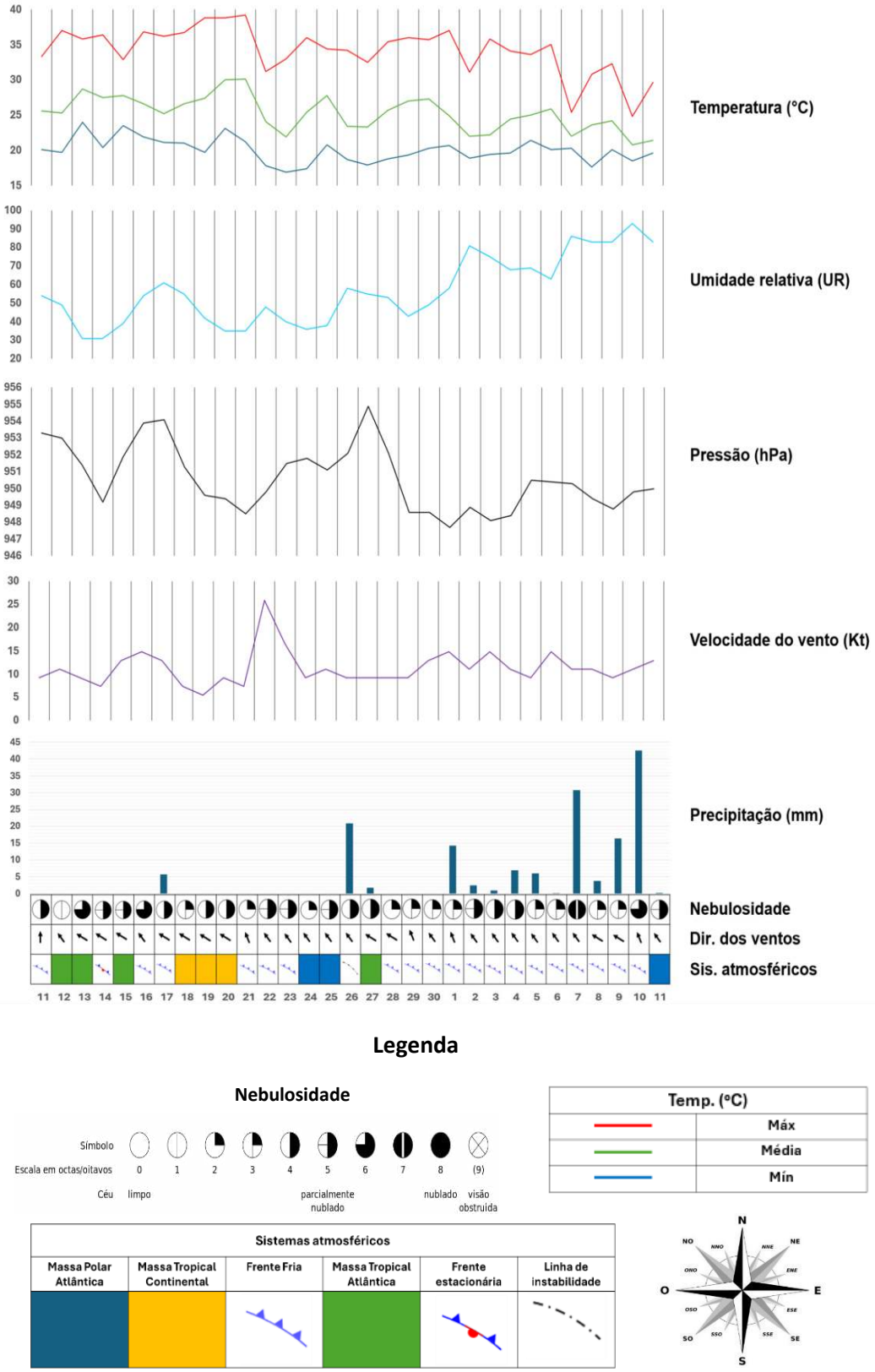


Fonte: Agência Nacional das águas (2024).

A região enfrentava um período de ausência de chuvas e calor intenso, com temperaturas máximas próximas de 40ºC, conforme dados do Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA) (2024). Nas semanas que antecederam o evento, ocorreu uma significativa perda de umidade do solo, resultando no acúmulo de grandes quantidades de areia na superfície, oriundas de solos expostos e do uso inadequado da terra.

As nuvens carregadas de temporal de natureza convectiva, que se formaram durante à tarde de 26 de setembro devido ao forte calor no interior paulista, atuaram como "catalisadores" para a tempestade. Os ventos fortes na base dessas nuvens levantaram a areia acumulada para a atmosfera, gerando a TA. Essas condições podem ser observadas no gráfico de Análise Rítmica da Figura 4.

Figura 4 - Gráfico de Análise Rítmica do período 11/09 a 11/10 de 2021.



Fonte: Elaboração dos autores (2024).

3.1 ANÁLISE RÍTMICA DE SETEMBRO E OUTUBRO

No mês de setembro de 2021 observou-se um recuo da Massa Tropical Atlântica (mTa), apesar de sua atuação ter sido mais notável na primeira quinzena do período. No geral, houve uma grande interação entre múltiplos fenômenos durante a transição entre as estações. A estação da primavera/verão na região sudeste do país é marcada pelas extensas zonas de perturbação frontal, com a interação das massas equatoriais e tropicais, e a presença do Anticiclone Polar Atlântico produtor da maior parte da gênese de precipitação nesta região do país (Sant'anna Neto, 2005).

Especificamente entre os dias 11 e 26 de setembro, diferentes sistemas meteorológicos estiveram em atuação, incluindo a Massa Polar Atlântica (mPa), a Massa Tropical Continental (mTc) e a Massa Tropical Atlântica (mTa), além das frentes frias e estacionárias. A Massa Tropical Atlântica (mTa) teve uma influência moderada na primeira quinzena, resultando em valores baixos de umidade relativa do ar, embora houvesse descontinuidades devido à presença de frentes, como a frente estacionária de 14 de setembro. A Massa Tropical Continental, apesar de sua atuação contínua entre os dias 18 e 20, não conseguiu se expandir com força para a região Sudeste. No entanto, sua influência foi notável na manutenção de temperaturas do ar amenas e elevada umidade relativa, também efeito da incursão das frentes.

Em um segundo período, a partir do dia 26 de setembro, predominaram as frentes que trouxeram a maior frequência de chuvas. A instabilidade atmosférica mais acentuada teve início no dia 21 com a chegada de um sistema pré-frontal, seguida pela dominação da Massa Polar Atlântica. A partir dessa data (21), observou-se uma queda nas médias de temperatura, apesar das variações ainda influenciadas pela Massa Tropical Atlântica (mTa), que teve uma atuação restrita ao dia 27. No entanto, foi a partir do dia 29 que os sistemas meridionais passaram a predominar no Brasil, com a redução da alta pressão dominante de mesoescala durante a primeira quinzena da maior atuação da Massa Tropical Continental (mTc) e a Massa Tropical Atlântica (mTa).

A transição de um período com menores índices pluviométricos durante o inverno para uma fase caracterizada pela maior atuação de sistemas meteorológicos que provocam instabilidade atmosférica, teve efeito nas variações consideráveis na região para a segunda

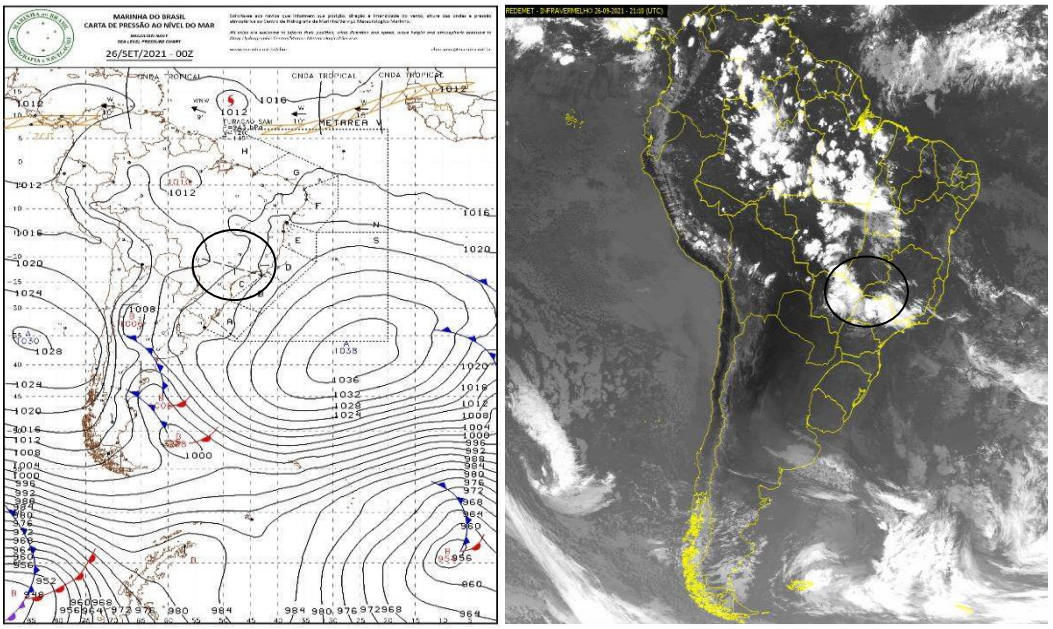
quinzena do período estudado, marcado pelas transições entre estações. A partir do dia 21, observou-se a dominação dos sistemas meridionais, gerando condições favoráveis para a chegada de Linhas de Instabilidade (LI) e frentes frias mais intensas e úmidas. Este período também foi marcado pelo recuo das áreas de alta pressão, que, embora ainda presentes, cederam espaço aos demais sistemas atmosféricos. Essas condições culminaram na tempestade de areia ocorrida no dia 26 de setembro, um evento representativo dessa mudança no padrão atmosférico para o mês de outubro.

Essas condições meteorológicas, durante a transição sazonal de um período seco para um chuvoso, também foram observadas por Sissakian (2013) nas regiões do Médio Oriente. Nessas áreas, fortes tempestades de areia agitam partículas da superfície, enquanto massas polares, frentes, e correntes de jato subtropical incursionam na transição do inverno para a primavera. É importante destacar que os estudos de Sissakian (2013) se concentram em áreas desérticas, onde as tempestades de areia são comuns e a dinâmica atmosférica de seca é regular. No entanto, essa dinâmica pode apresentar diferenças em contextos tropicais úmidos, como discutido nesse estudo de caso.

3.1 ANÁLISE RÍTMICA DO DIA DO FENÔMENO (26/09/2021)

Em específico, no dia 26 de setembro de 2021, data da ocorrência do fenômeno, foi registrada uma Linha de Instabilidade logo pela manhã, conforme foi observado na carta sinótica das 00 UTC (Figura 5). Essa linha deslocou-se de sul para norte ao longo do dia trazendo turbulências atmosféricas até a noite da mesma data (26). Linhas de Instabilidade constituem um traçado extenso que desloca grande perturbação atmosférica, sendo anunciadas por frentes de rajadas que se caracterizam por fortes correntes subsidentes de chuva e gelo (as downdrafts), e pela sucessiva convecção profunda em sua passagem (SILVA DIAS, 1987).

Figura 5 - (a) Imagem da LI na carta sinótica da Marinha em 26 de set. 2024; (b) e de satélite do Redemet, mostrando a linha de nebulosidade em SP.



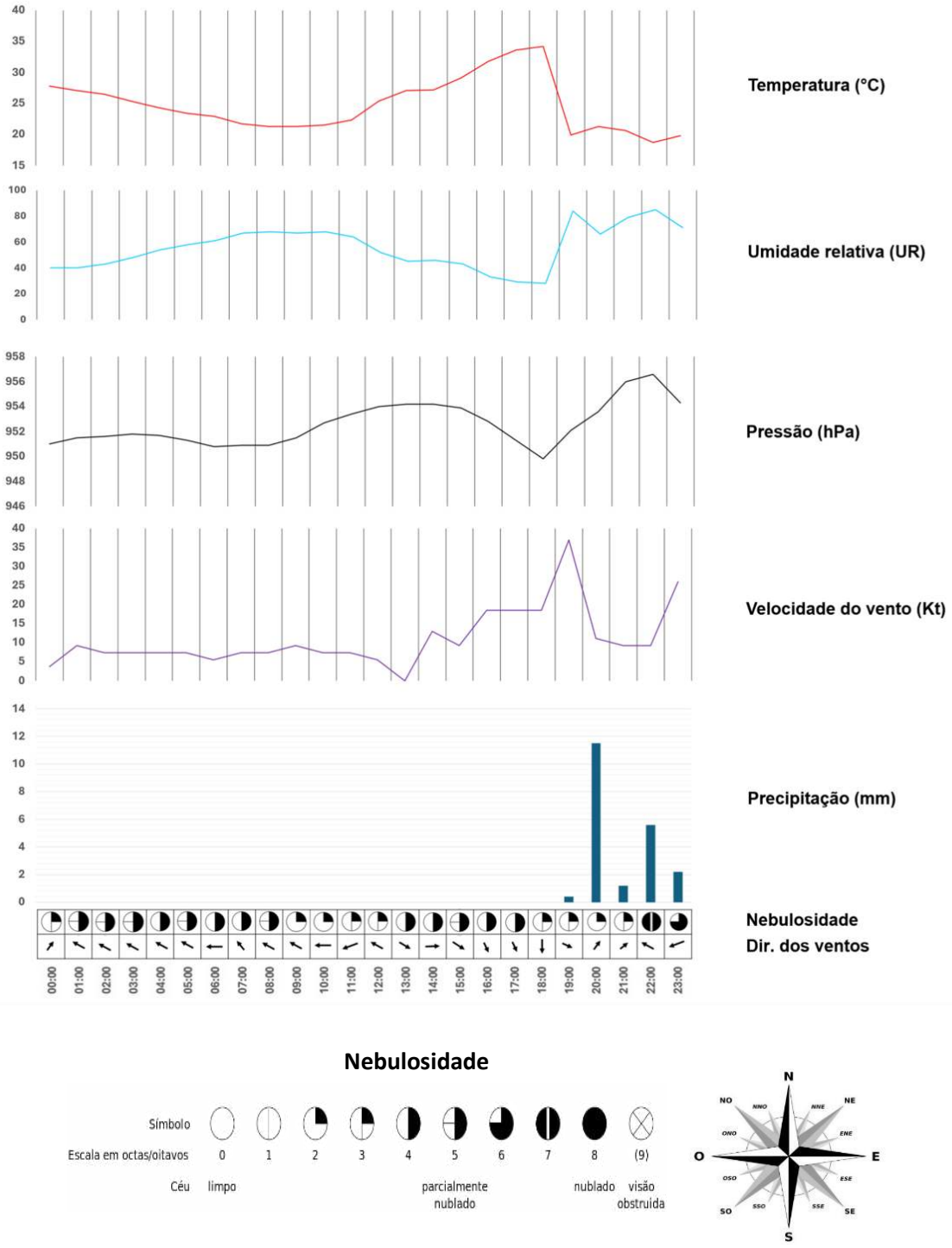
a) **b)**

Fonte: Marinha (a) e Redemet (b).

A delimitação temporal das fases da tempestade seguiu critérios baseados no comportamento conjunto das variáveis meteorológicas horárias do ICEA. A Fase de Suspensão foi definida pelo início da inversão da direção do vento (de Sudeste, padrão climatológico local, para Oeste-Noroeste) associada ao aumento da pressão atmosférica e da velocidade do vento. A Fase Convectiva foi delimitada pelo intervalo em que a velocidade do vento atingiu rajadas superiores a 90 km/h, acompanhada de queda abrupta de temperatura (superior a 10°C em poucas horas), aumento expressivo da umidade relativa e redução da visibilidade para valores iguais ou inferiores a 1.000 m. A Fase Pós-Tempestade foi caracterizada pelo retorno gradual da velocidade do vento e da pressão atmosférica aos valores pré-evento, associado à precipitação e à normalização da visibilidade no dia subsequente.

A análise horária da variação das condições meteorológicas pode ser observada no gráfico de Análise Rítmica da Figura 6.

Figura 6 - Gráfico de Análise Rítmica do dia 26 de setembro de 2021.



Fonte: Elaboração dos autores (2024).

Desde as 9h da manhã, observou-se o avanço da Linha de Instabilidade, acompanhado de aumento da pressão atmosférica e acentuação da relação inversa entre temperatura e umidade relativa do ar, padrão que se manteve elevado entre os dias 22 e 27 de setembro. A

partir das 14h, a chegada da frente da linha de instabilidade intensificou a velocidade do vento e inverteu sua direção predominante de Sudeste para Oeste-Noroeste, contrariando o padrão climatológico da cidade, conforme a imagem de satélite (Figura 5) e os dados horários do ICEA (2021). Ao longo da manhã, verificou-se ainda a presença de nuvens Altocumulus (AC) e Cumulus (CU), que cobriram parcialmente o céu. Reportagens registraram a formação visível de uma nuvem de poeira por volta das 15h30 (UOL, 2021), coincidindo com o início da Fase de Suspensão das partículas, impulsionada pelo aumento conjunto da pressão atmosférica e da velocidade do vento.

Na Fase Convectiva, que teve início por volta das 18h, quando a temperatura da superfície (que vinha aumentando desde as 12h em razão do forte fluxo de calor sensível e da elevada energia potencial convectiva disponível) passou a decrescer de forma acentuada, acompanhada de aumento da umidade relativa do ar. Essa desestabilização da camada superficial favoreceu o desenvolvimento de uma camada mista profunda (Takemi, 1999). Nesse horário, a velocidade do vento atingiu rajadas de até 92 km/h às 18h42, com ventos sustentados de 55 km/h suficientes para sacudir árvores e dificultar a caminhada contra o vento (NOAA, 2024), conforme dados do ICEA (2021). A fase caracterizou-se pela conversão do calor sensível em calor latente, resultando em saturação e precipitação.

Reportagens indicaram interrupção elétrica e quedas de árvores em vias públicas da cidade de Ribeirão Preto, segundo informações do corpo de bombeiros (REVIDE, 2021). Um fato que chamou a atenção foi no Aeroporto de Ribeirão Preto, em que uma aeronave chegou a rotacionar na pista, como confirmado pelo UOL (2021) em contato com a companhia Azul, que indicou que não houve feridos e a inspeção da aeronave foi efetuada. Figura 8 mostra a tempestade de areia na cidade do interior de SP.

Figura 8 - Tempestade de areia atinge a cidade de Ribeirão Preto/SP.



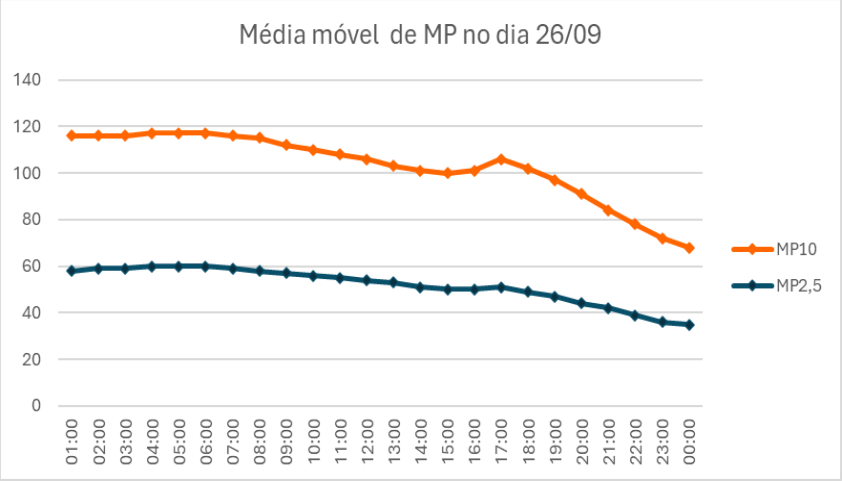
Fonte: REVIDE (2021).

A convecção ocorreu devido ao choque da linha de instabilidade tempestuosa de Cumulonimbus (Cb) a partir das 18h com o ar quente e seco já presente na região. A LI pode gerar chuva e granizo em sua retaguarda, além de uma corrente descendente forte o suficiente para levantar o calor da superfície. Esse ar frio e pesado empurra para cima o ar mais quente e leve, reforçando a corrente ascendente quente que gera nuvens de chuva e renova assim o ciclo (IDSO, 1976). Neste caso, a linha de instabilidade prepondera como fator como fator de mudança no padrão meteorológico que atuou na gênese da TA.

Quando o desenvolvimento do fenômeno é diurno, ocorre o efeito óptico das partículas, em que a elevação da camada de areia em altitude tende a reduzir sua temperatura, o que diminui a radiação de ondas longas emitida, efeito observado tanto no topo da atmosfera (TOA) quanto na superfície, variando conforme a distribuição vertical da camada de partículas (SAEED *et al*, 2014). Entretanto, desde a formação da tempestade de areia durante à tarde do dia do fenômeno, não houve uma queda progressiva de temperatura. Nesse caso, é provável que tenha sido a transferência de calor sensível para calor latente tenha sido o principal agente responsável pela queda na temperatura ou pela alteração na natureza das partículas.

No dia do fenômeno, dados horários da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2024) indicaram a predominância significativa de partículas de diâmetro MP10 e moderada quantidade de MP2,5. Na presente data, havia muita partícula em suspensão de mais de uma natureza, entretanto, os dados quantitativos indicam predominância de partículas maiores, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Material particulado (MP) registrado no dia do fenômeno da tempestade



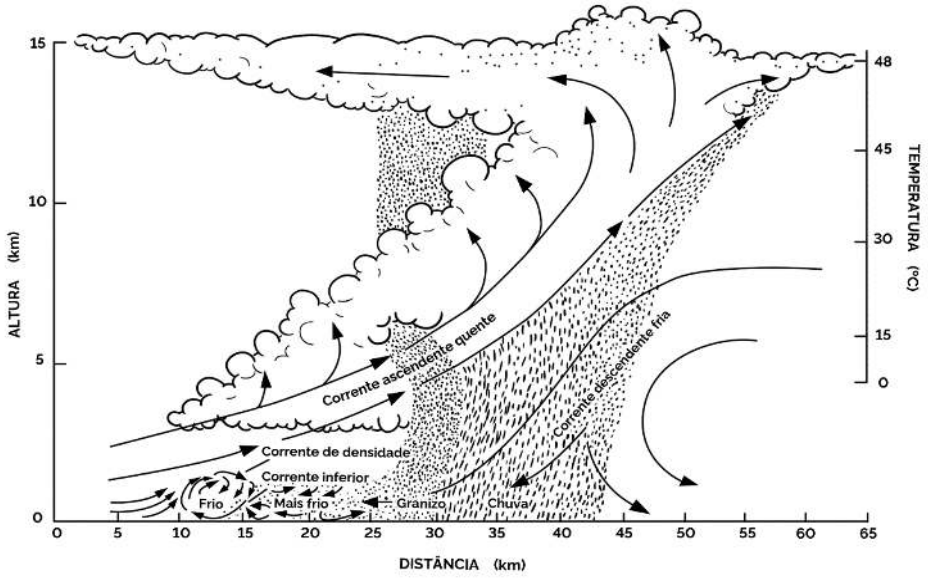
Fonte: Elaboração dos autores a partir dos dados da CETESB (2024).

Sabe-se que os aerossóis de poeira mineral exercem efeitos diretos e indiretos na forçante climática. Entre seus efeitos incluem: os aerossóis podem alterar propriedades ópticas e higroscópicas, além de interferir na formação de núcleos de condensação de nuvens (CCN) e núcleos de gelo (IN) (Knippertz, 2014). As propriedades ópticas tiveram efeito direto na capacidade reflexiva e/ou absortiva no balanço da Radiação Solar Global a partir das 15h, em que houve uma queda brusca nos valores de radiação, segundo os dados da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2024), até atingir um balanço de 0W/m2 às 16h de ondas longas.

Os aerossóis MP10 são partículas espessas, frequentemente formadas pela suspensão, sobressaindo as arenosas, devido à turbulência. No entanto, seu processo de remoção da atmosfera é mais eficiente através das gotas de chuva, tendo um período de vida de apenas minutos ou horas. Em contraste, as partículas MP2,5 resultam de reações químicas, como aquelas provenientes de queima de combustíveis e biomassa. Estas partículas têm um tempo de residência na atmosfera significativamente maior, variando de dias a semanas, e podem contribuir para a formação de nuvens (EPA, 2004).

No momento da fase convectiva houve um aumento repentino da umidade relativa do ar e uma queda acentuada da temperatura, que pode chegar a 15°C, associada a uma redução da visibilidade para até 1000 m às 18h (ICEA, 2021). A partir das 19h, foram registradas chuvas decorrentes da convecção na retaguarda da linha de instabilidade; quando a trovoada segue a tempestade de areia, a precipitação tende a ter efeito de limpeza da atmosfera. Em contrapartida, quando a chuva não ocorre ou evapora antes de atingir o solo, a poeira pode permanecer em suspensão por horas ou dias, seguindo o padrão típico de áreas desérticas, e contrastando com as tempestades de areia associadas à chuva observadas em regiões úmidas (Idso, 1976; Takemi, 1999).

Figura 10 - Esquema de formação de uma tempestade de areia como efeito de Linha de Instabilidade com diferenciação térmica e a formação de nuvens convectivas.



Fonte: Idso (1976) com adaptações. Tradução de Thamirys Verneque.

Em um estudo de caso aplicado na cidade de Bagdá, no Iraque, Al-Salihi (2015) observou mudanças nos padrões meteorológicos antes, durante e após a TA, verificando a queda da temperatura e visibilidade e aumento da umidade relativa para o dia seguinte. Entretanto, na presente pesquisa conduzida não se verificou redução de visibilidade no dia posterior (27), demarcando uma posterior normalidade, possivelmente em razão da chuva, que limpou a atmosfera na Fase Pós-Tempestade em que houve queda de pressão, redução e normalização da velocidade do vento, queda de temperatura, aumento de umidade relativa do ar, e precipitação posterior ao fenômeno (Quadro 1).

Quadro 1 - Fases de uma episódica tempestade de areia tropical com chuva.

Controle climático	Fase de Suspensão	Fase de Convecção	Fase Pós-Tempestade
Temperatura	↑	↓	↓
UR	↓	↑	↑
Pressão	↑	↓	↓
Vento	↑	↑	↓

Controle climático	Fase de Suspensão	Fase de Convecção	Fase Pós-Tempestade
Precipitação	↓	↓	↑

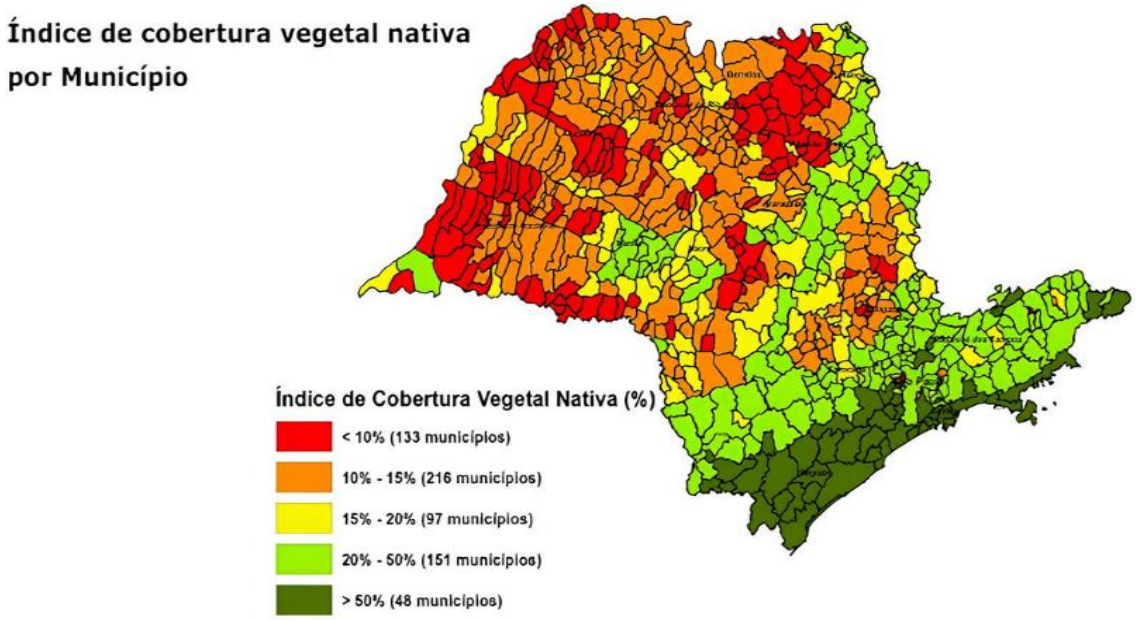
Fonte: Elaboração dos autores (2024).

A tempestade de areia foi citada no Relatório de Qualidade do Ar 2021 do Governo do Estado de São Paulo que incluiu a cidade de Ribeirão Preto com qualidade do ar MUITO RUIM por MP10 no período da semana do evento (CETESB, 2022). A forte chuva subsequente pode ter carreado compostos tóxicos de cálcio e magnésio do solo, além de partículas biológicas provenientes da queima de vegetação e biomassa (UOL, 2021). Entretanto, como já mostrado na Figura 9, as partículas de maior diâmetro (MP10), prevaleceram sobre as finas (MP2,5), indicando que particulados arenosos foram os mais expressivos, mesmo que haja quantidades razoáveis de finos, como a oriunda de biomassa.

O Relatório da qualidade do Ar 2021 do Governo de São Paulo também cita a presença de focos de incêndio, mas sem maior detalhamento. O portal Terrabrasilis (2024), para monitoramento de queimadas, indicou que o período compreendido entre agosto e setembro de 2021 concentrou 70% de todos os focos de queimada, e esses meses geralmente são os que apresentam maior número de focos. Somado às partículas destacadas do solo, os aerossóis de origem biogênica podem ter interferido na qualidade do ar.

A seca severa que acometia o Norte de São Paulo e o Triângulo Mineiro, como mostra o Monitor das Secas (2024), já citado anteriormente, levou a uma maior presença de material particulado em suspensão. O norte do estado de São Paulo e a região de Minas Gerais são áreas fortemente antropizadas pela agropecuária, resultando na retirada da cobertura vegetal nativa, como mostra a figura 11. Nesta época do ano, tem-se o hábito de promover a rebrota das pastagens e abertura de áreas para o cultivo no início da estação chuvosa (Mistry, 1998), o que provavelmente contribuiu para gerar um ambiente favorável para a tempestade de areia.

Figura 11 - Índice de Cobertura vegetal nativa por munícipio do estado de São Paulo em 2020.



Fonte: SEMIL-SP (2020).

O Índice de Cobertura Vegetal Nativa por município no estado de São Paulo, em 2020, evidencia uma significativa variação espacial na preservação de vegetação nativa. Conforme os dados, 133 municípios apresentaram índices inferiores a 10%, concentrados principalmente no norte e noroeste do estado, enquanto apenas 46 municípios possuíam mais de 50% de cobertura vegetal nativa, localizados predominantemente na região sul. A maioria dos municípios (216) encontra-se na faixa entre 10% e 15% de cobertura, indicando um cenário de grande fragmentação ambiental. Estes dados destacam a demanda de políticas públicas de restauração e proteção dos sistemas naturais a partir de métodos de monitoramento mais abrangentes.

Além da estabilidade dos sistemas produtores do tempo, que podem não favorecer o desenvolvimento desses fenômenos mais raros no Brasil, as condições da superfície do solo devem ser consideradas. O estudo constatou que não foi apenas a meteorologia, mas essa condição de superfície seca e exposta parece ter sido especialmente relevante para o evento, embora fatores adicionais não analisados aqui possam também ter contribuído.

Desde a ocorrência desse fenômeno, em 2021, o Brasil presenciou outras tempestades de areia, como observado em Manaus em 2023 (UOL, 2023), em cidades do interior de São Paulo em 2022 (UOL, 2022), em Mato Grosso do Sul no período final de 2023 (G1, 2023) e

novamente em 2024 em Mato Grosso do Sul (G1, 2024). Em todos esses casos, a seca foi uma condição crucial para a formação dos eventos, além das queimadas registradas nesses períodos. O Brasil, assim como a América do Sul, carece de estudos sobre tempestades de areia, mas eventos como esses podem oferecer contribuições importantes para a compreensão de contextos climatológicos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da técnica da Análise Rítmica de Monteiro (1971), para a análise do fenômeno da tempestade de areia, em Ribeirão Preto (SP), em setembro de 2021, permitiu avaliar o contexto de evolução desse evento, proporcionando uma contribuição inédita para a compreensão desse fenômeno raro no Brasil. Na circulação secundária da atmosfera, destacou-se a importância dos sistemas produtores de tempo como condição fundamental para a gênese da tempestade, em especial àqueles de duração mais breve e que produzem forte instabilidade. Verificou-se o acoplamento dos eventos de mesoescala para além dos dados de meteorologia locais, que por si só não explicam a abrupta variação de seus componentes.

A expansão de pesquisas similares em território nacional e sul-americano pode contribuir para uma compreensão mais abrangente dos processos de formação de TAs, oportunizando a avaliação climatológica e a identificação de riscos e vulnerabilidades em um cenário de mudanças climáticas e modificações do solo pela ação antrópica. Os estudos sobre esses fenômenos historicamente estão restritos a núcleos de pesquisas específicos em áreas de maior ocorrência, sendo raros os estudos que se dedicam a uma previsão para cenários futuros.

Em paralelo, evoluem os modelos físicos computacionais para o *forecasting* de TAs. Embora robustas, essas modelagens apresentam alta complexidade e exigem parametrizações meticulosas, adaptadas à heterogeneidade dos contextos ambientais extradesérticos, que ainda são pouco explorados e de natureza imprevisível. O sensoriamento remoto destaca-se como uma ferramenta moderna, auxiliando em um mapeamento detalhado da superfície para a reconstrução de eventos históricos e a elaboração de prognósticos mais detalhados para a gestão de riscos.

5. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Monitor de Secas**: mapa de monitoramento, setembro de 2021. [S. l.]: ANA, 2021. Disponível em: https://monitordesecas.ana.gov.br/mapa?mes=9&ano=2021. Acesso em: 24 mar. 2024.

AHRENS, C. Donald. **Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment.** 9. ed. Belmont, CA: Brooks/Cole, Cengage Learning, 2009.

AL-SALIHI, A. M.; MOHAMMED, T. H. The effect of dust storms on some meteorological elements over Baghdad, Iraq: Study Cases. **IOSR Journal of Applied Physics,** v. 7, p. 01-07, 2015. DOI: 10.9734/BJAST/2016/31460.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2021**. São Paulo: CETESB, 2022. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2022/10/Relatorio-de-Qualidade-do-Ar-no-Estado-de-Sao-Paulo-2021.pdf. Acesso em: 07 jun. 2024.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. **Imagens de Satélite**. Disponível em: https://redemet.decea.mil.br/old/?i=produtos&p=imagens-de-satelite. Acesso em: 23 mar. 2024.

EKHTESASI, M. R.; SEPEHR, A. Investigation of wind erosion process for estimation, prevention, and control of DSS in Yazd–Ardakan plain. **Environmental Monitoring and Assessment,** v. 159, p. 267-280, 2009. DOI: 10.1007/s10661-008-0628-4.

FIELD, C. B. et al. IPCC, 2012: summary for policymakers: managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. In: **Planning for Climate Change**. Londres: Routledge, 2018. p. 111-128.

FORMENTI, P. et al. Recent progress in understanding physical and chemical properties of African and Asian mineral dust. **Atmospheric Chemistry and Physics,** Göttingen, v. 11, n. 16, p. 8231-8256, 2011. DOI: 10.5194/acp-11-8231-2011.

G1. Tempestade de areia 'engole' santuário de biodiversidade no Pantanal de MS; veja vídeo. **G1,** Mato Grosso do Sul, 29 dez. 2023. Disponível em: https://g1.globo.com/ms/mato-grosso-do-sul/noticia/2023/12/29/tempestade-de-areia-engole-santuario-de-biodiversidade-no-pantanal-de-ms-veja-video.ghtml. Acesso em: 08 jun. 2024.

GOUDIE, A. S.; MIDDLETON, N. J. **Desert dust in the global system**. Springer Science & Business Media, 2006.

HANSEN, Z. K.; LIBECAP, G. D. Small farms, externalities, and the Dust Bowl of the 1930s. **Journal of Political Economy,** Chicago, v. 112, n. 3, p. 665-694, 2004. DOI: 10.1086/383102.

IDSO, S. B. Dust storms. **Scientific American,** Nova Iorque, v. 235, n. 4, p. 108-115, 1976. DOI: 10.2307/24950465.

INSTITUTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. **Consulta de dados de superfície**. Disponível em: https://pesquisa.icea.decea.mil.br/read_superficie_list/. Acesso em: 24 mar. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (BRASIL). Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. **Síntese climática mensal - setembro de 2021**. São José dos Campos: INPE, 2021. Disponível em: https://s1.cptec.inpe.br/admingpt/tempo/pdf/sintese_mensal_092021.pdf. Acesso em: 27 maio 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (BRASIL). **Estatísticas de queimadas por estado**. Disponível em: https://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/situacao-atual/estatisticas/estatisticas_estados/. Acesso em: 23 mar. 2024.

KRUK, F.; DE FREITAS, A. R. Análise Rítmica aplicada ao entendimento de eventos hidrológicos extremos na bacia hidrográfica do Rio das Antas, Irati–PR. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento,** v. 1, p. 1908-1918, 2017. DOI: 10.20396/sbgfa.v1i2017.2401.

MARENGO, J. A. O futuro clima do Brasil. **Revista USP,** São Paulo, n. 103, p. 25-32, 2014. DOI: 10.11606/issn.2316-9036.v0i103p25-32.

MARINHA DO BRASIL. **Cartas Sinóticas**. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas. Acesso em: 23 abr. 2024.

MIDDLETON, N. Variability and trends in dust storm frequency on decadal timescales: Climatic drivers and human impacts. **Geosciences,** Basileia, v. 9, n. 6, p. 261, 2019. DOI: 10.3390/geosciences9060261.

MISTRY, J. Decision-making for fire use among farmers in savannas: an exploratory study in the Distrito Federal, central Brazil. **Journal of Environmental Management,** v. 54, n. 4, p. 321-334, 1998. DOI: 10.1006/jema.1998.0239.

NETO, J. L. S. Decálogo da climatologia do sudeste brasileiro. **Revista Brasileira de Climatologia,** v. 1, 2005. DOI: 10.5380/abclima.v1i1.25232.

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration. **Beaufort Wind Scale**. Storm Prediction Center. Disponível em: https://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/beaufort.html. Acesso em: 14 jun. 2024.

REVIDE. Forte chuva e rajadas de vento atingem Ribeirão Preto na tarde deste domingo, 26. **REVIDE,** Ribeirão Preto, 26 set. 2021. Disponível em: https://www.revide.com.br/noticias/clima/forte-chuva-e-rajadas-de-vento-atingem-ribeirao-preto-na-tarde-deste-domingo-26/. Acesso em: 27 maio 2024.

SAEED, T. M.; AL-DASHTI, H.; SPYROU, C. Aerosol's optical and physical characteristics and direct radiative forcing during a shamal dust storm, a case study. **Atmospheric Chemistry and Physics,** Göttingen, v. 14, n. 7, p. 3751-3769, 2014.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapeamento da vegetação nativa do Estado de São Paulo: inventário florestal 2020**. Disponível em: https://smastr16.blob.core.windows.net/consema/sites/15/2020/08/mapeamento-da-vegetacao-nativa-do-estado-de-sao-paulo-inventario-florestal-2020.pdf. Acesso em: 24 maio 2024.

SILVA DIAS, M. A. Sistemas de mesoescala e previsão de tempo a curto prazo. **Revista Brasileira de Meteorologia,** v. 2, n. 1, p. 133-150, 1987.

SISSAKIAN, V.; AL-ANSARI, N.; KNUTSSON, S. Sand and dust storm events in Iraq. **Journal of Natural Science,** v. 5, n. 10, p. 1084-1094, 2013. DOI: 10.4236/ns.2013.510133.

SOLEIMANI, Z. et al. An overview of bioaerosol load and health impacts associated with dust storms: A focus on the Middle East. **Atmospheric Environment,** Oxford, v. 223, p. 117187, 2020. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117187.

TAKEMI, T. Structure and evolution of a severe squall line over the arid region in northwest China. **Monthly Weather Review,** Boston, v. 127, n. 6, p. 1301-1309, 1999. DOI: 10.1175/1520-0493.

UNITED STATES. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Air quality criteria for particulate matter**. Princeton: Citeseer, 2004.

UOL. Avião é arrastado em pista de aeroporto durante tempestade de poeira em SP. **UOL,** Cotidiano, 27 set. 2021. Disponível em: https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2021/09/27/aviao-tempestade-de-areia.htm. Acesso em: 24 maio 2024.

UOL. O que explica tempestade de areia que tomou conta de Manaus. **UOL,** Meio Ambiente, 08 nov. 2023. Disponível em: https://noticias.uol.com.br/meio-ambiente/ultimas-noticias/redacao/2023/11/08/o-que-explica-tempestade-de-areia-que-tomou-conta-de-manaus.htm. Acesso em: 08 jun. 2024.

UOL. Tempestade de areia atinge cidades de Mato Grosso do Sul e assusta população. **UOL,** Vídeos, 21 mar. 2024. Disponível em: https://noticias.uol.com.br/videos/2024/03/21/tempestade-de-areia-atinge-cidades-de-mato-grosso-do-sul-e-assusta-populacao.htm. Acesso em: 08 jun. 2024.

UOL. Tempestade de areia se forma sobre cidades no interior de São Paulo. **UOL,** Cotidiano, 11 nov. 2022. Disponível em: https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2022/11/11/tempestade-de-areia-se-forma-sobre-cidades-no-interior-de-sao-paulo.htm. Acesso em: 08 jun. 2024.

VERDAN, I.; JÚNIOR, A. C. S. O. Impactos do evento anômalo de precipitação do dia 18 de novembro de 2020 em São João do Paraíso, Cambuci-RJ. In: SIMPÓSIO EM CLIMA, ÁGUA, ENERGIA E ALIMENTOS, 2021. **Anais [...]**. 2021.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Dust storm or sandstorm**. Disponível em: https://cloudatlas.wmo.int/en/dust-storm-or-sandstorm.html. Acesso em: 30 maio 2024.

ZHANG, X. *et al*. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission. **Geophysical Research Letters,** Washington, v. 30, n. 24, 2003. DOI: 10.1029/2003GL018206.