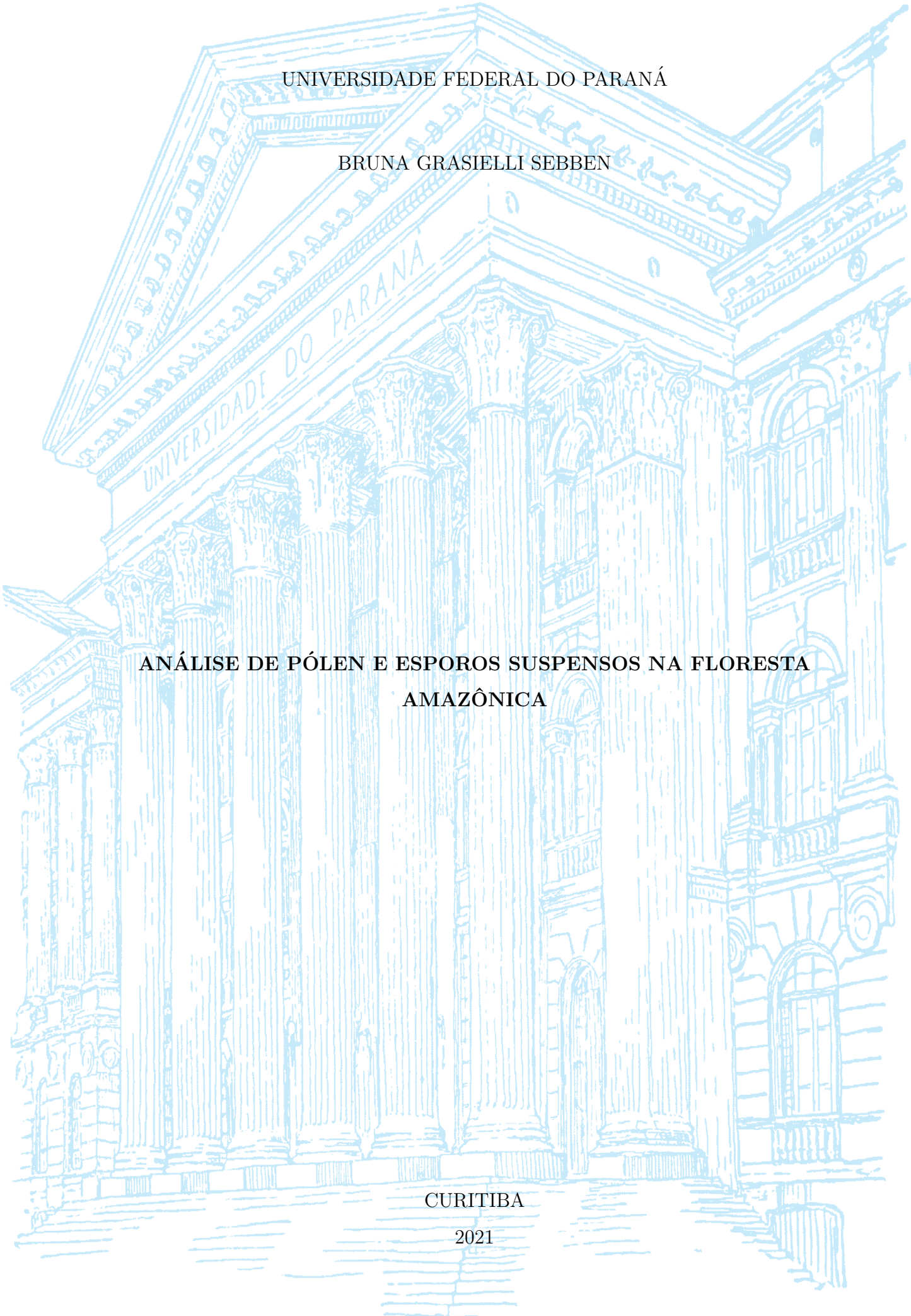
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNA GRASIELLI SEBBEN



ANÁLISE DE PÓLEN E ESPOROS SUSPENSOS NA FLORESTA AMAZÔNICA

CURITIBA

2021

BRUNA GRASIELLI SEBBEN

ANÁLISE DE PÓLEN E ESPOROS SUSPENSOS NA FLORESTA AMAZÔNICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Paraná para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Ricardo H. M. Godoi - UFPR
Coorientador: Theotonio M. Pauliquevis - Unifesp

CURITIBA

2021

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

BRUNA GRASIELLI SEBBEN

ANÁLISE DE PÓLEN E ESPOROS SUSPENSOS NA FLORESTA AMAZÔNICA

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 92, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. Ricardo Henrique Moreton Godoi
Departamento de Engenharia Ambiental, UFPR

Co-orientador:

Prof. Dr. Theotonio Mendes Pauliquevis Júnior
Departamento de Física, UNIFESP

Membro 1:

Prof. Dr. Michael Mannich
Departamento de Engenharia Ambiental, UFPR

Membro 2:

Prof. Dr. Jean Vitule
Departamento de Engenharia Ambiental, UFPR

Curitiba, 07 de Janeiro de 2022

AGRADECIMENTOS

O caminho até aqui não foi fácil, mas felizmente pude contar com o suporte de pessoas incríveis!

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Ricardo Godoi, por todo o conhecimento compartilhado, pelas inúmeras reuniões para discussão de resultados, pela motivação. Obrigada por acreditar em meu potencial.

Ao meu coorientador e demais membros da banca examinadora, pelos comentários construtivos, que contribuíram para a melhoria deste trabalho.

Sou grata a todos os colegas que tive o prazer de conhecer no sítio ATTO, e pela incrível oportunidade de ter conhecido a floresta amazônica. Foi uma experiência indescritível, serei eternamente grata por isto.

À minha família, pelo apoio e suporte incondicional, pela paciência, sem vocês nada disso seria possível; a todos os meus amigos e amigas que estiveram sempre presentes durante estes árduos anos, vocês fizeram com que os anos de universidade fossem os melhores da minha vida; por fim, obrigada Mari, por me fazer acreditar em mim, por ser a melhor companhia nestes anos e por tornar meus dias mais felizes. Amo todos vocês.

.

“A natureza é o único livro que oferece um conteúdo valioso em todas as suas folhas.”

Johann Wolfgang von Goethe

Resumo

A floresta amazônica é uma das únicas regiões no planeta Terra onde é possível realizar pesquisas científicas sem que haja influência significativa de atividades antrópicas. O projeto ATTO (*Amazon Tall Tower Observatory*) foi desenvolvido com o objetivo de conhecer melhor a dinâmica da floresta amazônica, bem como suas emissões atmosféricas e características biológicas. Medições prévias realizadas no sítio de pesquisa comprovaram a existência de grande quantidade de bioaerossóis suspensos que alcançaram até 300 m de altura. Este trabalho tem como hipótese que existe maior quantidade de bioaerossóis durante a estação seca da floresta e que durante eventos de nevoeiro há um aumento na quantidade de esporos suspensos, podendo inclusive promover reações químicas que potencialmente modificam o regime de chuvas na região. Sabendo que grãos de pólen e esporos de fungos são comprovadamente eficazes como núcleos de condensação de nuvens, foram realizadas duas amostragens de material biogênico no ATTO, durante as estações seca e chuvosa. Durante a estação seca houve maior registro de polens do que na úmida, provavelmente devido à maior sedimentação de partículas, causada pela alta umidade relativa da estação. Foi observado um padrão nas amostragens de esporos de fungos, sendo que a maior quantidade coletada ocorreu durante a noite. Nos dias que ocorreram eventos de nevoeiro, houve maior número de esporos em atmosfera, apesar de ter sido concluído que este fenômeno meteorológico não é um fator determinante para o transporte vertical deste material biogênico. Os resultados apresentados neste trabalho serão utilizados como base para pesquisas futuras, em face de compreender mais profundamente a relação floresta-atmosfera.

Palavras-chave: Nevoeiro, Bioaerossóis, Pólen, Esporos, Amazônia.

Abstract

The Amazon rainforest is one of the unique places on Earth where is possible to perform scientific research without meaningful influence from anthropic activities. The ATTO project (Amazon Tall Tower Observatory) was developed with the aim to understand better the rainforest's dynamic, as well as its atmospheric emissions and biological characteristics. Previous measurements made at the ATTO site had proved the existence of great quantities of airborne bioaerosols, which had reached 300 m. This paper has the hypothesis that there are more bioaerosols during the forest's dry season and that during fog events there is a rise in the amount of spores airborne, with the capacity to promote chemical reactions that could modify the regional rain pattern. Knowing that pollen grains and fungi spores are proven as effective cloud condensation nuclei, were performed two samplings at ATTO, during the dry and the wet season. On the dry season was registred more pollen grains than on the wet season, probably due to the greater washout effect, caused by the higher humidity. It was observed a pattern on spores samples, on which the greatest number of particles was collected during the night. On days when fog occurred, there were more spores airborne, even though it has been concluded that this meteorological phenomenon is not a determinant factor to transport biological material upwards. The results presented here will be used in future research as a basis, in order to comprehend more deeply the relation forest-atmosphere.

Key-words: Fog, Bioaerosol, Polen, Spores, Amazon.

LISTA DE FIGURAS

1 Exemplos da variedade de tamanhos e formatos dos grãos de pólen. Adaptado de Lacey e West (2007). 15

2 Ilustração do mecanismo de liberação de Basidiósporos. a) Esporo maduro e pronto para ser emitido. O manitol é secretado nas regiões em vermelho; b) Começo da formação das gotas de Buller e adaxial; c) Crescimento de ambas gotas; d) Coalescência das duas gotas e geração de momento; e) Liberação do Basidiósporo. Adaptado de Watkinson et al. (2015). 17

3 Ilustração da evolução vertical do nevoeiro. a) Começo da formação, o nevoeiro é mais denso próximo ao solo; b) A diferença de temperatura promove convecção na camada de *fog*, deixando a camada superior mais densa; c) Com o nascer do sol, começa a evaporação da camada mais inferior de nevoeiro, restando uma camada acima que se iguala à uma nuvem stratus de baixa altitude. Adaptado de Stull et al. (2018). 23

4 Localização do Sítio de Pesquisa *Amazon Tall Tower Observatory* (ATTO) 27

5 Desenho esquemático do equipamento de amostragem - *SporeWatch Spore Sampler*. A bomba acoplada ao amostrador possui um fluxo de $10\,\mathrm{L\,min^{-1}}$, que promove a entrada de ar pelo orifício central. O *drum* possui uma rotação no sentido horário que pode ser regulada no painel eletrônico. Adaptado de Barbosa (2018). 28

6 Exemplo de dois grãos de pólen, após aplicação do corante preparado com fucsina. Ambos foram encontrados na campanha de amostragem da estação úmida. Fonte: A autora (2021). 29

7 Variáveis Meteorológicas medidas a 26 m do solo na Estação Seca em momentos pré, durante e pós nevoeiro. Fonte: A autora (2021). 33

8 Variáveis Meteorológicas medidas a 26m do solo na Estação Úmida em momentos pré, durante e pós nevoeiro. Fonte: A autora (2021). 34

9 Quantidade horária de Particulado Biogênico (PB) coletado durante as campanhas das estações a) seca e b) úmida. Fonte: A autora (2021). . . . 37

10 Padrão diário de Esporos coletados durante as campanhas das estações a) seca e b) úmida. Fonte: A autora (2021). 38

11 Esporos de fungos coletados durante a campanha das estações a) seca e b) úmida e dados de visibilidade de períodos respectivos. Ocorreram dois eventos de nevoeiro (vis $\leq 1000\,\mathrm{m}$), um para cada estação, registrados nos dias 20/08 e 21/03. Fonte: A autora (2021). 40
12 Quantificação de esporos pré, durante e pós-nevoeiro nas estações seca e úmida. Fonte: A autora (2021). 41
A.1 Variáveis Meteorológicas medidas a 26m do solo na Estação Seca. Fonte: A autora (2021). 48
A.2 Variáveis Meteorológicas medidas a 26m do solo na Estação Úmida. Fonte: A autora (2021). 49

LISTA DE TABELAS

1 Períodos de amostragem com respectiva duração em minutos, para cada campanha de amostragem. 27

2 Resumo das principais variáveis meteorológicas medidas na estação seca (26 m), considerando as variações diárias (min – max) de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento, a ocorrência de nevoeiro e a precipitação diária acumulada. 32

3 Resumo das principais variáveis meteorológicas medidas na estação úmida (26 m), considerando as variações diárias (min – max) de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento, a ocorrência de nevoeiro e a precipitação diária acumulada. 33

4 Resultados obtidos com a contagem diária de esporos e polens para ambas estações 35

LISTA DE SIGLAS E ABREVIAÇÕES

ATTO	*Amazon Tall Tower Observatory*
ES	Estação Seca
EU	Estação Úmida
FC	Fator de Correção
fog	Nevoeiro
$MP_{2,5}$	Material Particulado de diâmetro até 2,5 µm
NCN	Núcleo de Condensação de Nuvens
NCG	Núcleo de Condensação Gigante
PB	Partículas Biogênicas
PPT	Precipitação
Rad	Radiação Líquida
UR	Umidade Relativa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **12**

1.1 HIPÓTESES 13

1.2 OBJETIVOS 13

1.2.1 Objetivos gerais 13

1.2.2 Objetivos específicos 13

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **14**

2.1 AEROSSÓIS BIOGÊNICOS 14

2.1.1 Pólen 14

2.1.2 Esporos 16

2.1.3 Bioaerossóis na floresta amazônica 18

2.2 NÚCLEOS DE CONDENSAÇÃO DE NUVENS (NCN) 19

2.2.1 Bioaerossóis como núcleos de condensação de nuvens 20

2.3 NEVOEIRO 21

2.3.1 Formação e dissipação 22

2.3.2 Conteúdo do nevoeiro 23

2.3.3 Nevoeiro em Florestas 24

3 METODOLOGIA **26**

3.1 AMOSTRAGEM DE PARTICULADO BIOGÊNICO 26

3.1.1 Local de amostragem 26

3.1.2 Períodos de amostragem 26

3.1.3 Equipamento e substrato de amostragem 28

3.1.4 Análise de amostras 29

3.1.5 Identificação e contagem 29

3.2 DADOS METEOROLÓGICOS 30

3.3 DADOS DE NEVOEIRO 30

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO **31**

4.1 ANÁLISE METEOROLÓGICA 31

4.1.1 Estação Seca 31

4.1.2 Estação Úmida 32
4.2 BIOAEROSSÓIS 35
4.2.1 Pólen 35
4.2.2 Esporos 36
4.2.3 Nevoeiro e esporos 39

5 CONCLUSÃO **42**

Referências **43**

Apêndice **48**

A Variáveis Meteorológicas **48**

1 INTRODUÇÃO

A bacia amazônica, situada na região norte do Brasil, desempenha um papel importante nos ciclos da água e do carbono, assim como é responsável por características climáticas regionais, regimes de precipitação, química atmosférica e biodiversidade (Andreae et al., 2015; Nobre et al., 2009).

A floresta amazônica é caracterizada pelo clima equatorial chuvoso, com certa homogeneidade de temperatura, visto que recebe radiação solar intensa durante todo o ano. A forte sazonalidade de precipitação observada na região da floresta é responsável pela delimitação das estações seca (ES) e úmida (EU), bem como da transição entre elas. Além disso, esta sazonalidade impacta diretamente nas regiões tropical e subtropical da América do Sul, sendo que mais do que 50% da precipitação nestes locais ocorre devido ao transporte de umidade da floresta, conhecido popularmente como "rios voadores"(Nobre et al., 2009).

Dentre os diversos fenômenos meteorológicos que ocorrem na Amazônia, é comum verificar a ocorrência de nevoeiro (*fog*), principalmente durante a madrugada até pouco depois do nascer do sol (Andrade & Moura, 2011). O nevoeiro se trata de um fenômeno meteorológico que comporta-se de forma similar às nuvens, porém com a capacidade de interagir com a superfície do solo, assim como com partículas e compostos presentes em camadas inferiores da atmosfera, que atuam como núcleos de condensação de nuvens (NCN) e promovem seu desenvolvimento (Pérez-Díaz et al., 2017; Stull et al., 2018).

Aerossóis biogênicos, tais como bactérias, esporos de fungos e pólen desempenham um papel importante na atmosfera, podendo atuar como NCN e influenciar no balanço radiativo local, visto que possuem a capacidade de absorver e refletir radiação (Šantl-Temkiv et al., 2020).

Grãos de pólen e esporos são propágulos reprodutivos utilizados por plantas e fungos com o intuito de propagar sua espécie. Muitas plantas e fungos desenvolveram seu método reprodutivo com o uso do ar como polinizador, podendo ser chamados de anemófilos. Assim, já foram realizados diversos estudos comprovando a presença destas partículas biogênicas (PB) na atmosfera, o que, além de modificar processos atmosféricos, também possui potencial de causar impactos à saúde humana (Barbosa, 2018; Watkinson et al., 2015).

Atualmente pouco se sabe sobre como se dá o processo de formação do nevoeiro em

florestas densas, onde há a presença de aerossóis biogênicos em abundância. Além disso, poucos estudos se dedicaram a identificar a composição destes bioaerossóis em atmosfera, sendo que em nenhum deles foi quantificada sua abundância em meio ao dossel florestal.

1.1 HIPÓTESES

Estudos prévios (Bauer et al., 2010; Chen et al., 2021; Evans et al., 2019) sugerem que a ocorrência de eventos de nevoeiro pode promover o transporte de material biogênico e antrópico, atuantes como núcleos de condensação. Além disso, bioaerossóis (tais como grãos de pólen e esporos de fungos) são comprovadamente eficazes como núcleos de condensação de nuvens, permitindo, assim, que atuem como núcleos em eventos de nevoeiro.

Desta forma, considerando que a floresta amazônica é uma grande fonte de material particulado biogênico e que possui alta ocorrência de nevoeiro, se faz oportuna a investigação das seguintes hipóteses:

1. Mais bioaerossóis podem ser encontrados em atmosfera durante a estação seca.
2. A quantidade de esporos em atmosfera aumenta na ocorrência de nevoeiro

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos gerais

O presente estudo pretende identificar a composição dos aerossóis biogênicos em atmosfera; descrever padrões diurnos observados; verificar se existe maior quantidade de bioaerossóis em atmosfera durante a estação seca; e testar se na ocorrência de eventos de nevoeiro são registrados mais esporos de fungos.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Mostrar composição de polens e esporos suspensos;
2. Descrever padrão sazonal e diário observado para polens e esporos;
3. Avaliar se existem mais grãos de pólen em atmosfera durante a estação seca;
4. Testar se existem mais esporos de fungos em atmosfera durante a estação seca;
5. Verificar se em dias com nevoeiro são quantificados mais esporos de fungos;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AEROSSÓIS BIOGÊNICOS

Aerossóis podem ser classificados em primários ou secundários. Os primários são compostos orgânicos ou inorgânicos que possuem tamanhos geralmente maiores do que 1 µm, que podem ser emitidos diretamente por fontes antrópicas ou naturais. Aerossóis secundários são formados na atmosfera por nucleação de partículas ou pela condensação de vapores em particulado pré-existente, sendo que, de acordo com Ervens et al. (2011), uma fração considerável de aerossóis secundários se forma em nuvens.

A densidade e o tamanho do aerossol determinam seu tempo de residência na atmosfera, tal que, em geral, os menores e menos densos são mais suscetíveis a ficarem suspensos na atmosfera por mais tempo do que aerossóis maiores e mais densos. Tendo isso em vista, sabe-se que as partículas mais finas são propensas a transporte de longa distância na atmosfera e que podem alcançar regiões distantes da fonte (Barbosa, 2018; Löbs et al., 2020; Myhre et al., 2013).

Dentre as diversas tipologias de aerossóis, existe uma classe intitulada como "bioaerossóis", ou particulado biogênico, que compreende uma gama de partículas orgânicas primárias associadas e emitidas por organismos. Os bioaerossóis podem ser organismos vivos, tais como bactérias, vírus ou microalgas; propágulos reprodutivos (esporos de fungos e pólen); ou, ainda, fragmentos de animais, plantas ou microbiológicos (Deguillaume et al., 2008; Lacey & West, 2007).

Segundo Šantl-Temkiv et al. (2020), bioaerossóis desempenham um papel importante em processos atmosféricos e podem exercer efeitos diretos e indiretos no clima, tanto por absorção e reflexão de luz, quanto pela adsorção de vapor d'água. Porém, ainda é preciso quantificar as fontes de bioaerossóis e estudar a sua dispersão.

2.1.1 Pólen

Grãos de pólen são emitidos por vegetação terrestre com o intuito de dispersar material genético para reprodução. A sua produção ocorre nas anteras das flores de angiospermas ou nos estróbilos de gimnospermas, podendo ser dispersados pelo ar, no caso de plantas anemófilas, ou possuir mecanismos de atração de insetos, que ajudam em sua dispersão (Moore et al., 1991).

Figura 1: Exemplos da variedade de tamanhos e formatos dos grãos de pólen. Adaptado de Lacey e West (2007).

Dentre os diversos bioaerossóis, polens são geralmente os maiores, já que o tamanho dos grãos pode variar de 5 a 150 µm. Entretanto, a maior parte dos grãos de pólen encontrados na atmosfera possuem de 25 a 45 µm (Lacey & West, 2007). Além de sua grande variedade de tamanhos, existem diversos formatos de grãos, sendo que podem possuir forma esférica, alongada ou triangular (figura 1). O seu tamanho e formato determinam quanto tempo ficarão suspensos e, uma vez na atmosfera, podem atuar como NCN, visto que possuem, em sua maioria, uma superfície higroscópica, além de área superficial favorável para a condensação de vapores e formação de gotas de chuva, especialmente sob condições de baixa supersaturação de vapor d'água (Pope, 2010; Steiner et al., 2015).

É possível ainda que outras substâncias solúveis presentes na atmosfera sejam adsorvidas aos grãos de pólen, juntamente com o vapor d'água, modificando assim, sua dispersão e transporte, seu rompimento e até mesmo seu comportamento como NCN (Prisle et al., 2019).

Cada grão de pólen possui uma camada externa que protege o material genético

da planta, chamada exina. Quando esta se rompe, seu conteúdo é liberado, podendo causar uma reação alérgica em humanos, denominada polinose, que ocorre quando os antígenos (material alérgeno) de polens entram em contato com a mucosa do sistema respiratório (Dutra et al., 2001; Moore et al., 1991; Nunes & Ladeira, 2007).

Segundo Lacey e West (2007), a emissão de grãos de pólen pelas estruturas reprodutivas de plantas se dá de forma passiva e, para garantir que o pólen chegue no alvo desejado, plantas anemófilas produzem muito mais grãos do que aquelas que promovem a dispersão de pólen por meio de insetos. Conforme já constatado por Després et al. (2012), a dispersão de polens depende diretamente de variáveis meteorológicas, sendo que há uma correlação negativa com precipitação e positiva com temperatura, ventos e umidade relativa. A presença de pólen na atmosfera depende, ainda, da época de polinização das espécies produtoras (Barbosa, 2018; Pope, 2010; Steiner et al., 2015).

2.1.2 Esporos

Presente nos mais diversos ambientes naturais, o reino *Fungi* compreende uma vasta diversidade de cogumelos, bolores e líquens que exercem os mais variados serviços ecossistêmicos, podendo servir de alimento para animais, atuar na decomposição de matéria orgânica ou estabelecer associações com plantas (Stephenson, 2010).

Dentro de sua pluralidade, existem três filos de fungos que se reproduzem de forma sexuada pela produção de esporos: *Ascomicota*, *Basidiomicota* e *Zigomicota*, sendo que os dois primeiros são os que compreendem a maior quantidade de espécies (Watkinson et al., 2015). Para que haja dispersão, multiplicação e reprodução bem-sucedidas um único indivíduo tem a capacidade de liberar milhões de esporos, sendo que estudos já reportaram uma concentração de 10^4 a 10^5 m^{-3} de esporos na atmosfera da Amazônia (Elbert et al., 2007; Graham et al., 2003).

A produção de esporos ocorre geralmente de acordo com padrões sazonais, que variam de acordo com a espécie. Quando uma colônia de fungos se encontra em um local com abundância de nutrientes, os indivíduos investem em crescimento de suas hifas e ramificações, porém, quando os nutrientes se tornam escassos há maior produção de material reprodutivo, com o intuito de dispersar sua espécie em busca de uma nova fonte de nutrientes (Stephenson, 2010; Watkinson et al., 2015).

O tamanho e formato dos esporos de fungos são variados, podendo medir 3 µm

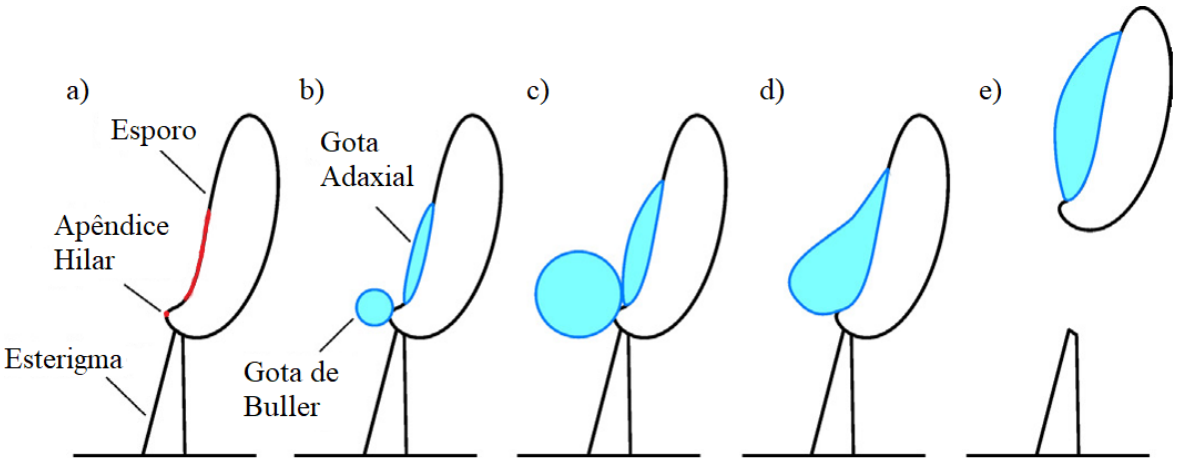


Figura 2: Ilustração do mecanismo de liberação de Basidiósporos. a) Esporo maduro e pronto para ser emitido. O manitol é secretado nas regiões em vermelho; b) Começo da formação das gotas de Buller e adaxial; c) Crescimento de ambas gotas; d) Coalescência das duas gotas e geração de momento; e) Liberação do Basidiósporo. Adaptado de Watkinson et al. (2015).

no caso de basidiósporos ou alcançar até 300 µm no caso de ascósporos de líquens. Os esporos estão sujeitos à rápida desidratação, portanto, a probabilidade de sucesso é maior em situações de UR alta (Watkinson et al., 2015).

No caso de fungos do filo *Basidiomicota*, a emissão de esporos depende diretamente da quantidade de vapor d'água em atmosfera, visto que depende de um mecanismo mecânico de liberação, ilustrado na figura 2. Primeiro, ocorre a secreção de manitol, um açúcar higroscópico que promove a condensação de vapor d'água (figura 2a), então, se inicia a formação de uma gota esférica na base do esporo, chamada gota de Buller, seguida da formação da gota adaxial, na superfície plana do esporo (figura 2b). As duas gotas crescem (figura 2c) até coalescerem e produzirem um desequilíbrio no centro de massa do esporo (figura 2d), gerando um momento que promove a sua liberação (figura 2e) a uma velocidade inicial de lançamento de até $1{,}8\,\mathrm{ms}^{-1}$. Todo esse processo de liberação ocorre em 10 µs (Buller, 1909; Hassett et al., 2015; Liu et al., 2017; Noblin et al., 2009; Watkinson et al., 2015).

A emissão de esporos também pode ocorrer por distúrbios causados por ventos ou gotas de chuva, podendo até mesmo serem liberados aglomerados de esporos. Sua concentração em determinado local depende da quantidade emitida pelos indivíduos, da velocidade do vento, da turbulência atmosférica, de correntes convectivas e da taxa de

sedimentação dos esporos (Stephenson, 2010; Watkinson et al., 2015).

A liberação de esporos geralmente os lança a uma curta distância, então para que ocorra dispersão de longa distância são necessários outros fatores meteorológicos e de circulação atmosférica. Experimentos demonstraram que até 95% dos esporos emitidos podem cair em um raio de 1 m do fungo-mãe, o que indica ser esta a razão da alta produção de esporos, visto que apenas uma pequena fração será dispersada para locais mais distantes (Watkinson et al., 2015).

Quando os esporos já estão em atmosfera, de acordo com Watkinson et al. (2015), em uma situação de ar estagnado a taxa de sedimentação varia entre 1 e 4 $\mathrm{mm\,s^{-1}}$ para esporos aproximadamente esféricos de tamanho entre 5 e 10 µm, podendo levar de 4 a 17 minutos para cair 1 m de altura.

Estudos já demostraram a grande quantidade de esporos presentes na atmosfera. Por exemplo, Womiloju et al. (2003) contabilizaram até 45% de esporos de fungos em toda a massa de particulado grosso (>1 µm) em uma região de floresta tropical e até 11% da massa de particulado fino (< 2,5 µm) em atmosferas urbanas e rurais. Os resultados da cidade de Mainz, na Alemanha, apresentados por Fröhlich-Nowoisky et al. (2009), indicaram presença de DNA fúngico em todas as amostras de ar, sendo que 64% de todas as espécies de fungos pertenciam ao filo *Basidiomicota* e 34% do filo *Ascomicota*. Ademais, Woo et al. (2018) analisou sequências genéticas de fungos depositados da atmosfera de Seul e constatou que mais de 99% foram de esporos dos filos *Ascomicota* e *Basidiomicota*, tal que houve maior abundância de ascósporos em deposição seca e de basidiósporos em deposição úmida, indicando que fungos destes filos possuem o ar como mecanismo de dispersão principal.

2.1.3 Bioaerossóis na floresta amazônica

A composição de aerossóis encontrados na atmosfera da Amazônia varia de acordo com o transporte de longa distância (e. g. poeira do Deserto do Sahara e sal marinho), com o padrão de emissão de plantas e fungos, com o regime de queimadas agrícolas e demais atividades antrópicas. Além disso, existe uma forte influência de fenômenos meteorológicos que promovem a remoção do particulado, como por exemplo a ocorrência de chuvas, que acontecem com maior intensidade durante a estação úmida da floresta, quando a concentração de particulado em atmosfera é reduzido (Barbosa, 2018; Costa &

Pauliquevis, 2009; Nogueira et al., 2021; Swap et al., 1992).

Barbosa (2018) realizou amostragens no mesmo sítio de pesquisa do presente trabalho, nas torres ATTO e *Instant Tower* entre os anos de 2015 e 2017. Suas medições foram realizadas com o impactador do tipo *Hirst* instalado acima da copa das árvores (40, 60, 80 e 300 m de altura), nas estações seca e chuvosa da floresta. Seus resultados indicaram que, dentre o particulado com tamanho até 15 µm, 95% eram esporos de fungos, sendo que sua maioria foi de ascósporos (41 – 62%) e basidiósporos (23 – 46%). Ainda, foi constatado que polens representam apenas uma fração pequena dentre todas as partículas suspensas na Amazônia, tal que as concentrações chegaram ao máximo de 2200 e 667 grãos por metro cúbico durante as estações seca e úmida da floresta (para medições realizadas a 60 m e 300 m de altura, respectivamente).

Löbs et al. (2020) apresentaram uma abordagem experimental para analisar e quantificar a emissão de esporos de fungos sob condições naturais e experimentais. Para quantificar a emissão de apenas um indivíduo do filo *Basidiomicota* foi realizada uma amostragem durante a estação seca da floresta amazônica, sob condições naturais. Os autores verificaram que a concentração de partículas maiores (entre 1 e 10 µm) aumentou a partir do momento em que houve aumento da umidade relativa e diminuição de temperatura e radiação incidente. A concentração máxima encontrada para estas partículas foi de $600\,\mathrm{cm}^{-3}$ durante a noite e de $0{,}8\,\mathrm{cm}^{-3}$ durante o dia, sugerindo que o padrão de emissão de esporos de fungos é noturno, quando as condições meteorológicas são favoráveis.

2.2 NÚCLEOS DE CONDENSAÇÃO DE NUVENS (NCN)

Núcleos de condensação de nuvens são partículas essenciais para a formação de gotas de chuva e nuvens em geral. São chamadas de NCN as partículas que podem ser ativadas para crescer em gotículas na presença de supersaturação de vapor d'água (Seinfeld & Pandis, 2008).

De acordo com Stull et al. (2018), existem dois mecanismos de nucleação, homogênea ou heterogênea. A nucleação homogênea é aquela que ocorre em ar limpo, quando moléculas de vapor d'água se aglomeram até que se forme uma gota, porém, por este mecanismo é quase impossível que se formem gotas naturalmente em atmosfera, visto que as pequenas gotículas formadas precisam de uma supersaturação muito alta para crescer antes de evaporar. Quando o vapor d'água condensa em partículas suspensas, ocorre

um processo denominado nucleação heterogênea, que exige menor supersaturação para ocorrer do que comparado à nucleação homogênea.

Gotas com tamanhos muito pequenos, tais como aquelas formadas em nucleação homogênea ou por núcleos de tamanho nanométrico, precisam de um ambiente com umidade relativa bem maior do que 100% para crescerem, então geralmente evaporam. Já as gotas formadas por núcleos micrométricos possuem maior potencial de crescimento. Para exemplificar, uma gota com raio de 0,1 µm necessita de uma UR maior que 101% para crescer, enquanto que tendo raio de 0,005 µm a UR necessária é de no mínimo 128%. Portanto, maiores núcleos de condensação podem se tornar gotas e crescer mais rápido do que menores NCNs (Stull et al., 2018).

Apesar de praticamente todos os processos de nucleação naturais serem heterogêneos, não são todas as partículas que podem atuar como núcleos de condensação. Para tanto o aerossol deve possuir uma superfície higroscópica, tamanho e formato específicos, ou ser solúvel em água. Além disso, as partículas precisam passar por um processo de ativação, que ocorre quando as condições ambientais são suficientes para que o vapor d'água condense sobre núcleo.

De acordo com Seinfeld e Pandis (2008), existe um valor denominado de supersaturação crítica, que determina em qual condição ocorrerá a ativação do núcleo. Esta supersaturação crítica é representada pela porcentagem de umidade acima de 100% que promoverá o crescimento da gotícula. Uma vez atingida a supersaturação crítica e enquanto houver vapor d'água suficiente, há crescimento da gotícula.

Partículas com diâmetro superior a 5 µm são consideradas núcleos de condensação gigantes (NCG) e representam uma pequena parcela do total de partículas capazes de serem ativadas a NCN. Os NCG possuem uma característica de possibilitarem sua ativação sob situações de baixíssima supersaturação (aproximadamente 0,02%) e, podem crescer antes da formação de gotículas por meio da absorção de água. Devido a sua grande área superficial, podem inibir a ativação de partículas menores (Pérez-Díaz et al., 2017).

2.2.1 Bioaerossóis como núcleos de condensação de nuvens

O estudo de Pope (2010) revelou que a camada externa dos grãos de pólen é higroscópica e que os grãos absorvem água para qualquer UR maior do que 0%, sendo que a absorção se dá de forma exponencial com o aumento da umidade relativa. Foi

constatado ainda que há um inchaço interno em ambientes com UR até 93%, devido à absorção d'água. Com o aumento da UR para além 95% observou-se acúmulo de água na superfície dos grãos, inicialmente em seus poros e após em toda a superfície. Segundo Pope (2010), grãos de pólen pequenos podem ser ativados à uma supersaturação de aproximadamente 0,002%, e para grãos maiores esta supersaturação crítica é ainda menor. Estas constatações indicam que grãos de pólen podem ser muito eficientes como núcleos de condensação gigantes. Entretanto, para situações de umidade relativa maior do que 85%, existe um aumento de massa nos grãos de pólen de, no mínimo, 25%, o que pode dificultar a permanência deste bioaerossol em atmosfera e promover sua sedimentação.

Woo et al. (2018) afirma que esporos maiores do que 2 µm e agregados de leveduras podem servir como NCN similarmente à grãos de pólen. Conforme Hassett et al. (2015), a liberação de esporos de cogumelos especificamente possui um efeito peculiar na condensação de vapor d'água, permitindo que atuem inclusive como catalisadores na formação de gotas de chuva e, consequentemente, contribuam para a ocorrência de chuvas. Basidiósporos, por exemplo, em seu processo de liberação secretam manitol, que possui propriedades higroscópicas, promovendo a condensação de moléculas de água na superfície do esporo.

Aglomerados podem crescer, caso exista umidade relativa acima de 100%. Por outro lado, se a umidade relativa for menor que 100%, ocorre evaporação da água adsorvida no esporo. É possível ainda que os esporos em atmosfera passem por esse processo de condensação e evaporação do vapor d'água por diversas vezes (Hassett et al., 2015).

2.3 NEVOEIRO

De acordo com Pérez-Díaz et al. (2017), a física de nevoeiros e nuvens é a mesma, porém o nevoeiro é definido como uma nuvem que toca o solo. Taylor (1917) afirma que o nevoeiro pode ser definido como uma condição na qual objetos a determinada distância estão escondidos por partículas no ar. Diversos autores afirmam que pode-se considerar a ocorrência de um evento de nevoeiro quando a visibilidade for menor do que 1 km, diferentemente da névoa, que é considerada para visibilidade entre 1 e 2 km (Chen et al., 2021; Pérez-Díaz et al., 2017).

Existem diversos tipos de nevoeiro, classificados de acordo com seu processo de formação, sendo os principais: nevoeiro de radiação, de advecção, frontal (ou de preci-

pitação) e orográfico (Stull et al., 2018). A existência do nevoeiro depende de fatores sinóticos, do relevo e da circulação atmosférica. O *fog* pode atuar na redução da amplitude térmica, na qualidade do ar, no balanço radiativo e na saúde humana (Pérez-Díaz et al., 2017).

Dificilmente ocorrerá a formação de nevoeiro em locais onde existe apenas vapor d'água, devido ao alto nível de supersaturação necessário para que haja condensação homogênea e pela improvável ausência de núcleos de condensação em atmosfera. Por outro lado, a presença de NCNs em atmosfera facilita a formação do *fog*, visto que é necessária menor supersaturação para a condensação de vapor d'água (Pérez-Díaz et al., 2017).

2.3.1 Formação e dissipação

Existem duas condições necessárias para a formação de nevoeiro: a velocidade do vento próximo à superfície do solo deve ser pequena e o ar deve estar mais frio próximo à superfície do que em camadas superiores (Taylor, 1917).

O nevoeiro de radiação, objeto do presente estudo, se forma devido ao resfriamento radiativo da superfície terrestre durante a noite. Sua formação ocorre especialmente em noites calmas e limpas, quando a temperatura da superfície se iguala à temperatura de ponto de orvalho, desde que o solo esteja úmido. Quando estas condições são atendidas se inicia a formação do nevoeiro, que começa a ficar mais espesso à medida que a quantidade de água liquida aumenta, e, consequentemente, ocorre a diminuição da visibilidade (Pérez-Díaz et al., 2017).

De acordo com Stull et al. (2018), inicialmente a densidade do nevoeiro é maior próxima ao solo, onde a temperatura é menor, e diminui com a altura (figura 3a). Conforme sua formação evolui, o nevoeiro fica cada vez mais denso, impossibilitando a perda de calor do solo. Assim, começa a ocorrer maior resfriamento na camada superior do *fog*, tornando-o mais denso em sua camada superior e forçando circulações convectivas que promovem a mistura de toda a camada de nevoeiro (figura 3b). Com a perda de calor contínua, a camada de *fog* segue aumentando, atingindo alturas cada vez maiores.

Com o nascer do sol e a chegada de radiação à superfície terrestre, há uma desestabilização da camada de nevoeiro, promovendo constante mistura por convecção. Quando a radiação solar é suficiente para esquentar a superfície do solo, inicia-se a dissipação do

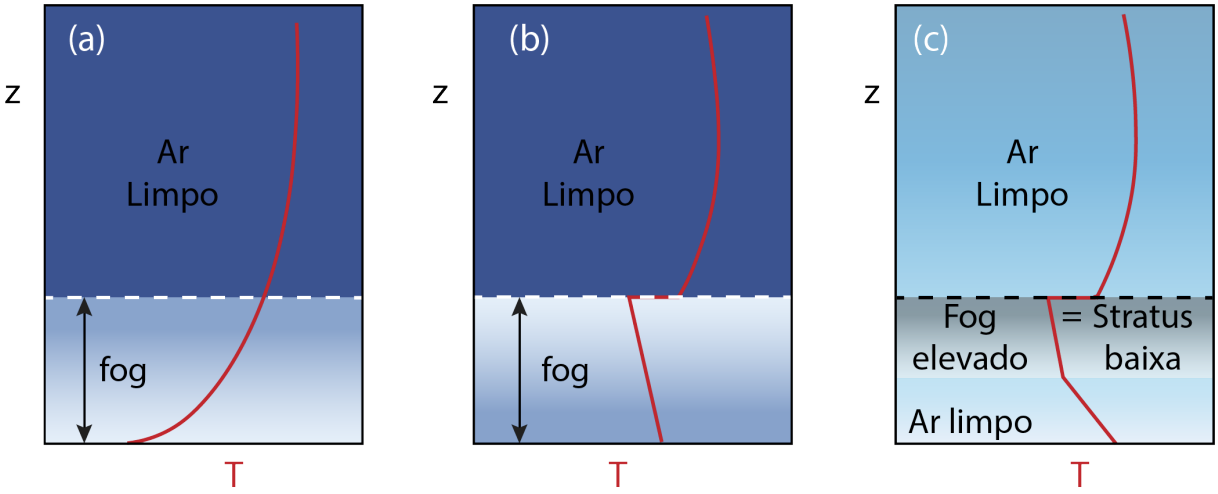


Figura 3: Ilustração da evolução vertical do nevoeiro. a) Começo da formação, o nevoeiro é mais denso próximo ao solo; b) A diferença de temperatura promove convecção na camada de *fog*, deixando a camada superior mais densa; c) Com o nascer do sol, começa a evaporação da camada mais inferior de nevoeiro, restando uma camada acima que se iguala à uma nuvem stratus de baixa altitude. Adaptado de Stull et al. (2018).

nevoeiro, com a evaporação da camada mais próxima ao solo, levando ao entendimento de que o nevoeiro está subindo, quando na verdade se comporta tal como uma nuvem stratus de baixa altitude (figura 3c). O nevoeiro continua evaporando de baixo para cima conforme a radiação incidente aumenta, até se dissipar por inteiro. Em algumas localidades pode acontecer de não haver radiação suficiente durante o dia para evaporar toda a quantidade de água (Stull et al., 2018).

2.3.2 Conteúdo do nevoeiro

Como afirmado por diversos autores (Huunová et al., 2021; Pérez-Díaz et al., 2017; Pöhlker et al., 2018; Stull et al., 2018) é necessária a presença de NCNs para coalescência de vapor d'água e consequente formação do nevoeiro. Segundo Boutle et al. (2018), conforme aumenta-se a concentração de aerossóis, mais denso o nevoeiro se torna, dificultando sua dissipação pela radiação solar. Assim, existem na literatura alguns estudos acerca da composição do nevoeiro em diversos ambientes.

Evans et al. (2019) encontrou a presença de comunidades microbiológicas com maior diversidade alpha em eventos de nevoeiro do que comparado a situações sem nevoeiro, para amostragens realizadas nas regiões costais da Namíbia e do Maine. Além disso, meios de cultura que foram expostos ao nevoeiro tiveram quase o triplo de crescimento e o dobro de riqueza microbiológicos do que os meios expostos a condições de ar limpo

anterior à eventos de nevoeiro, mesmo tendo ficado expostos por mais tempo (3 e 6 horas respectivamente). Foi concluído pelos autores que o nevoeiro não serve apenas como refúgio para bioaerossóis, como também se mostrou um efetivo mecanismo de transporte microbiano, capaz de conectar os ecossistemas terrestre e marinho. Ainda, foi levantada a possibilidade de que o nevoeiro funcione como um vetor de microbiota marinha para sistemas terrestres, além de promover a deposição de bioaerossóis, o que possivelmente não aconteceria na ausência de nevoeiro ou outras formas de precipitação.

Chen et al. (2021) comprovou a presença de compostos antropogênicos no nevoeiro sobre uma floresta do Taiwan, com o estudo de condições durante, antes e depois de eventos de nevoeiro, bem como em sua ausência. Os autores indicaram o aumento da formação de aerossóis secundários que necessitam de meio aquoso para reagir, tal como a dissolução de compostos como o ácido nítrico (HNO_3) e dióxido de enxofre (SO_2). Estes compostos são resultantes do transporte de poluentes atmosféricos pela combinação de brisas oceânicas e de vale. A concentração encontrada de $MP_{2,5}$ foi quase o triplo durante eventos de nevoeiro, sendo que também foi observado aumento na concentração de compostos orgânicos, NO_3, SO_4, NH_4 e HCl. Houve ainda a estimativa da eficiência de remoção de compostos pelo nevoeiro, sendo que foi comprovada a remoção de NO_3, de compostos orgânicos e de partículas maiores do que 700 nm (que apresentou maior remoção), enquanto partículas de tamanho entre 100 nm e 700 nm continuaram crescendo por condensação.

2.3.3 Nevoeiro em Florestas

De acordo com Huunová et al. (2021), o nevoeiro sofre uma influência significativa de florestas em seu comportamento, mesmo em regiões onde a floresta não é o uso predominante do solo. Houve diferença entre florestas latifoliadas e de coníferas na ocorrência de nevoeiro e os fatores de influência elencados foram a evapotranspiração e a emissão de precursores formadores de núcleos de condensação, além de funcionarem como "barragens de vento", permitindo a formação de nevoeiro e retardando sua dissipação. Além disso, a sazonalidade e altitude local também apresentaram, em seu estudo, influência significativa, inclusive maior do que a exercida pela presença de florestas.

Especificamente na floresta amazônica, o nevoeiro é mais comumente presente durante a estação úmida, apesar de não ser ausente durante a estação seca. Foi sugerido

que o *fog* é um forte regulador do clima amazônico e sua presença acima da copa da floresta aumenta o albedo, consequentemente reduzindo a evapotranspiração antes da completa dissipação do nevoeiro (Anber et al., 2015).

3 METODOLOGIA

3.1 AMOSTRAGEM DE PARTICULADO BIOGÊNICO

3.1.1 Local de amostragem

Na região central da floresta amazônica, aproximadamente a 150 km da cidade de Manaus, foi delimitada uma Reserva de Desenvolvimento Sustentável, onde foi estabelecida uma Estação Científica, para fins de pesquisa. O projeto ATTO (*Amazon Tall Tower Observatory*, figura 4), desenvolvido na região em questão, conta com três torres, sendo duas de 80 metros (*Instant Tower* e *Triangular Mast*) e uma de 326 metros (torre ATTO).

A região em questão é considerada singular, visto que se trata de uma localidade onde as condições são naturais e minimamente impactadas pelo ser humano. As atividades de pesquisa desenvolvidas neste sítio são diversas e envolvem o estudo de variáveis meteorológicas, gases traço, biodiversidade, entre outras (Andreae et al., 2015). Maiores informações podem ser encontradas em www.attoproject.org.

Com o intuito de identificar uma relação entre aerossóis biogênicos e a ocorrência de eventos de nevoeiro, bem como demais variáveis meteorológicas, foram feitas duas campanhas de amostragem de bioaerossóis, uma durante a estação seca e outra durante a estação úmida, possibilitando o estudo sazonal. As amostragens foram realizadas na *Instant Tower* (2° 8,647' S 58° 59,992' O), uma das torres de 80 m do projeto ATTO. Em ambas campanhas o amostrador de aerossóis biogênicos foi instalado em meio ao dossel florestal, a 26 m do solo, com um braço metálico que permitia a rotação do amostrador na direção do vento.

3.1.2 Períodos de amostragem

A campanha de amostragem da estação seca foi realizada no mês de agosto de 2018, enquanto a campanha da estação úmida se deu no mês de março de 2019. Para mais detalhes, os períodos de amostragem foram expostos na tabela 1. Ressalta-se que nos dias 21, 22 e 23 de março não foram amostrados 1440 minutos completos devido à troca do substrato de amostragem durante o dia.

Figura 4: Localização do Sítio de Pesquisa *Amazon Tall Tower Observatory* (ATTO)

Tabela 1: Períodos de amostragem com respectiva duração em minutos, para cada campanha de amostragem.

Estação	Data	Período Amostrado (Hora local)	Tempo total (min)
Seca	19/08/2018	09:57 - 23:59	840
	20/08/2018	00:00 - 23:59	1440
	21/08/2018	00:00 - 17:08	1028
	22/08/2018	05:05 - 18:49	824
	24/08/2018	05:26 - 19:10	824
	25/08/2018	05:01 - 19:45	884
Úmida	20/03/2019	09:10 - 23:59	890
	21/03/2019	00:00 - 23:59	1413
	22/03/2019	00:00 - 23:59	1435
	23/03/2019	00:00 - 23:59	1439
	24/03/2019	00:00 - 05:52	352

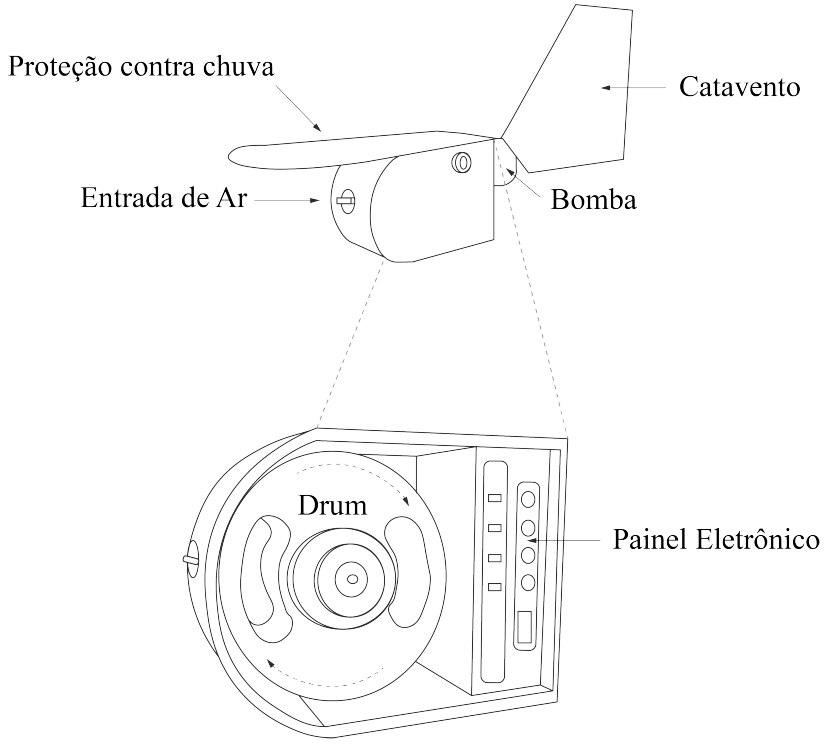


Figura 5: Desenho esquemático do equipamento de amostragem - *SporeWatch Spore Sampler*. A bomba acoplada ao amostrador possui um fluxo de $10\,\mathrm{Lmin}^{-1}$, que promove a entrada de ar pelo orifício central. O *drum* possui uma rotação no sentido horário que pode ser regulada no painel eletrônico. Adaptado de Barbosa (2018).

3.1.3 Equipamento e substrato de amostragem

Para que os grãos de pólen e esporos presentes no ar pudessem ser analisados posteriormente à amostragem, foi utilizada uma fita do tipo Melinex, com um adesivo translúcido aderido. A preparação do adesivo foi feita com alta concentração de fenol (0,5%), para evitar que houvesse a proliferação de bactérias e fungos, assim, ao impactar no adesivo, a partícula permanece fixada e inerte (Barbosa, 2018).

A fita com o substrato foi fixada à um tambor metálico (*drum*), o qual é inserido no interior de um captador volumétrico *Burkard* do tipo *Hirst*, *SporeWatch Spore Sampler* (figura 5), que foi utilizado em ambas amostragens. Este equipamento consiste em um impactador acoplado à uma bomba, o qual permite a entrada de material particulado por um orifício de $2\,\mathrm{mm} \times 14\,\mathrm{mm}$. A bomba utilizada nas amostragens possui um fluxo de ar de $10\,\mathrm{Lmin}^{-1}$. O *drum* rotaciona com uma velocidade de $14\,\mathrm{mmh}^{-1}$, no sentido horário, tal como ilustrado na figura 5, permitindo que se saiba o horário aproximado de impactação das partículas (Barbosa, 2018; Lacey & West, 2007).

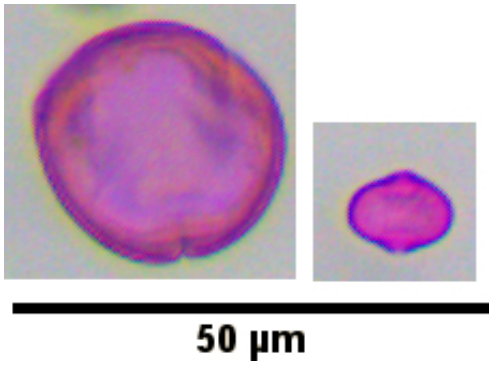


Figura 6: Exemplo de dois grãos de pólen, após aplicação do corante preparado com fucsina. Ambos foram encontrados na campanha de amostragem da estação úmida. Fonte: A autora (2021).

3.1.4 Análise de amostras

Após o final de cada campanha de amostragem, a fita de cada tambor foi dividida em seções de 48 mm e cada pedaço foi colocado em lâmina específica para visualização em microscópio ótico. Visando facilitar a identificação de grãos de pólen microscopicamente, foi utilizado um corante preparado com fucsina — substância que interage com o polímero presente na camada externa dos grãos de pólen, deixando-os com aparência rosada (figura 6, Barbosa, 2018; Camargo et al., 2021).

Todas as lâminas montadas com o material amostrado foram varridas longitudinalmente no microscópio ótico Nikon Eclipse E200, com aumento de 400 vezes (aumento de 10x da ocular e de 40x da objetiva). A varredura foi feita com a captura de imagens de todo o comprimento longitudinal da lâmina. Para este fim foi utilizada a câmera digital ToupCam, acoplada ao microscópio por um fototubo.

3.1.5 Identificação e contagem

Subsequente à captura de imagens no microscópio, foi feito seu processamento com o uso do software *Image*J. As imagens foram analisadas uma a uma, com o recorte e a contagem das partículas de interesse (grãos de pólen e esporos de fungos). As análises foram feitas considerando o número de esporos e grãos de pólen para um intervalo fixo de uma hora.

3.2 DADOS METEOROLÓGICOS

O complexo de torres do sítio de pesquisa possui sensores de variáveis meteorológicas instalados em todas as torres. Para fins deste estudo, serão utilizados dados de umidade relativa, temperatura (medidas com os sensores Vaisala HMP45C e Rotronic CS215), precipitação, velocidade e direção do vento (Gill WindSonic e Eddy Covariance System). Existem sensores em diversas alturas da *Instant Tower* para todas as variáveis mencionadas, exceto de precipitação (cuja altura do sensor TB4 é de 81 m), porém serão utilizados os dados de mesma altura do amostrador *Burkard* (26 m).

Todos os sensores meteorológicos são mantidos e calibrados pelo Grupo de Micrometeorologia do projeto LBA (INPA), o qual forneceu os dados para este trabalho.

3.3 DADOS DE NEVOEIRO

Os dados de nevoeiro utilizados foram fornecidos pelo Instituto de Química do Max Plank (Alemanha), parceiro do projeto ATTO. O equipamento utilizado para a medição é um sensor óptico, denominado OFS (*Optical Fog Sensor*, Eigenbrodt GmbH & Co.), que mede a visibilidade múltiplas vezes por minuto, baseado na emissão de um laser que recebe um sinal caso seja detectada a reflexão de partículas no ar, mais especificamente gotículas de água, presentes em nevoeiros. São feitas medições contínuas e posteriormente é calculada a média por minuto. A visibilidade máxima do equipamento é de 5000 m e, segundo o proposto por Pérez-Díaz et al. (2017) e Chen et al. (2021), foram considerados eventos de nevoeiro as situações de visibilidade menores do que 1 km, que tiveram duração maior do que 5 minutos (para evitar a contabilização de ruídos). Ainda, o sensor possui um sistema que reconhece e registra quando ocorre qualquer redução de sensibilidade, indicativo utilizado como filtragem de dados válidos.

Cabe comentar que entre as campanhas de amostragem das estações seca e úmida houve mudança da localização do OFS, sendo que durante a primeira amostragem o sensor estava instalado a 50m no *Triangular mast* e posteriormente foi posicionado a 43 m de altura na torre ATTO.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE METEOROLÓGICA

De acordo com Barbosa (2018), a sazonalidade da floresta amazônica é delimitada principalmente de acordo com a quantidade de chuvas e atividade convectiva. O padrão meteorológico da floresta amazônica pode ser observado durante as duas campanhas de amostragem.

Durante o dia a radiação incidente chega a quase 1170 W/m^2, com aumento da temperatura, que ultrapassa 30 °C. Após o pôr do Sol, a temperatura cai e a umidade relativa aumenta, podendo chegar a 100% durante a noite. A radiação líquida se torna negativa, indicando a perda de calor da superfície terrestre. A temperatura mínima ocorre logo antes do nascer do sol, o qual promove o aquecimento da atmosfera e da superfície, levando à redução da UR.

4.1.1 Estação Seca

Os principais dados meteorológicos foram resumidos e estão apresentados na tabela 2. Mais detalhes acerca destas variáveis são apresentados na figura A.1, no apêndice A.

Durante os dias de amostragem para esta estação a temperatura variou entre 22 e 34 °C, sendo que a amplitude média observada nos dias amostrados foi de 9,9 °C. O dia 25 apresentou 10,9 °C de amplitude térmica, a maior registrada entre as duas estações.

Especificamente no ponto de amostragem (26 m), entre a copa das árvores, nota-se que a velocidade do vento é geralmente baixa, variando entre 0 e 3,4 ms^{-1}.

A umidade relativa variou entre 50 e 100%, sendo que os momentos mais secos do dia ocorreram entre 12:00 e 15:30 e os mais úmidos durante a noite, antes do nascer do Sol. Dia 21/08 foi o mais quente e seco desta campanha de amostragem, com temperatura máxima de 33,58 °C e UR mínima de 51,67%.

Durante a estação seca, a UR foi maior do que 85% em 44% do tempo e igual a 100% em 19% tempo. Entre os dias 19 e 20 de agosto a UR se manteve igual a 100% por 12 horas seguidas, desde 19:41 até 07:41, sem ocorrência de chuva, em comparação, nos dias seguintes não houve eventos de UR=100% com tal duração.

Nota-se que o dia mais úmido nesta estação foi 19/08, com UR variando entre

Tabela 2: Resumo das principais variáveis meteorológicas medidas na estação seca (26 m), considerando as variações diárias (min – max) de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento, a ocorrência de nevoeiro e a precipitação diária acumulada.

Data	T (°C)	UR (%)	Vel. vento (m/s)	PPT (mm)	Nevoeiro
19/08	24,52 – 31,89	64,36 – 100	0 – 3,14	0,00	Não
20/08	22,99 – 32,49	57,05 – 100	0 – 3,38	0,00	Sim
21/08	23,06 – 33,58	51,67 – 100	0 – 3,14	0,00	Não
22/08	22,91 – 32,87	59,75 – 100	0 – 2,51	0,00	Não
24/08	21,82 – 32,69	58,59 – 100	0 – 1,95	0,00	Não
25/08	22,56 – 33,47	52,74 – 100	0,1 – 2,68	0,00	Não

64,36 e 100%. Após este dia de maior umidade houve a formação de nevoeiro (figura 7), com duração de cerca de 90 minutos (05:04 – 06:34) e chegando à visibilidade mínima de 251 m exatamente no momento central do evento (05:49).

Durante o evento de nevoeiro desta estação a umidade ficou estável em 100%, com um leve aumento de temperatura ($\approx 0{,}1\,°C$) no início da formação do *fog*, a qual continuou a diminuir em seguida. Percebe-se que a sua dissipação inicia com o aumento da radiação incidente, ou mais especificamente, quando a radiação líquida se torna positiva. Momentos após a completa dissipação do nevoeiro percebe-se a queda da umidade relativa e aumento da temperatura do ar (figrua 7).

4.1.2 Estação Úmida

Os dados meteorológicos referentes à estação úmida encontram-se resumidos na tabela 3, com detalhamento na figura A.2, apêndice A.

Durante a estação úmida, a temperatura variou entre 23 e 33 graus sendo que as maiores temperaturas ocorreram entre 14:00 e 15:00. Percebe-se que a diferença de temperatura entre as duas estações não é muito pronunciada, porém, a amplitude é levemente maior durante a estação seca, tal que nos dias 24 e 25/03 houve uma amplitude de 10,9 °C, enquanto a amplitude média observada na EU foi de 8,5 °C.

A umidade relativa variou entre 65 e 100% nesta estação, sendo que foi verificado que em 62% do tempo a UR foi maior do que 85%, e em 45% do tempo foi igual a 100%.

Foi registrada precipitação de 1,27mm e 0,51mm nos dias 20 e 23/03, respectiva-

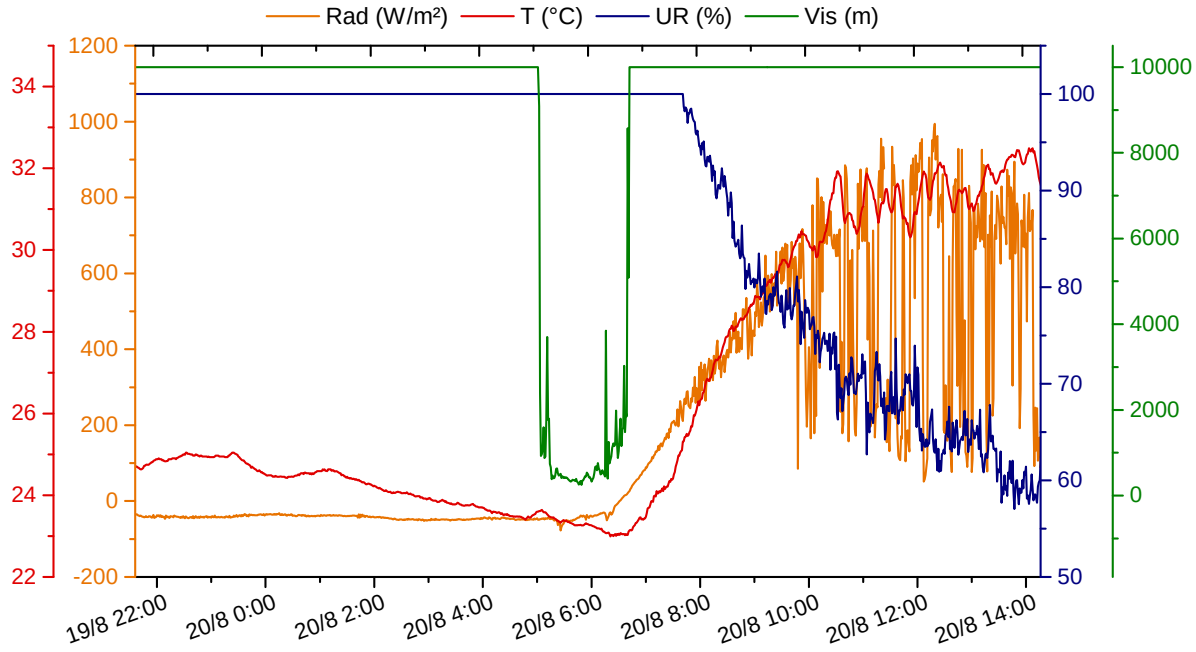


Figura 7: Variáveis Meteorológicas medidas a 26 m do solo na Estação Seca em momentos pré, durante e pós nevoeiro. Fonte: A autora (2021).

mente, sendo que no dia seguinte ao de maior precipitação houve a formação de nevoeiro, o único evento registrado durante a amostragem da EU.

Devido à necessidade de manutenção do equipamento, não foram registrados dados a respeito da velocidade e da direção do vento nos dias 20, 21, 22 e parte do dia 23 de março, sendo que o equipamento voltou a operar normalmente a partir de 15h03. Porém, com os dados disponíveis, observa-se que houve velocidade máxima de 3,71 ms^{-1} no dia 23, pouco antes da precipitação.

Tabela 3: Resumo das principais variáveis meteorológicas medidas na estação úmida (26 m), considerando as variações diárias (min – max) de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento, a ocorrência de nevoeiro e a precipitação diária acumulada.

Data	T (°C)	UR (%)	Vel. Vento (m/s)	PPT (mm)	Nevoeiro
20/03	23,89 – 32,11	69,52 – 100	0,18 – 1,67	1,27	Não
21/03	23,61 – 31,70	70,79 – 100	—	0,00	Sim
22/03	23,64 – 32,40	65,20 – 100	—	0,00	Não
23/03	23,95 – 32,73	65,72 – 100	0,02 – 3,71	0,51	Não
24/03	23,69 – 24,24	100 – 100	0,01 – 0,83	0,00	Não

O evento de nevoeiro registrado na EU ocorreu no dia 21/03 entre 04:02 e 05:07, com visibilidade mínima de 533 m. Este evento teve menor duração e intensidade do que o observado durante a ES, além de ter ocorrido mais cedo.

Além disso, como pode-se perceber na figura 8, houve outro momento de visibilidade reduzida, entre 06:05 e 06:39, porém a visibilidade mínima deste evento chegou apenas a 1310 m, não sendo caracterizado como nevoeiro, visto que o limiar definido para este trabalho é de visibilidade $\leq$ 1000 m. Este evento de névoa densa, porém, não pode ser desprezado, visto que também se trata de um momento com grande quantia de vapor d'água na atmosfera. Não foi registrado nenhum evento de névoa densa durante a estação seca.

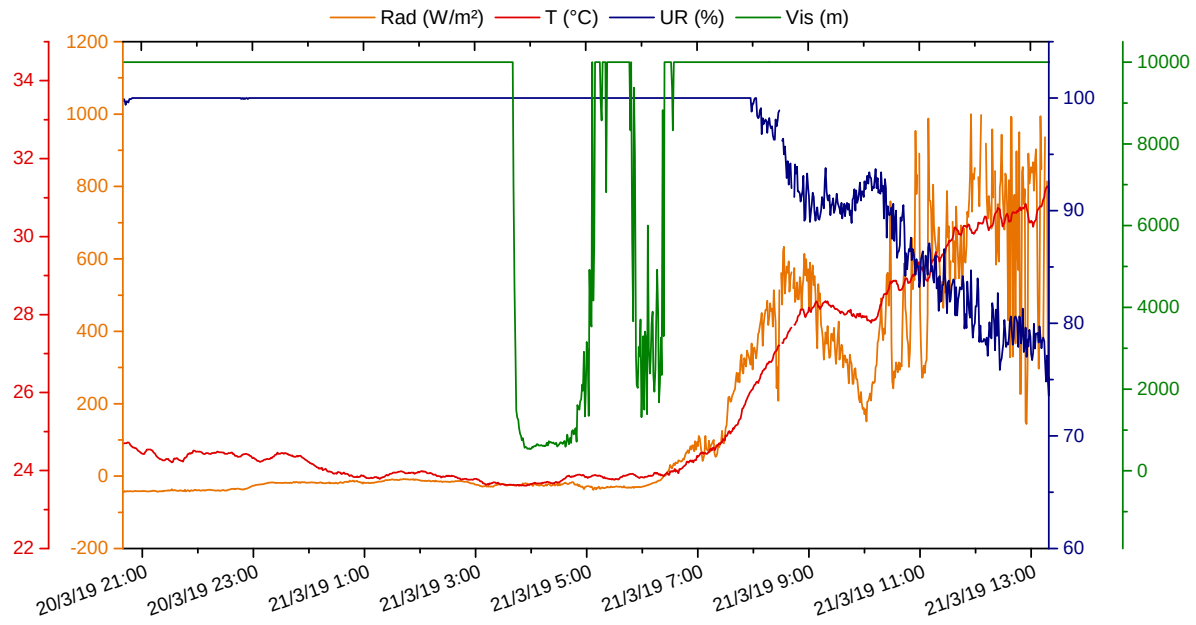


Figura 8: Variáveis Meteorológicas medidas a 26m do solo na Estação Úmida em momentos pré, durante e pós nevoeiro. Fonte: A autora (2021).

Na madrugada em que foi registrado o evento de nevoeiro, entre os dias 20 e 21, a UR se manteve igual a 100% continuamente entre 18:06 e 08:03. Ou seja, durante toda sua formação e dissipação a UR permaneceu em 100%. Analisando as demais variáveis meteorológicas, se percebeu que o nevoeiro começou a se formar quando a temperatura chegou em seu valor mínimo (23,61 °C).

4.2 BIOAEROSSÓIS

Com o intuito de analisar a composição de particulado biogênico suspenso, foram considerados grãos de pólen e esporos de fungos, sem incluir fragmentos de plantas na análise. Para fins de diferenciação das partículas, foram considerados parâmetros como forma, estruturas, tamanho e coloração por fucsina. Como base também foi utilizado o inventário de partículas biológicas de Barbosa (2018). Os resultados encontram-se na tabela 4 e nas figuras 9 e 10.

Tabela 4: Resultados obtidos com a contagem diária de esporos e polens para ambas estações

Estação	Data	Esporos (un)	Polen (un)
Seca	19/08/2018	285	4
	20/08/2018	470	8
	21/08/2018	188	3
	22/08/2018	104	3
	24/08/2018	147	11
	25/08/2018	60	3
Úmida	20/03/2019	257	0
	21/03/2019	606	0
	22/03/2019	594	1
	23/03/2019	879	1
	24/03/2019	192	0

4.2.1 Pólen

Os marcadores acima das colunas na figura 9 indicam a quantidade de grãos de pólen coletados naquele intervalo.

No total foram encontrados 32 polens durante a estação seca e 2 polens na estação úmida. A maior quantidade de polens registrada ocorreu no dia 24 de agosto de 2018,

durante a estação seca, quando foram coletados 11 grãos de pólen (tabela 4) em cerca de 13 horas de amostragem.

Barbosa (2018) encontrou a maior quantidade de grãos de pólen a 60 m do solo, no mesmo sítio de amostragem, sendo que foram contabilizados 3519 polens em 3 meses de amostragem, também durante a estação seca (setembro e outubro) e parte da transição entre estações (novembro). Também foi percebido pela autora que durante a estação úmida haviam menos polens em atmosfera.

Os grãos de pólen são considerados aerossóis gigantes, e, consequentemente, apresentam naturalmente curtos tempos de residência na atmosfera quando comparados a aerossóis menores.

Durante a estação úmida houve o registro de UR $\geq$ 85% em 45% do tempo, e, segundo Pope (2010), em uma atmosfera com UR maior que 85%, a massa de grãos de pólen aumenta no mínimo 25%, sendo que para UR $\geq$ 95% é comum a formação de gotículas nos poros dos grãos. Portanto, entende-se que, durante a estação úmida, em 45% do tempo os grãos de pólen sofreram aumento de massa de 25%, no mínimo, dificultando sua chegada em níveis superiores da atmosfera, favorecendo sua deposição e justificando a diferença observada entre as duas estações.

4.2.2 Esporos

Os resultados diários obtidos para a contagem de esporos estão apresentados na tabela 4. Durante a ES a maior quantidade de esporos coletada foi no dia 20/08 (470 unidades), já durante a EU ocorreu no dia 23/03 (879 unidades).

Na figura 9 pode-se observar que a quantidade de esporos amostrada é muito maior do que a de grãos de pólen, justamente devido à quantidade emitida e tamanho dos grãos. Além disso, percebe-se que durante a EU foram coletados mais esporos do que na ES, sendo que o maior pico encontrado na ES, na madrugada do dia 20/08, chega a apenas 67 esporos, enquanto o maior pico da EU ultrapassa 100 unidades, reforçando o importante papel da umidade na liberação dos esporos.

Conforme os resultados de Löbs et al. (2020), o padrão de emissão de esporos de fungos é noturno, e, durante a amostragem da estação seca não houve medições noturnas diariamente, não havendo registros completos dos momentos de maior emissão de esporos, o que justifica a menor quantidade de esporos coletados na estação seca frente à úmida.

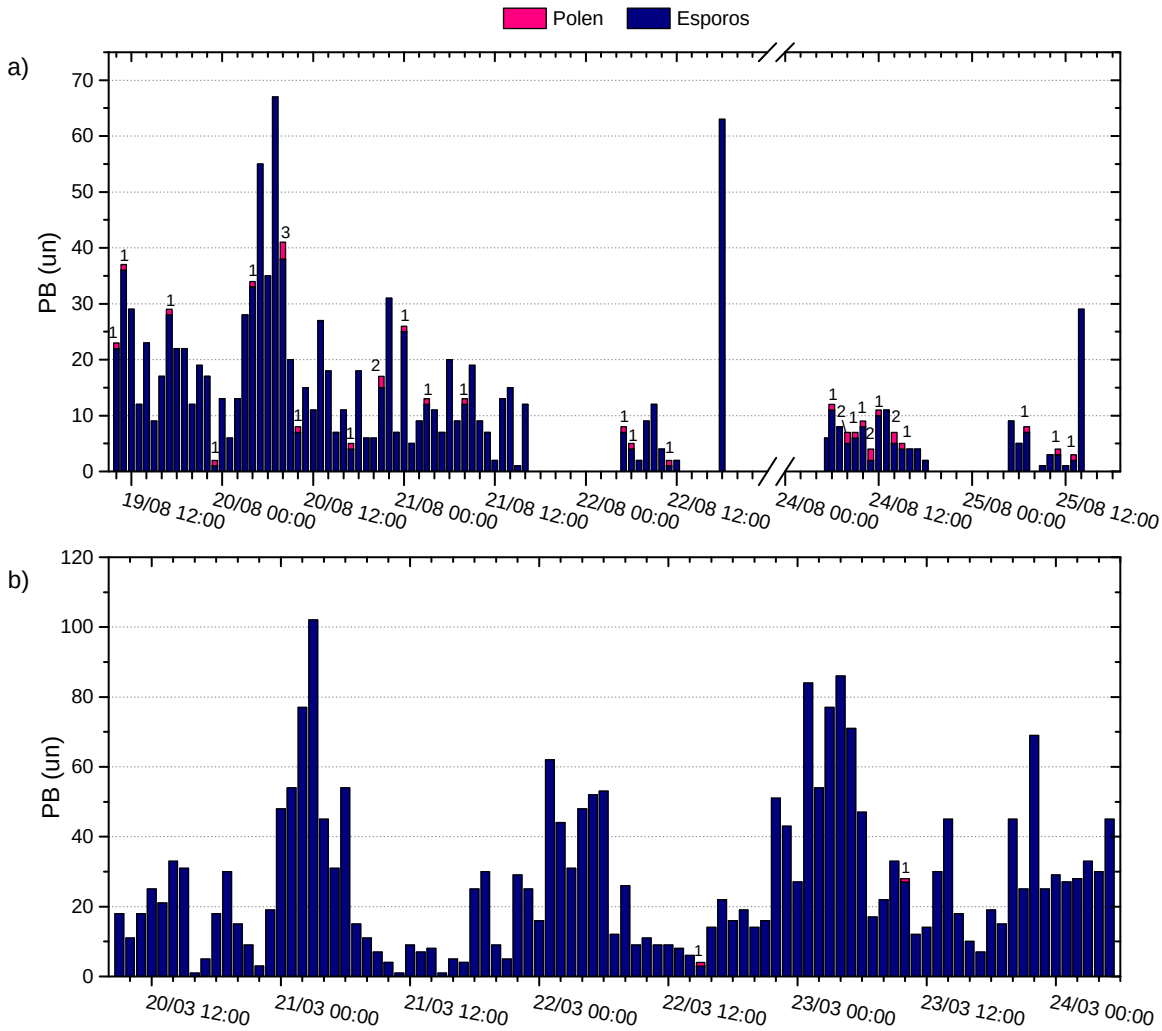


Figura 9: Quantidade horária de Particulado Biogênico (PB) coletado durante as campanhas das estações a) seca e b) úmida. Fonte: A autora (2021).

Entretanto, ao se comparar os dados diurnos (06:00 – 18:00), cujos dados estão completos para ambas estações, observa-se que a magnitude é maior durante a estação seca (figura 10).

Apesar de durante a estação úmida haver maior umidade relativa, em geral, favorecendo a emissão dos esporos, também existe uma sedimentação mais rápida dos esporos, causada pela adsorção de gotículas de água.

O padrão de esporos observado durante a estação seca está representado na figura 10a, sendo que se pode perceber que nos dias em que não houve amostragem noturna foram os que apresentaram menor quantidade de esporos (vide tabela 4).

Apesar das medições descontínuas durante a ES, com os dados do dia 20/08 observa-se que a quantidade de esporos começa a aumentar gradativamente após 00:00,

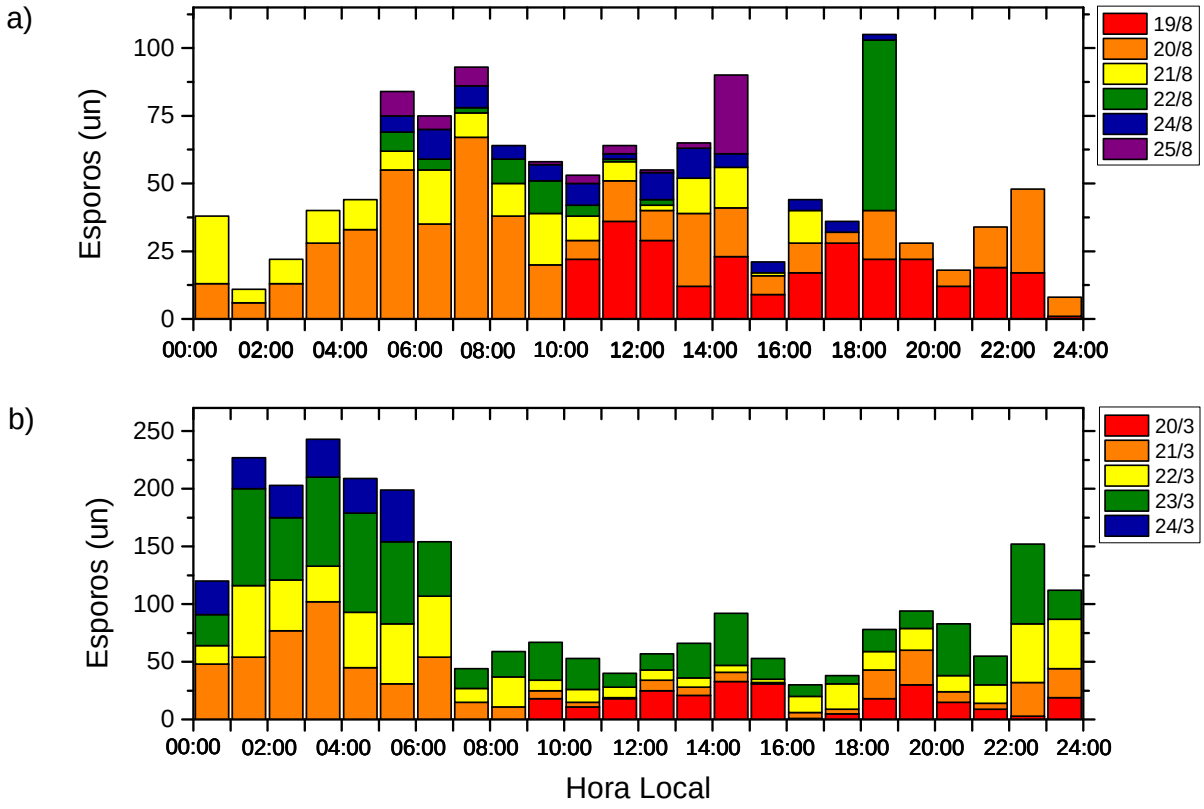


Figura 10: Padrão diário de Esporos coletados durante as campanhas das estações a) seca e b) úmida. Fonte: A autora (2021).

chegando à 67 unidades, a maior quantidade registrada para esta estação, entre 07:00 e 08:00, decaindo logo em seguida. É perceptível que a quantidade de esporos coletada no dia 20/8 entre 04:00 e 09:00 foi maior que nos outros dias, porém não se pode comparar diretamente com os outros dias que não foram amostrados continuamente.

Além disso, durante a ES foi observado um pico de 63 esporos entre 18:00 e 19:00, o que não ocorreu durante a EU, que apresentou menos de 50 unidades para todos os dias, neste mesmo horário.

É possível perceber na figura 10b que na EU a maior quantidade de esporos é geralmente coletada entre 22:00 e 06:00, com súbito decaimento a partir de 7:00. Este padrão indica certa sincronia com as variáveis de umidade relativa e radiação.

Conforme a figura 10, se nota que durante a EU, a quantidade de esporos começa a aumentar por volta das 20:00, atingindo seu pico entre 01:00 e 04:00 e com consequente decaída. Já durante a ES, o pico de esporos parece acontecer mais tardiamente, visto que a umidade relativa demora mais para chegar a 100%.

De acordo com estes resultados de esporos e considerando o já apresentado na

seção 4.1, entende-se que o padrão de dispersão dos esporos de fungos segue o seguinte: Após o pôr do sol e diminuição da radiação incidente, a umidade relativa começa a aumentar, promovendo a liberação de esporos. Estes esporos, porém, ficam acumulados na porção inferior da atmosfera, próximo ao solo, até o momento que se inicia a mistura com camadas de ar superiores. Esta mistura faz com que os esporos subam, podendo ultrapassar o dossel da floresta. Acima do dossel existem, em geral, ventos de velocidade superior àquelas medidas abaixo do dossel, permitindo, portanto, o transporte de longa distância destes esporos e outros aerossóis.

4.2.3 Nevoeiro e esporos

O desenvolvimento do nevoeiro começa no solo e adensa até chegar a níveis mais altos da atmosfera, e, como existe uma diferença de altura entre a posição do Sporetrap (26 m) e do medidor de *fog* (50 e 43 m), deve haver alguns minutos de defasagem entre os dados de *fog* e de esporos, de forma que, no momento em que foi registrado o início do nevoeiro, este já estava presente a 26 m. Porém, como se tratam de apenas alguns minutos de diferença e a resolução de PB é de 1 hora, foi considerado irrelevante para a análise.

Para melhor visualizar as concentrações de esporos na ausência e presença de nevoeiro, estão apresentados nas figuras 11 e 12 dados de nevoeiro sincronizados à contagem horária de esporos.

Durante a estação seca (figura 11a) observou-se um aumento do número de esporos durante o evento de nevoeiro, comparado a horários sem nevoeiro.

Na EU foi verificado que antes do início da formação do nevoeiro foi registrado o maior pico de esporos da estação (figura 11b), o que deve-se provavelmente à precipitação que ocorreu no dia anterior, levando a UR a aumentar antes que comparado a dias sem precipitação e mantendo-a igual a 100% por 14 horas continuamente (figura A.2). Portanto, levando os corpos fúngicos a liberarem seus esporos antes que comparado à estação seca.

A principal diferença entre as duas estações é o número de esporos registrados pré-nevoeiro. Com a figura 12 contatou-se que durante a ES a quantidade de esporos é menor antes do evento, enquanto na EU verificou-se que os maiores picos ocorreram pré-nevoeiro, sendo que com a redução da visibilidade a quantidade de esporos caiu à

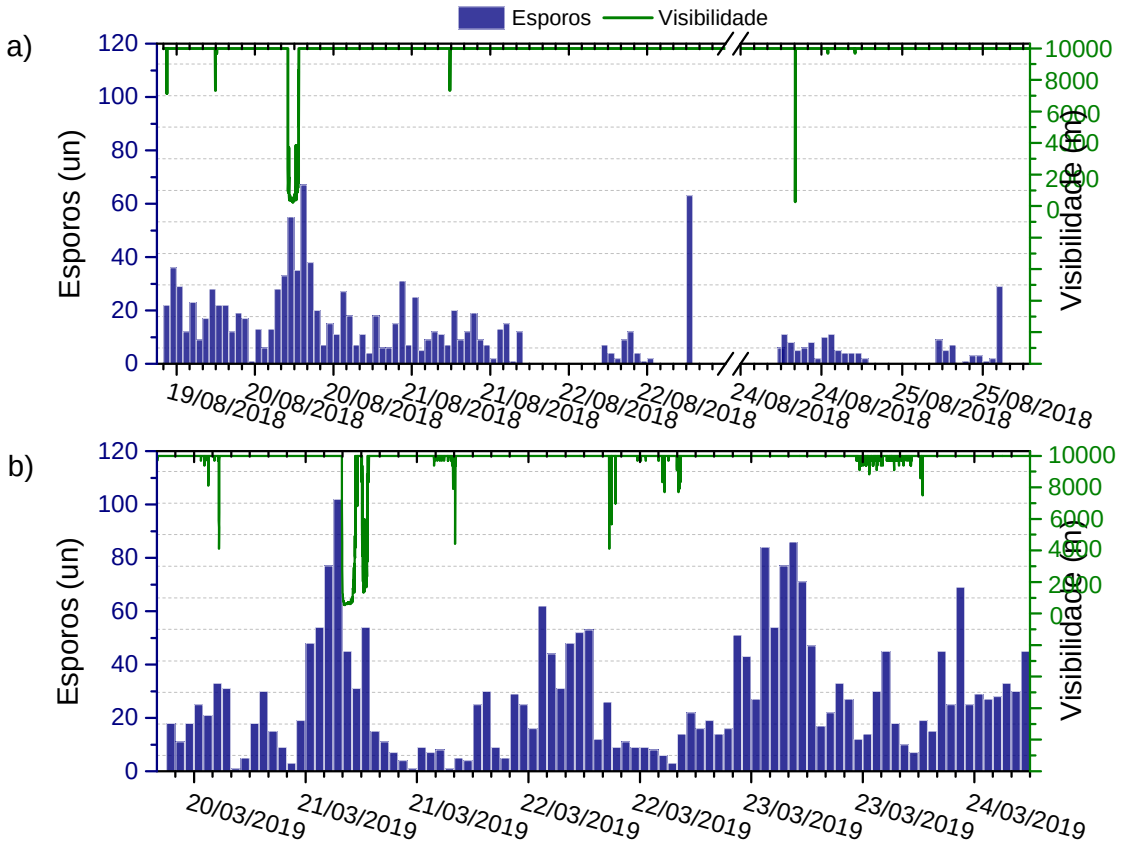


Figura 11: Esporos de fungos coletados durante a campanha das estações a) seca e b) úmida e dados de visibilidade de períodos respectivos. Ocorreram dois eventos de nevoeiro (vis ≤ 1000 m), um para cada estação, registrados nos dias 20/08 e 21/03. Fonte: A autora (2021).

metade.

Considerando os eventos de *fog* das duas estações, percebe-se que o número de esporos é maior na estação seca, chegando a 54 unidades nos primeiros 60 minutos. Já na estação úmida houve o registro de menos de 50 unidades na primeira hora de nevoeiro.

Para ambas estações houve diminuição no número de esporos com a dissipação do nevoeiro, seguido de um aumento pós-nevoeiro, o que ocorreu em consonância com a névoa densa na EU (figura 12). Ainda, no momento pós-nevoeiro da ES foi registrado o maior número de esporos da estação (entre 07:00 e 08:00).

A contagem de esporos revelou que o dia com maior quantidade deste PB foi em 23/03 (tabela 4), o dia mais quente e segundo dia mais seco da estação úmida. Neste dia a maior quantidade de esporos foi encontrada durante a noite, apesar de não ter ocorrido nevoeiro. Isto indica que a presença do *fog* não é um fator determinante para a presença de esporos na atmosfera, porém levanta a seguinte questão: seriam os esporos

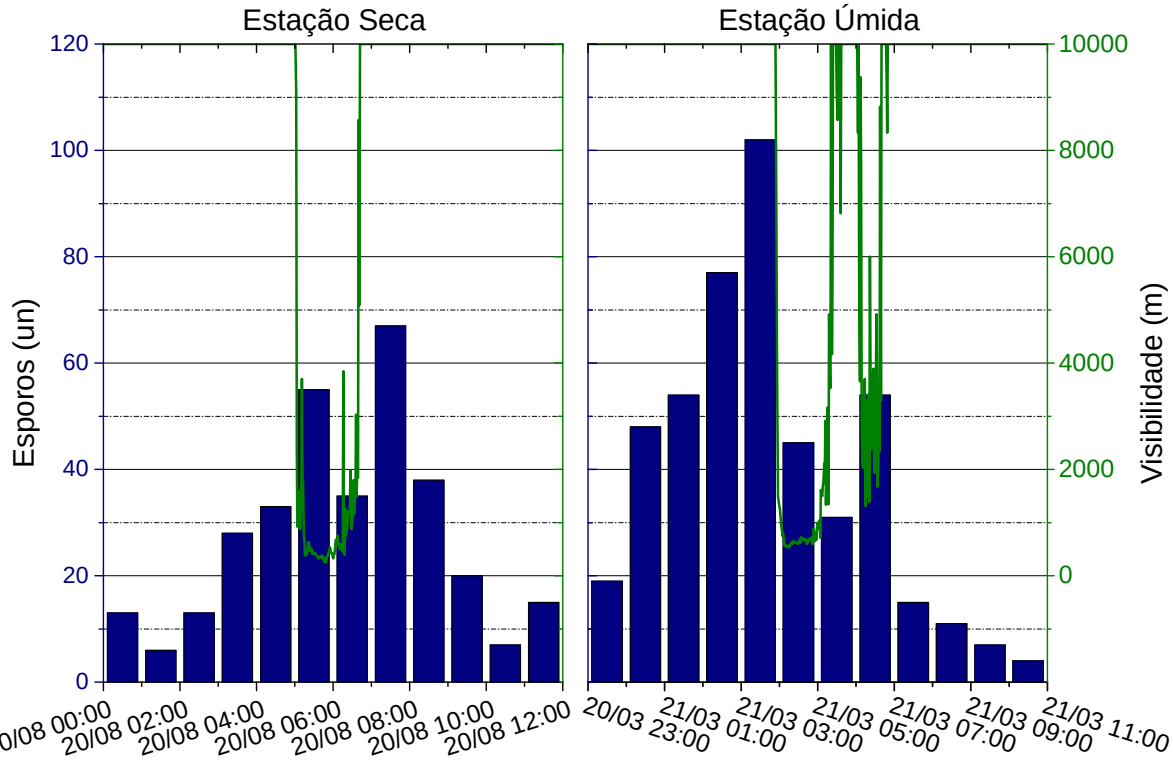


Figura 12: Quantificação de esporos pré, durante e pós-nevoeiro nas estações seca e úmida. Fonte: A autora (2021).

de fungos e demais bioaerossóis os núcleos necessários para a formação do nevoeiro na floresta amazônica?

É fato que para a ocorrência de nevoeiro é necessário que exista umidade suficiente, ventos de baixa velocidade ou mesmo ausentes, além da presença de NCNs, onde as gotículas de *fog* se formarão.

Sabendo disto, é questionável se o nevoeiro facilita a dispersão dos esporos ou mesmo se estes promovem a sua formação, atuando como NCN. É provável que exista alguma forma de relação entre a quantidade de aerossóis biogênicos e a formação de nevoeiro, resta investigar qual a relação de causalidade entre os dois fatores, bem como do seu papel na formação de chuvas que são distribuídas pelo Brasil.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a composição de bioaerossóis na atmosfera da floresta amazônica, bem como verificar se variáveis meteorológicas exercem influência na quantificação de PB, considerando as particularidades das duas estações predominantes da floresta. Foi constatado que, em ambas estações a temperatura varia na mesma faixa, porém a amplitude térmica é maior durante a estação seca. A temperatura varia menos durante a EU devido a quantidade de umidade presente em atmosfera, sendo que a UR chegou a 100% em 45% do tempo nesta estação. Durante a estação seca foi registrada maior quantidade de grãos de pólen e menor quantidade de esporos de fungos, porém não foram realizadas amostras noturnas nesta estação, o que acarretou na perda dos dados referentes à esporos, que possuem padrão de emissão noturno. Durante a estação úmida foi verificado que os picos de esporos acontecem antes do que na estação seca, provavelmente devido à maior umidade. Os resultados expostos neste trabalho indicaram que há maior quantidade de esporos em atmosfera durante eventos de nevoeiro, para ambas estações, considerando mesmos horários. Entretanto, durante a análise foi verificado que este fenômeno meteorológico não é um fator determinante para a presença de PB na atmosfera, levantando o questionamento de que talvez a alta concentração de biogênicos na atmosfera noturna seja um importante fator que potencialize a formação de nevoeiro. Para estudar tal hipótese, porém, são necessárias pesquisas futuras que permitam avaliar com maior assertividade os efeitos reais do material biogênico na formação de *fog*, bem como de amostragens de períodos maiores.

REFERÊNCIAS

Anber, U., Gentine, P., Wang, S. & Sobel, A. H. (2015). Fog and rain in the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *112*(37), 11473–11477.

Andrade, A. M. D. D. & Moura, M. A. L. (2011). Condensação a superficie na Amazônia em área de pastagem durante o experimento LBA/SMOCC: estudo de casos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, *26*, 339–348.

Andreae, M. O., Acevedo, O. C., Araùjo, A., Artaxo, P., Barbosa, C. G., Barbosa, H., Brito, J., Carbone, S., Chi, X., Cintra, B. et al. (2015). The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO): overview of pilot measurements on ecosystem ecology, meteorology, trace gases, and aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *15*(18), 10723–10776.

Barbosa, C. G. G. (2018). *Primary biological aerosol particles at the Amazon Tall Tower Observatory: inventory and vertical distribution* (tese de dout.). Universidade Federal do Paraná, Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Bauer, H., Goncalves, F. L., Schueller, E. & Puxbaum, H. (2010). Fungal spores as potential ice nuclei in fog/cloud water and snow. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 15472.

Boutle, I., Price, J., Kudzotsa, I., Kokkola, H. & Romakkaniemi, S. (2018). Aerosol–fog interaction and the transition to well-mixed radiation fog. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *18*(11), 7827–7840.

Buller, A. (1909). Researches on Fungi, vols. 1-7. *London, Green and Company.*

Camargo, J., Brill, S., Souza, C., Sebben, B., Pauliquevis, T., Taylor, P. & Godoi, R. (2021). The advance in Poaceae pollen seasonality pattern may impact allergy treatment practice. *The journal of allergy and clinical immunology: official publication of the American Academy of Allergy, Asthma and Immunology*, *147*(2), AB85–AB85.

Chen, C.-L., Chen, T.-Y., Hung, H.-M., Tsai, P.-W., Chou, C. C.-K. & Chen, W.-N. (2021). The influence of upslope fog on hygroscopicity and chemical composition of aerosols at a forest site in Taiwan. *Atmospheric Environment*, *246*, 118150.

Costa, A. A. & Pauliquevis, T. (2009). Aerossóis, nuvens e clima: resultados do experimento LBA para o estudo de aerossóis e microfisica de nuvens. *Revista brasileira de meteorologia*, *24*, 234–253.

Deguillaume, L., Leriche, M., Amato, P., Ariya, P., Delort, A., Poschl, U., Chaumerliac, N., Bauer, H., Flossmann, A. & Morris, C. E. (2008). Microbiology and atmospheric processes: chemical interactions of primary biological aerosols. *Biogeosciences Discussions*, *5*(1), 841–870.

Després, V., Huffman, J. A., Burrows, S. M., Hoose, C., Safatov, A., Buryak, G., Fröhlich-Nowoisky, J., Elbert, W., Andreae, M., Pöschl, U. et al. (2012). Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, *64*(1), 15598.

Dutra, B. M., Nelson, A., Zavadniak, A. F. et al. (2001). Alérgenos inaláveis em Curitiba: uma revisão de sua relevância clínica. *Revista Brasileira de Alergia e Imunopatologia*, 189–195.

Elbert, W., Taylor, P., Andreae, M. & Pöschl, U. (2007). Contribution of fungi to primary biogenic aerosols in the atmosphere: wet and dry discharged spores, carbohydrates, and inorganic ions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *7*(17), 4569–4588.

Ervens, B., Turpin, B. & Weber, R. (2011). Secondary organic aerosol formation in cloud droplets and aqueous particles (aqSOA): a review of laboratory, field and model studies. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *11*(21), 11069–11102.

Evans, S. E., Dueker, M. E., Logan, J. R. & Weathers, K. C. (2019). The biology of fog: results from coastal Maine and Namib Desert reveal common drivers of fog microbial composition. *Science of the Total Environment*, *647*, 1547–1556.

Fröhlich-Nowoisky, J., Pickersgill, D. A., Després, V. R. & Pöschl, U. (2009). High diversity of fungi in air particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *106*(31), 12814–12819.

Graham, B., Guyon, P., Maenhaut, W., Taylor, P. E., Ebert, M., Matthias-Maser, S., Mayol-Bracero, O. L., Godoi, R. H., Artaxo, P., Meixner, F. X. et al. (2003). Composition and diurnal variability of the natural Amazonian aerosol. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *108*(D24).

Hassett, M. O., Fischer, M. W. & Money, N. P. (2015). Mushrooms as rainmakers: how spores act as nuclei for raindrops. *PloS one*, *10*(10), e0140407.

Huunová, I., Brabec, M., Geletič, J., Malý, M. & Dumitrescu, A. (2021). Statistical analysis of the effects of forests on fog. *Science of The Total Environment*, *781*, 146675.

Lacey, M. E. & West, J. S. (2007). *The air spora: a manual for catching and identifying airborne biological particles*. Springer Science & Business Media.

Liu, F., Chavez, R. L., Patek, S., Pringle, A., Feng, J. J. & Chen, C.-H. (2017). Asymmetric drop coalescence launches fungal ballistospores with directionality. *Journal of The Royal Society Interface*, *14*(132), 20170083.

Löbs, N., Barbosa, C. G., Brill, S., Walter, D., Ditas, F., de Sá, M. O., de Araújo, A. C., de Oliveira, L. R., Godoi, R. H., Wolff, S. et al. (2020). Aerosol measurement methods to quantify spore emissions from fungi and cryptogamic covers in the Amazon. *Atmospheric Measurement Techniques*, *13*(1), 153–164.

Moore, P. D., Webb, J. A., Collison, M. E. et al. (1991). *Pollen analysis*. Blackwell scientific publications.

Myhre, G., Myhre, C., Samset, B. & Storelvmo, T. (2013). Aerosols and their relation to global climate and climate sensitivity. *Nature Education Knowledge*, *4*(5), 7.

Noblin, X., Yang, S. & Dumais, J. (2009). Surface tension propulsion of fungal spores. *Journal of Experimental Biology*, *212*(17), 2835–2843.

Nobre, C. A., Obregón, G. O., Marengo, J. A., Fu, R. & Poveda, G. (2009). Características do clima amazônico: Aspectos principais. *American Geophysical Union*, (186), 149–162.

Nogueira, J., Evangelista, H., de Morisson Valeriano, C., Sifeddine, A., Neto, C., Vaz, G., Moreira, L. S., Cordeiro, R. C., Turcq, B., Aniceto, K. C., Neto, A. B., Martins, G., Barbosa, C. G. G., Godoi, R. H. M. & Shimizu, M. H. (2021). Dust arriving in the Amazon basin over the past 7,500 years came from diverse sources. *Communications Earth & Environment*, *2*(1), 1–11.

Nunes, C. & Ladeira, S. (2007). Polinose, meteorologia e prevenção primária na rinoconjuntivite sazonal. *Revista Portuguesa de Imunoalergologia*, *15*(4), 321–338.

Pérez-Díaz, J. L., Ivanov, O., Peshev, Z., Álvarez-Valenzuela, M. A., Valiente-Blanco, I., Evgenieva, T., Dreischuh, T., Gueorguiev, O., Todorov, P. V. & Vaseashta, A. (2017). Fogs: Physical basis, characteristic properties, and impacts on the environment and human health. *Water*, *9*(10), 807.

Pöhlker, M. L., Ditas, F., Saturno, J., Klimach, T., Hrabě de Angelis, I., Araújo, A. C., Brito, J., Carbone, S., Cheng, Y., Chi, X. et al. (2018). Long-term observations of cloud condensation nuclei over the Amazon rain forest–Part 2: Variability and characteristics of biomass burning, long-range transport, and pristine rain forest aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *18*(14), 10289–10331.

Pope, F. (2010). Pollen grains are efficient cloud condensation nuclei. *Environmental Research Letters*, *5*(4), 044015.

Prisle, N. L., Lin, J. J., Purdue, S., Lin, H., Meredith, J. C. & Nenes, A. (2019). Cloud condensation nuclei activity of six pollenkitts and the influence of their surface activity. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *19*, 4741–4761.

Šantl-Temkiv, T., Sikoparija, B., Maki, T., Carotenuto, F., Amato, P., Yao, M., Morris, C. E., Schnell, R., Jaenicke, R., Pöhlker, C. et al. (2020). Bioaerosol field measurements: Challenges and perspectives in outdoor studies. *Aerosol Science and Technology*, *54*(5), 520–546.

Seinfeld, J. & Pandis, S. (2008). *Atmospheric Chemistry and Physics. 1997*.

Steiner, A. L., Brooks, S. D., Deng, C., Thornton, D. C., Pendleton, M. W. & Bryant, V. (2015). Pollen as atmospheric cloud condensation nuclei. *Geophysical research letters*, *42*(9), 3596–3602.

Stephenson, S. L. (2010). *The kingdom fungi: The biology of mushrooms, molds, and lichens*. Timber Press.

Stull, R. B. et al. (2018). *Practical meteorology: an algebra-based survey of atmospheric science*.

Swap, R., Garstang, M., Greco, S., Talbot, R. & Kållberg, P. (1992). Saharan dust in the Amazon Basin. *Tellus B*, *44*(2), 133–149.

Taylor, G. (1917). The formation of fog and mist. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *43*(183), 241–268.

Watkinson, S. C., Boddy, L. & Money, N. (2015). *The fungi*. Academic Press.

Womiloju, T. O., Miller, J. D., Mayer, P. M. & Brook, J. R. (2003). Methods to determine the biological composition of particulate matter collected from outdoor air. *Atmospheric Environment*, *37*(31), 4335–4344.

Woo, C., An, C., Xu, S., Yi, S.-M. & Yamamoto, N. (2018). Taxonomic diversity of fungi deposited from the atmosphere. *The ISME journal*, *12*(8), 2051–2060.

A VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

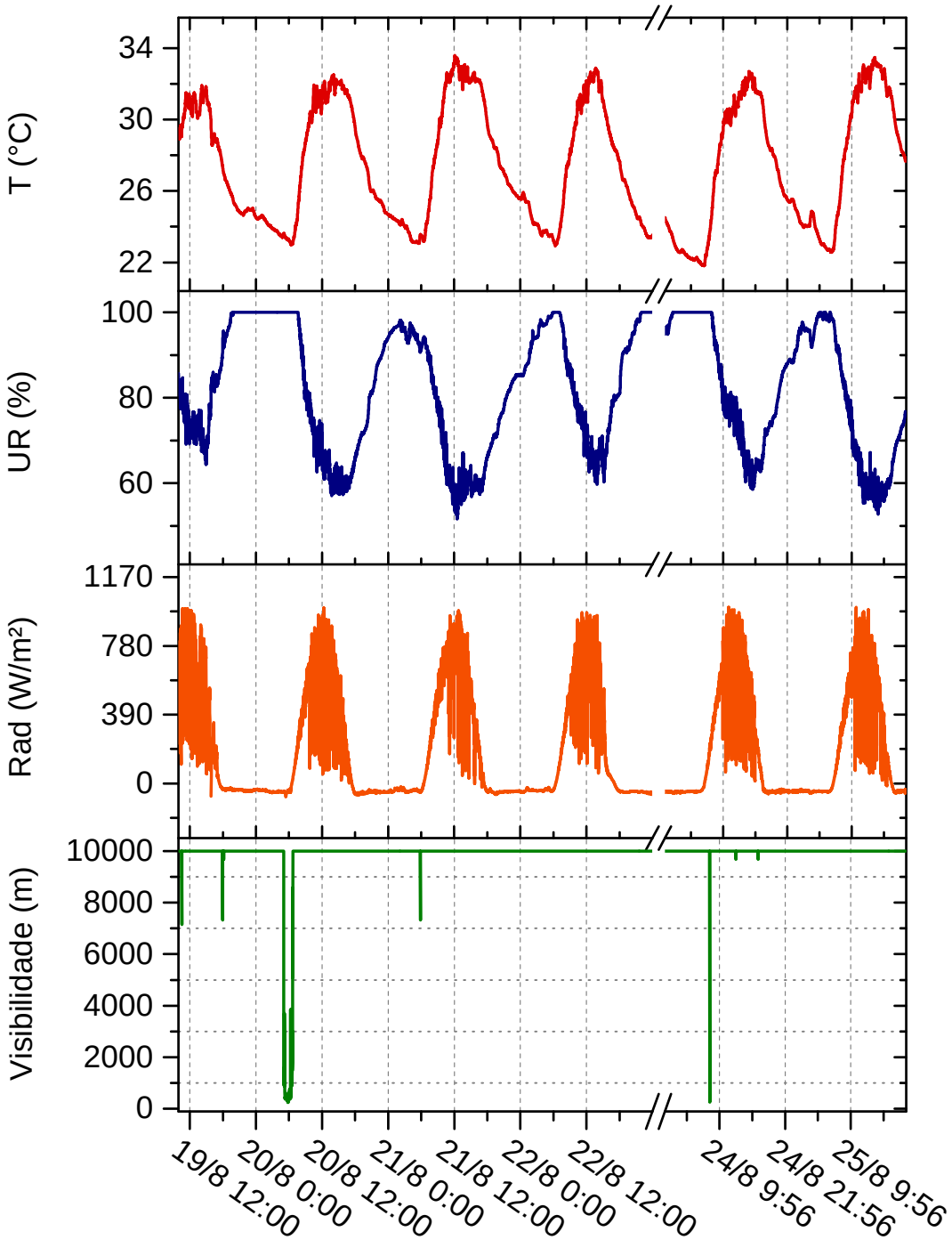


Figura A.1: Variáveis Meteorológicas medidas a 26m do solo na Estação Seca. Fonte: A autora (2021).

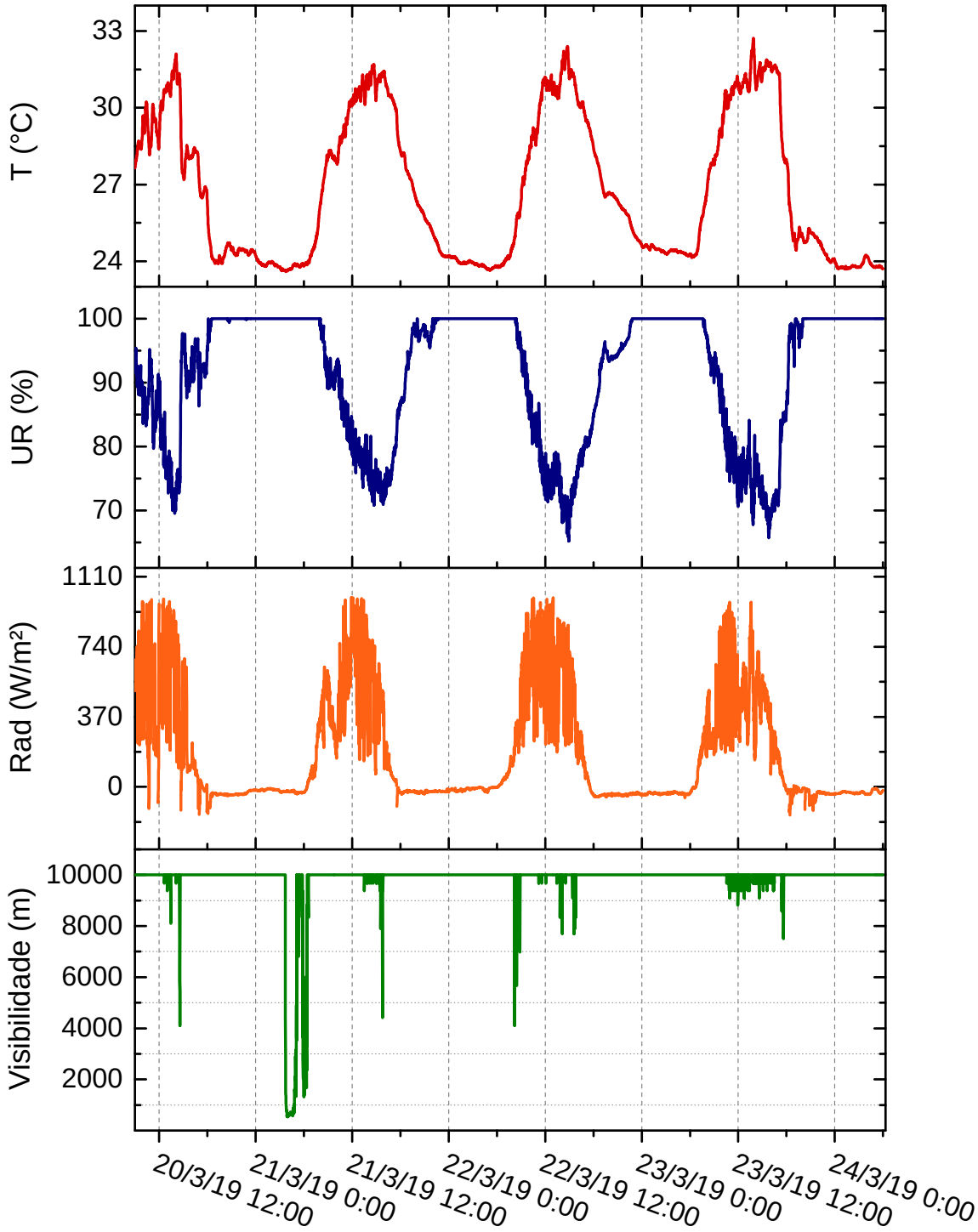


Figura A.2: Variáveis Meteorológicas medidas a 26m do solo na Estação Úmida. Fonte: A autora (2021).