

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
Departamento de Ciências Atmosféricas

Thaysla Beluco Quintino

Caracterização do granizo presente em tempestades severas na Região Sul do Brasil

São Paulo
2022

Thaysla Beluco Quintino

Caracterização do granizo presente em tempestades severas na Região Sul do Brasil

Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade

Dissertação apresentada ao Departamento de Ciências atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Meteorologia
Orientador: Prof. Dr. Fabio Luiz Teixeira Gonçalves

São Paulo

2022

QUINTINO, T. B. Caracterização do granizo presente em tempestades severas na Região Sul do Brasil. 2022. p. 106. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2022.

Aprovado em: 10 de novembro de 2022

Banca examinadora

Prof. Dr. Fábio Luiz Teixeira Gonçalves

Instituição: Universidade de São Paulo (Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas)

Julgamento: Aprovado

Prof. Dr. Jorge Alberto Martins

Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Julgamento: Aprovado

Dra. Cristiane Degobbi Coelho

Julgamento: Aprovado

Aos meus pais, irmãos e amigos que me incentivaram e me apoiaram permitindo a realização desse trabalho e à todas as pessoas que gostariam de ter a mesma oportunidade que tive.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento nº 88887.373123/2019-00 e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) – Projeto Temático nº 2016/06160-8.

Agradeço ao meu orientador, Fábio Gonçalves, aos meus pais Aparecido e Vera Quintino, aos meus pais de coração Luciana Luquez, Fabiano Fiumari e Bruno Camargo, aos meus irmãos Thalysson e Thiago Quintino, aos meus familiares, amigos e professores por todo o incentivo, conselhos, força e apoio.

Agradeço a todos os técnicos e pesquisadores que me auxiliaram e compartilharam seus conhecimentos e experiências comigo, desde a coleta até as análises de dados. Em especial à Rosana Astolfo do LAPAt (USP), Dulcilene Matos, Valter do IAL, Ana Paula Emygdio, Rafael Zanetti, Gabriel Araújo e Carla Moreira. Ressalto meus agradecimentos aos voluntários do projeto que colaboraram com a coleta das amostras, sendo eles, Remi Siqueira, Antônio e Gilmar Deborra, Eva Seloiro, Silmar Carlos Ruschel, Marcelo Walbrick, Lorena e Floide Fantinel, Seli Vergutz e Ivanir Spironello. Também agradeço ao Vereda pelo acolhimento e a Gabriela Corrêa, Gabriely Rangel, Letícia Braga, Mariana Rached e Paula Lório pelos valiosos ensinamentos.

Agradeço a FAPESP e a CAPES pelo auxílio financeiro, o qual permitiu a realização deste trabalho. Agradeço também ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo pela oportunidade e apoio.

“All we have to decide is what to do with the time that is given us.” (J.R.R. Tolkien, The Fellowship of the Ring)

RESUMO

QUINTINO, T. B. Caracterização do granizo presente em tempestades severas na Região Sul do Brasil. 2022. p. 106. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2022.

As tempestades, que envolvem granizo, são recorrentes nas regiões Sul do Brasil. Na maioria das vezes, essas tempestades vêm acompanhadas de grandes perdas econômicas, o que torna importante e necessário melhorar o nível de conhecimento em torno do tema. Por outro lado, a composição microbiológica de granizos tem sido estudada desde o século XIX, com a identificação de alguns microrganismos, contudo, há ainda uma grande lacuna na descrição do papel destes na formação do granizo, em particular no Brasil. Os bioaerossóis, como podem ser classificados os aerossóis de origem biológica, podem ser originários de plantas (pólenes), animais (insetos) e microrganismos (fungos e bactérias) incluindo organismos vivos e mortos e seus subprodutos e são de elevada importância, mostrando relação com deflagração de doenças respiratórias e interferindo em processos meteorológicos, como no caso da formação de núcleos de formação de gelo em nuvens. Dentre os aerossóis que são responsáveis pela formação dos núcleos de gelo, as de origem biológica são as principais em temperaturas mais quentes que -10°C . Pouco se sabe sobre o papel destes nucleadores de gelo de origem biológica no mundo, em particular no Brasil. Esse trabalho objetivou estimar a concentração dos componentes biológicos (bactérias e fungos) presentes em pedras de granizo coletadas em tempestades na Região Sul do Brasil, bem como, a caracterização física e química das mesmas. As amostras foram coletadas através de voluntários de uma rede de monitoramento em implantação em sítios representativos da região durante eventos ocorridos em junho, julho e agosto de 2020. As trajetórias de parcela de ar dos eventos foram obtidas, em períodos anteriores aos mesmos, pelo HYSPLIT. Foram analisados íons, composição microbiológica (fungos e bactérias), ecologia microbiana, as variáveis polarimétricas do Radar Meteorológico do Oeste e propriedades físicas da pedra de granizo (massa, diâmetro, volume e densidade), para comparação. Com o conjunto de dados tem-se que a concentração de bactérias em número de unidades formadoras de colônias (UFC) foi entre 9 e 32 unidades formadoras de colônias (UFC) por granizo, sendo em média 11 UFC mL^{-1} . Estes microrganismos foram identificados e foram encontradas 19 espécies de microrganismos (bactérias e fungos), sendo que 52,6% das bactérias

identificadas pertencem ao gênero *Bacillus*, este grupo também foi encontrado em outros trabalhos que envolvem identificação microbiológica a partir de amostras de granizo em diversas partes do mundo. Também foram identificadas bactérias do gênero *Arthrobacter*, *Oceanobacillus*, *Lysinibacillus*, *Methylobacterium*, *Gordonia*, *Curtobacterium* e *Paenibacillus* e um fungo pertencente ao grupo *Fusarium*. Além disso, dentre os íons identificados, o flúor (110,09 $\mu\text{mol/L}$), sódio (68,01 $\mu\text{mol/L}$), cloreto (67,29 $\mu\text{mol/L}$) e potássio (64,41 $\mu\text{mol/L}$) apresentaram as maiores concentrações. Estes elementos químicos, demonstraram que as atividades locais da região contribuíram para a presença destes, sendo as possíveis fontes, a ressuspensão do solo, o uso de fertilizantes, a criação de gado, bem como, as emissões biogênicas da vegetação podem auxiliar na origem destes elementos. O modelo HYSPLIT mostrou que as parcelas são oriundas das regiões norte e oeste, demonstrando escoamento com origem da região Amazônica e de regiões circunvizinhas à área de coleta. Ao investigar a relação das variáveis polarimétricas com o tamanho do granizo, a variável Z_H demonstrou diferenças entre as tempestades estudadas, sugerindo a existência de variações entre os tipos, formatos e quantidades de hidrometeoros entre as tempestades. Ao analisar o comportamento de Z_{DR} , verificou-se que as três tempestades apresentam processos associados à formação de gotas de chuva. Calculou-se o diâmetro do granizo utilizando as variáveis polarimétricas do radar meteorológico, o valor encontrado foi maior que o medido em laboratório através das amostras coletadas. Estes valores foram validados com dados coletados *in situ* e assim, o radar meteorológico apresentou desempenho satisfatório ao estimar o tamanho do granizo através de variáveis polarimétricas. Com este trabalho, espera-se preencher algumas lacunas no conhecimento em relação aos componentes biológicos, químicos e físicos dos granizos presentes nas tempestades da região sul: como composição; e a compreensão de alguns dos seus impactos na atmosfera.

Palavras chave: bioaerossóis, granizos, núcleo de gelo.

ABSTRACT

QUINTINO, T. B. Characterization of hail present in severe storms in southern Brazil. 2022. p. 106. Dissertation (Master of Science) - Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences, University of São Paulo, 2022.

Storms, which involve hail, are recurrent in the southern regions of Brazil. Most of the time, these storms are accompanied by great economic losses, which makes it important and necessary to improve the level of knowledge around the subject. On the other hand, the microbiological composition of hail has been studied since the nineteenth century, with the identification of some microorganisms, however, there is still a large gap in the description of their role in the formation of hail, particularly in Brazil. Bioaerosols, as aerosols of biological origin, may originate from plants (pollens), animals (insects) and microorganisms (fungi and bacteria) including living and dead organisms and their by-products and are of high importance, showing relationship with respiratory diseases and interfering in meteorological processes, as in the case of the formation of ice nuclei in clouds. Among the aerosols that are responsible for the formation of ice nuclei, those of biological origin are the main ones in temperatures hotter than $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Little is known about the role of these biological ice nucleators in the world, particularly in Brazil. This study aimed to estimate the concentration of biological components (bacteria and fungi) present in hailstones collected in storms in southern Brazil, as well as the physical and chemical characterization of them. The samples were collected by volunteers from a monitoring network in implementation at representative sites in the region during events that occurred in June, July and August 2020. The air portion trajectories of the events were obtained, in periods prior to them, by HYSPLIT. Ions, microbiological composition (fungi and bacteria), microbial ecology, polarimetric variables of the Radar Meteorológico do Oeste (RMO) and physical properties of the hailstone (mass, diameter, volume and density) were also analyzed for comparison. With the data set, the concentration of bacteria in number of colony forming units (CFU) was between 9 and 32 colony forming units (CFU) by hail, being on average 11 CFU mL^{-1} . These microorganisms were identified and were found 19 species of microorganisms (bacteria and fungi), and 52.6% of the bacteria identified belong to the genus *Bacillus*, this group was also found in other studies involving microbiological identification from hail samples in various parts of the world. Bacteria of the genus *Arthrobacter*, *Oceanobacillus*, *Lysinibacillus*, *Methylobacterium*,

Gordonia, *Curtobacterium* and *Paenibacillus* and a fungus belonging to the *Fusarium* genera was also identified. In addition, among the identified ions, fluorine (110.09 $\mu\text{mol/L}$), sodium (68.01 $\mu\text{mol/L}$), chloride (67.29 $\mu\text{mol/L}$) and potassium (64.41 $\mu\text{mol/L}$) presented the highest concentrations. These chemical elements demonstrated that the local activities of the region contributed to the presence of these, being the possible sources, the resuspension of the soil, the use of fertilizers, the biogenic emissions from vegetation. The HYSPLIT model showed that the plots come from the northern and western regions, showing flow originating from the Amazon region and regions surrounding the collection area. When investigating the relationship of polarimetric variables with hail size, the variable Z_H showed differences between the storms studied, suggesting the existence of variations between types, shapes and quantities of hydrometeors between storms. When analyzing the behavior of Z_{DR} , it was found that the three storms have processes associated with the formation of raindrops. The hail diameter was calculated using the polarimetric variables of the meteorological radar, the value found was higher than that measured in the laboratory through the collected samples. These values were validated with data collected *in situ* and thus, the meteorological radar showed satisfactory performance when estimating the hail size through polarimetric variables. With this work, it is expected to fill some gaps in knowledge regarding the biological, chemical and physical components of hail present in storms in the southern region: as composition; and understanding some of its impacts on the atmosphere.

Keywords: bioaerosols, hail, ice nuclei.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Região estudada, composta pelos estados de Santa Catarina e Paraná. Ao todo são analisados quatro municípios, sendo eles: Barracão - PR, Dionísio Cerqueira - SC, Guarujá do Sul - SC e Princesa – SC.	27
Figura 2 - Rosa dos ventos referente ao período coletado em 30 de junho de 2020 (A), 28 de julho de 2020 (B) e 15 de agosto de 2020 (C).....	44
Figura 3 - Gêneros de bactérias encontradas e porcentagens do total de isolados identificados	50
Figura 4 - Trajetórias backward das massas de ar dos dias analisados (a) 30 de junho (b) 28 de julho e (c) 15 de agosto (HYSPLIT model) para as alturas de 20 m (linha vermelha), 100 m (linha azul), 500 m (linha verde), 1000 m (linha vermelha), 5000 m (linha azul) e 10000 m (linha verde)	54
Figura 5 - Análise das variáveis polarimétricas (Z_H e Z_{DR}) para o município de Guarujá do Sul, no dia 30 de junho de 2020.....	57
Figura 6 - Análise das variáveis polarimétricas (Z_H e Z_{DR}) para o município de Barracão, no dia 28 de julho de 2020.....	58
Figura 7 - Análise das variáveis polarimétricas (Z_H e Z_{DR}) para o município de Dionísio Cerqueira, no dia 15 de agosto de 2020.	58
Figura 8 - Diâmetros máximos encontrados para o município de Guarujá do Sul no dia 30 de junho de 2020.....	59
Figura 9 - Diâmetros máximos encontrados para o município de Barracão no dia 28 de julho de 2020.....	59
Figura 10 - Diâmetros horários máximos encontrados para o Município de Dionísio Cerqueira no dia 15 de agosto de 2020	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Detalhes sobre o período de coleta e número de amostras coletadas	29
Tabela 2 - Resumo da metodologia: equipamento de amostragem, instrumento de análise do material, parâmetros medidos, local onde a análise foi realizada e a quantidade de granizos que foram analisados para cada parâmetro medido.....	31
Tabela 3 - Tamanho do granizo, onde os valores dos dados de radar em cada linha são o resultado da integração sobre um espectro de tamanho de granizo especificado de um diâmetro mínimo de 3 mm até um diâmetro de $D_{\text{máx}}$	41
Tabela 4 - Valores médios das variáveis meteorológicas - Umidade relativa (%), Velocidade média do vento (m/s), Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Precipitação (mm) dos dias coletados (30 de junho, 28 de julho e 15 de agosto de 2020)	43
Tabela 5 - Valores médios mensais das variáveis meteorológicas no período de junho, julho e agosto de 2020.....	43
Tabela 6 - Características biológicas dos granizos amostrados	45
Tabela 7 - Identificação Biológica (Fungos e Bactérias).....	46
Tabela 8 - Valores dos índices de dominância (C), uniformidade (x) e similaridade (S) das comunidades bacteriana das tempestades analisadas.....	51
Tabela 9 - Valores dos índices de diversidade de Shannon (H) e Simpson (Ds), "Jack-knives" (JK) e intervalos de confiança (IC) das comunidades bacteriana das tempestades analisadas.	52
Tabela 10 - Dados físicos das amostras coletadas, massa (g), tamanho (cm), volume (cm^3) e densidade (g/cm^3) por evento.....	55
Tabela 11 - Diâmetros medidos em laboratório para granizos coletados dos municípios de Barracão, Dionísio Cerqueira e Guarujá do Sul para os eventos ocorridos no dia 30 de junho de 2020, 28 de julho de 2020 e 15 de agosto de 2020	60
Tabela 12 - Concentração de íons de cada tempestade de granizo coletada	61

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BC	Black Carbon (Carbono Negro)
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
EC	Carbono Elementar
EPAGRI/CIRAM	Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina
HYSPLIT	Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
IAPAR	Instituto Agrônomo do Paraná
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Cromatógrafo de Íons
IF	Instituto de Física
IQ	Instituto de Química
LAPAT	Laboratório de Análises e Processos Atmosféricos
MP	Material Particulado
MP ₁₀	Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor que 10 μm
MP _{2,5}	Material Particulado com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 μm
OC	Carbono orgânico
PBAP	Partículas de Aerossol Biogênico Primário
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
TSA	Ágar de Soja Tríplica
UFC	Unidades Formadoras de Colônia
UR	Umidade Relativa
USP	Universidade de São Paulo
VOCS	Compostos Orgânicos Voláteis

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	5
1.1	AERROSSÓIS E BIOAERROSSÓIS.....	6
1.2	INFLUÊNCIA DOS BIOAERROSSÓIS NOS PROCESSOS ATMOSFÉRICOS.....	9
1.3	BIOAERROSSÓIS ATUANTES COMO NÚCLEOS DE GELO.....	11
1.3.1	<i>Super-resfriamento da água e nucleação de gelo.....</i>	<i>13</i>
1.3.2	<i>Nucleação de gelo biológica.....</i>	<i>14</i>
1.3.3	<i>Bactérias nucleadoras de gelo.....</i>	<i>15</i>
1.3.4	<i>Influência dos aerossóis e bioaerossóis nas nuvens.....</i>	<i>16</i>
1.4	IMPACTO DAS TEMPESTADES DE GRANIZO.....	18
1.5	MONITORAMENTO DAS TEMPESTADES DE GRANIZO USANDO RADAR POLARIMÉTRICO.....	19
1.5.1	<i>Radar meteorológico.....</i>	<i>20</i>
1.5.2	<i>Radares Doppler de dupla polarização.....</i>	<i>20</i>
1.5.3	<i>Variáveis polarimétricas.....</i>	<i>22</i>
2	OBJETIVOS.....	23
2.1	OBJETIVO GERAL.....	23
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
3	JUSTIFICATIVA.....	24
4	METODOLOGIA.....	26
4.1	LOCAIS DE COLETA.....	26
4.1.1	<i>Barracão.....</i>	<i>27</i>
4.1.2	<i>Dionísio Cerqueira.....</i>	<i>28</i>
4.1.3	<i>Guarujá do Sul.....</i>	<i>28</i>
4.2	PERÍODO DE COLETA.....	29
4.3	AMOSTRADORES DE GRANIZO.....	29
4.3.1	<i>Rede de monitoramento.....</i>	<i>29</i>
4.3.2	<i>Coleta de granizo.....</i>	<i>30</i>
4.4	ANÁLISES LABORATORIAIS.....	30
4.4.1	<i>Análise física.....</i>	<i>32</i>
4.4.1.1	<i>Massa.....</i>	<i>32</i>
4.4.1.2	<i>Diâmetro.....</i>	<i>32</i>

4.4.1.3	Volume	32
4.4.1.4	Densidade	33
4.4.2	<i>Descontaminação das pedras de granizo</i>	33
4.5	ANÁLISE MICROBIOLÓGICA	34
4.5.1	<i>Cultivo da microbiota</i>	34
4.5.2	<i>Identificação da microbiota</i>	34
4.6	ECOLOGIA MICROBIANA	35
4.7	DADOS METEOROLÓGICOS	36
4.8	ANÁLISE DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS	36
4.9	ANÁLISE DE TRAJETÓRIA	37
4.10	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	37
4.11	ANÁLISE DE ÍONS	38
4.12	ESTIMATIVA DO TAMANHO DO GRANIZO USANDO RADAR POLARIMÉTRICO..	39
4.12.1	<i>Radar Meteorológico do Oeste (RMO)</i>	39
4.12.2	<i>Variáveis polarimétricas</i>	39
4.12.3	<i>Diâmetro máximo calculado</i>	40
4.12.4	<i>Algoritmo para validação dos dados de Radar</i>	41
5	RESULTADOS	42
5.1	METEOROLOGIA	42
5.2	VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DA MICROBIOTA.....	45
5.3	ASSOCIAÇÃO ENTRE OS EVENTOS OCORRIDOS.....	50
5.4	PROPRIEDADES FÍSICAS DAS AMOSTRAS DE GRANIZO	55
5.4.1	<i>Tamanho do granizo amostrado</i>	56
5.4.2	<i>Formato do granizo analisado</i>	56
5.5	RELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS POLARIMÉTRICAS (Z_H E Z_{DR}) E GRANIZO	57
5.6	DIÂMETROS MÁXIMOS IDENTIFICADOS POR MEIO DA REFLETIVIDADE DIFERENCIAL DO GRANIZO (H_{DR})	59
5.7	ÍONS.....	61
6	CONCLUSÃO	64
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
	APÊNDICE A – DADOS AMOSTRAIS	89
	APÊNDICE B – COMPOSIÇÃO DOS MEIOS DE CULTURA UTILIZADOS	90

APÊNDICE C - ESTUDO DA HABILIDADE DOS BIOAEROSSÓIS COMO NÚCLEOS DE GELO.....	91
ANEXO A – FIGURAS.....	93

1 Introdução

Os aerossóis podem influenciar a formação e o desenvolvimento da precipitação nas nuvens (MÖHLER *et al.*, 2007), desempenhando um papel importante na regulação global do clima por meio da intermediação das reações químicas que ocorrem na atmosfera e no ciclo da água (SOLOMON *et al.*, 2007). Em especial, os aerossóis de origem biológica têm despertado grande interesse da comunidade científica, pelo seu papel em processos físicos e químicos da atmosfera terrestre (ARIYA, PARISA; AMYOT, 2004). Embora, historicamente, as primeiras investigações da ocorrência e dispersão de microrganismos e esporos no ar podem ser traçadas até meados do século XIX (EHRENBERG, 1830; PASTEUR, 1890; GORBUSHINA *et al.*, 2007), mais recentemente, as partículas biológicas primárias de aerossóis (a seguir denominadas PBAPS), tais como pólen, esporos bacterianos e fúngicos, ganharam muita atenção devido à sua importância para a natureza das nuvens, atividade de nucleação do gelo e formação de granizo (BAUER *et al.*, 2003; MÖHLER *et al.*, 2007; MORRIS, 2008; MORRIS *et al.*, 2011). As nuvens, em alguns aspectos, podem apresentar um ambiente extremo caracterizado por baixa pressão e pH, com uma mistura de componentes orgânicos e inorgânicos (AMATO *et al.*, 2005), que se pode considerar hostil a bioaerossóis bacterianos e fúngicos. No entanto, dado que algumas bactérias e fungos podem ser encontrados em vários ambientes, mesmo sob condições extremas (BAUER *et al.*, 2002; MATTHIAS-MASER; JAENICKE, 1995; TOMASI; FUZZI; KIM, 2016), tais microrganismos podem desenvolver e ter potencial para modificar as propriedades físico-químicas de nuvens (BAUER *et al.*, 2003; SUN; ARIYA, 2006; MÖHLER *et al.*, 2007; ŠANTL-TEMKIV *et al.*, 2013; MICHAUD *et al.*, 2014).

Quando estes bioaerossóis atuam como núcleos de gelo (doravante, IN), eles indiretamente afetam a composição de nuvens/chuva formando gelo a temperaturas superiores a -10 °C (FRÖHLICH-NOWOISKY, JANINE *et al.*, 2016; MORRIS, *et al.*, 2013; MORRIS, GEORGAKOPOULOS; SANDS, 2004; SZYRMER; ZAWADZKI, 1997; VALI, 1995). Bactérias, fungos e pólenes são os principais partículas de aerossol biológico primário (adiante, PBAPS) que podem formar núcleos de gelo ativos em temperaturas mais quentes que -10 °C e podem, portanto, facilitar a precipitação impactando na regulação do clima e nos

regimes hídricos locais e regionais (HOOSE; KRISTJÁNSSON; BURROWS, 2010; MORRIS, et al., 2013) Assim, esses microrganismos podem agir de três maneiras em processos de formação de nuvens e precipitação: (1) a mudança de fase de vapor para líquido; (2) a aceleração da coalescência por partículas grandes; e (3) a mudança de fase de vapor ou líquido para gelo (MÖHLER *et al.*, 2007; ROGERS; YAU, 1976; WALLACE; HOBBS, 2006). Estes PBAPS têm suas principais fontes no solo, vegetação e superfícies aquáticas, tendo a atmosfera como seu habitat (DOUWES *et al.*, 2003a; MÖHLER *et al.*, 2007). Esta complexidade inerente e origem variada dependem totalmente (e em grande parte) dos padrões de cobertura do solo e uso do solo (BRUCE *et al.*, 2010; FIERER; JACKSON, 2006). Conseqüentemente, fatores como radiação solar, umidade, concentração de nutrientes e capacidade de dispersão (ZHAI *et al.*, 2018) são essenciais para os processos de transporte e atmosfera de PBAPS, dependendo deles. Embora estudos com foco nas propriedades físico-químicas das nuvens tenham sido feitos anteriormente (SUN; ARIYA, 2006), há uma carência de estudos que investiguem a natureza das PBAPS em diversas partes do planeta, e, particularmente, em relação ao seu papel na formação das pedras de granizo e sua composição biológica. Esta diversidade necessita de maiores estudos, em particular na América do Sul (MARTINS *et al.*, 2017).

1.1 Aerossóis e Bioaerossóis

Aerossóis atmosféricos são suspensões de partículas sólidas e/ou líquidas na atmosfera (PÖSCHL, 2005), exceto água pura (TOMASI; FUZZI; KOKHANOVSKY, 2017). Estes podem ter origem antropogênica e/ou natural (PÖSCHL, 2005; TOMASI; FUZZI; KOKHANOVSKY, 2017), e variam significativamente em tamanho, estrutura e composição (SEINFELD; PANDIS, 2006). O tempo de permanência da partícula na atmosfera depende essencialmente da sua densidade, massa e diâmetro (EMYGDIO *et al.*, 2018; WILKINSON *et al.*, 2012). Seu tamanho varia de alguns nanômetros a várias dezenas de micrômetros (TOMASI; FUZZI; KOKHANOVSKY, 2017). As partículas primárias são emitidas diretamente como líquidos ou sólidos a partir de fontes como a queima de biomassa, combustão incompleta de combustíveis fósseis, erupções vulcânicas e suspensão de estradas, solo e poeira mineral, sal marinho e materiais biológicos (fragmentos de plantas, microrganismos, pólen,

entre outros). As partículas secundárias, por outro lado, são formadas pela conversão de gás em partículas na atmosfera (formação de novas partículas por nucleação e condensação de precursores gasosos) (PÖSCHL, 2005).

Na pesquisa atmosférica, o termo material particulado (MP) é geralmente restrito a partículas com diâmetros aerodinâmicos menores que 1 μm (MP_1) ou menor que 2,5 μm ($\text{MP}_{2,5}$), que são conhecidas como partículas finas. No controle da poluição do ar, às vezes também inclui partículas maiores de até 10 μm (MP_{10}), que são definidas como partículas grossas (PÖSCHL, 2005). As partículas grossas somadas com as partículas finas, constituem as partículas inaláveis (EMYGDIO *et al.*, 2018). Quanto à composição destes aerossóis, o trabalho de Matthias-Maser e colaboradores (2000), estimou que cerca de 20% a 30% do total de material particulado é de origem biológica. Os componentes químicos predominantes do material particulado do ar são sais de sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-), amônia (NH_4^+), sal marinho, poeira mineral, compostos orgânicos (CO) e carbono negro (CN) ou elementar (CE), cada um dos quais tipicamente contribui para 10-30% da massa total presente no ambiente (GONG *et al.*, 2020; MATTHIAS-MASER *et al.*, 2000; MATTHIAS-MASER, SABINE; JAENICKE, 2000; PÖSCHL, 2005).

Uma forma de MP, de fonte biológica, é o carbono orgânico e o carbono elementar que são classificados como material carbonáceo (ALVES, 2005), e ambos são importantes no balanço radiativo na atmosfera (NOVAKOV *et al.*, 2005). As principais fontes dos aerossóis carbonáceos são queima de biomassa e de combustíveis fósseis e também da oxidação atmosférica de compostos orgânicos voláteis (COVs) de origem biogênica ou antropológica (ALVES, 2005). Os efeitos desses aerossóis no clima são classificados como direto ou indireto com respeito à forçante radiativa do sistema climático. As forçantes radiativas são mudanças nos fluxos de energia da radiação solar (intensidade máxima na faixa espectral da luz visível) e radiação terrestre (intensidade máxima na faixa espectral infravermelha) na atmosfera, induzidas por alterações antropogênicas ou naturais na composição atmosférica, propriedades da superfície da Terra ou atividade solar (PÖSCHL, 2005). Efeitos diretos resultam da dispersão e absorção de radiação solar e terrestre por partículas de aerossol, enquanto efeitos indiretos resultam de sua atividade como núcleos de condensação de nuvens (CCN) ou núcleos de gelo (IN),

influenciando na formação de nuvens e precipitação ou de sua atividade química e biológica, atuando sobre as emissões e transformação de gases de efeito estufa (JAENICKE, 1980; PÖSCHL et al., 2010; PÖSCHL, 2005; TOMASI; FUZZI; KOKHANOVSKY, 2017).

Por sua vez, os aerossóis biológicos primários (PBAPs), aerossóis biogênicos ou bioaerossóis são partículas sólidas ou líquidas (TOMASI; FUZZI; KOKHANOVSKY, 2017), ou seja, são MP de origem biológica. Eles são liberados na atmosfera do solo, vegetação (ceras cuticulares, fragmentos foliares), matéria húmica (SCHNELL; VALI, 1976; VALI, 1970, 1995) e partículas microbianas como bactérias, fungos, vírus, microalgas e pólenes (ALVES, 2005; DESPRÉS *et al.*, 2012). Devido às suas origens altamente diferentes, partículas de aerossóis biológicos exibem uma grande variedade de formas e cobrem uma ampla faixa de tamanho que varia de 0,1 μm a pelo menos 250 μm (TOMASI; FUZZI; KOKHANOVSKY, 2017). Por exemplo, vírus variam em geral de 0,1 a 0,3 μm e bactérias podem ir de 0,2 μm a alguns micrômetros (TOMASI; FUZZI; KOKHANOVSKY, 2017). A importância destes bioaerossóis são muitas e incluem influência nos processos atmosféricos e na saúde humana (DOUWES et al., 2003a; MÖHLER et al., 2007; MORRIS, 2008; MORRIS et al., 2011; MORRIS; SANDS, 2012)

Os bioaerossóis podem ter efeitos infecciosos, alergênicos ou tóxicos em organismos vivos, impactando a saúde e a agricultura em escalas locais, regionais e globais (WHO, 2018). Os componentes biológicos presentes na atmosfera, apresentam uma relação com a deflagração de doenças respiratórias (EMYGDIO *et al.*, 2018), podem ser alergênicos e causadores de doenças respiratórias e infecciosas além de agravar doenças crônicas como asma, bronquite e rinite (BURGE, 1990; DOUWES *et al.*, 2003b; EDUARD *et al.*, 2012; FIEGEL; CLARKE; EDWARDS, 2006; LACEY; DUTKIEWICZ, 1994; NAZAROFF, 2016; XU *et al.*, 2011). Outras doenças infecciosas importantes que ocorrem em humanos e animais, como antraz, febre aftosa, tuberculose, gripe e sarampo também podem ser espalhados por bactérias ou vírus transmitidos pelo ar (DOUWES *et al.*, 2003a; FIEGEL; CLARKE; EDWARDS, 2006; PAWANKAR, 2014; XU *et al.*, 2011). A inalação para os pulmões de fungos patogênicos viáveis no ar, como *Aspergillus*, *Cryptococcus* e *Pneumocystis* spp., pode causar infecções invasivas associadas a taxas de mortalidade de até 95% em

populações infectadas (FRÖHLICH-NOWOISKY *et al.*, 2016). Os bioaerossóis alergênicos e tóxicos não precisam ser viáveis, pois também células mortas ou fragmentos celulares podem provocar os mesmos efeitos adversos à saúde (DESPRÉS *et al.*, 2012; FRÖHLICH-NOWOISKY *et al.*, 2016). Eles são de particular interesse, pois podem induzir fortes respostas inflamatórias e sintomas como febre, dor de cabeça, tosse e dificuldade respiratória (PAWANKAR, 2014).

Muitos patógenos vegetais, animais e humanos, assim como a grande maioria dos PBA, são dispersos pelo ar, alguns podem viajar por longas distâncias espalhando doenças e até mesmo entre continentes. Estes patógenos são responsáveis por perdas econômicas significativas na agricultura em todo o mundo. Por exemplo, a ferrugem da folha de café causada pelo fungo *Hemileia vastatrix* é a doença mais destrutiva do café no mundo. Esporos de folhas de café infectadas são facilmente espalhados pelo vento ou pela chuva (FRÖHLICH-NOWOISKY *et al.*, 2016).

1.2 Influência dos bioaerossóis nos processos atmosféricos

Além de atuarem no âmbito epidemiológico, os bioaerossóis podem influenciar nos processos meteorológicos e climáticos, como na formação de núcleos de gelo (MORRIS; SANDS, 2012). O estudo das partículas biológicas em suspensão no ar, a aerobiologia, demonstra a dispersão de células vivas no ambiente atmosférico há várias décadas. Alguns trabalhos apresentam uma concentração típica de mais de 10 mil bactérias por metro cúbico de ar sobre o solo, porém este valor é passível de alteração dependendo das condições climáticas, época do ano, altitude, e o ecossistema da área de estudo (BAUER *et al.*, 2002; BURROWS *et al.*, 2009; MATTHIAS-MASER, SABINE; JAENICKE, 2000). Por meio de alguns autores, foi demonstrado que as copas de plantas, em dias secos e ensolarados, são fontes de bactérias em suspensão, através do movimento convectivo vertical do ar (CONSTANTINIDOU, *et al.*, 1982; LINDEMANN; UPPER, 1985). Em outro estudo, demonstrou-se que *P. syringae* e outras bactérias podem ser aerossolizadas a partir do solo com a consequência de gotas chuva (JOUNG; GE; BUIE, 2017). Uma proposta semelhante foi apresentada, onde a dispersão de células epifíticas no campo ocorresse mediante a colisão das gotas com folhas de plantas (CONSTANTINIDOU *et al.*, 1990; ERCOLANI *et al.*, 1974). Com isso, as bactérias podem ser transportadas

para a atmosfera pelos mais distintos habitats e sob diferentes condições climáticas.

O transporte de bactérias e fungos na forma de aerossóis pode representar um meio importante de proliferação de microrganismos em novos ambientes terrestres e aquáticos, assim como para novos hospedeiros animais ou vegetais no caso de organismos infecciosos (BARTON *et al.*, 2010; MEOLA *et al.*, 2015). As bactérias são emitidas para a atmosfera de quase todas as superfícies, incluindo plantas, solos e água (BURROWS *et al.*, 2009). Suspensas em gotículas no ar, acredita-se que bactérias são capazes de crescerem e se reproduzir, além de serem capazes de metabolizar nutrientes nas nuvens (DELORT *et al.*, 2010; WOMACK; BOHANNAN; GREEN, 2010) afetando sua composição química (BURROWS *et al.*, 2009; KHALED *et al.*, 2020; VAÏTILINGOM, MICKAËL *et al.*, 2010; VAÏTILINGOM, MICKAEL *et al.*, 2013).

Diversas comunidades bacterianas estão presentes na atmosfera (BOWERS *et al.*, 2009; ŠANTL-TEMKIV *et al.*, 2013) e nas nuvens (ŠANTL-TEMKIV *et al.*, 2013; TEMKIV *et al.*, 2012). Uma vez presentes na atmosfera, bactérias podem atuar como núcleos de condensação de nuvens e núcleos de gelo (DELORT *et al.*, 2010; SUN; ARIYA, 2006). De acordo com Möhler e colaboradores (2007), bactérias Gram-negativas, como *Pseudomonas syringae* por exemplo, podem facilitar a formação de cristais de gelo através da sua atividade de IN e influenciar os padrões de precipitação. Segundo Govindarajan e colaboradores (1988), esta propriedade de bactérias nucleadoras de gelo se deve a grandes agregados de uma proteína específica chamada *InaZ* em suas membranas que efetivamente catalisa a mudança de fase da água promovendo o seu congelamento. Segundo Šantl-Temkiv e colaboradores (2013), isso faz com que bactérias com atividade de IN elevem substancialmente a temperatura de congelamento da água encontrada em nuvens, possivelmente impactando processos de precipitação.

De acordo com Šantl-Temkiv e colaboradores (2013), o granizo, por meio do processo de congelamento da água, preserva amostras de água e, indiretamente, do ar proveniente da camada limite atmosférica em que a nuvem está inserida. O mesmo estudo relata ainda que, após caracterizar molecularmente os materiais solúveis nas pedras de granizo, e alinhar as

características de gêneros bacterianos encontrados, foi possível identificar que as nuvens podem formar um habitat para a existência de vida microbiana.

Estudos relacionados à composição biológica do granizo são escassos (HARRISON, 1898; MANDRIOLI *et al.*, 1973; MICHAUD *et al.*, 2014; ŠANTL-TEMKIV *et al.*, 2013; TEMKIV *et al.*, 2012). Entretanto, existem estudos que apontam a importância das partículas de origem biológica, como (MORRIS; GEORGAKOPOULOS; SANDS, 2004; MORRIS; SANDS, 2012), onde foi caracterizado a atuação dos microrganismos presentes na atmosfera. E o de (BURROWS *et al.*, 2009), onde foi estimado a emissão de bactérias na atmosfera em diferentes ambientes.

1.3 Bioaerossóis atuantes como núcleos de gelo

O clima terrestre sofre forte influência da composição da atmosfera, tanto da concentração dos gases quanto da presença de partículas de aerossóis (PÖSCHL *et al.*, 2010). Os aerossóis também são importantes para a composição química da atmosfera, visibilidade, e saúde das pessoas expostas às altas concentrações de partículas. Núcleos de condensação de nuvens, por exemplo, são determinantes para a microfísica, bem como para o tempo de residência das nuvens (ALVES, 2005; ARTAXO *et al.*, 2005). As partículas totais em suspensão na atmosfera de origem biológica, os bioaerossóis, tem provocado interesse da comunidade científica, pelo seu papel em importantes processos físicos e químicos da atmosfera terrestre (ARIYA *et al.*, 2009; ARIYA, PARISA; AMYOT, 2004).

De acordo o estudo de Després e colaboradores (2012), as partículas presentes na atmosfera, biológicas e não biológicas, são transportadas e depositadas na superfície em processos influenciados tanto pelas correntes de ar quanto pela sedimentação gravitacional, principalmente através de gotas de água e cristais de gelo com a precipitação. Um tipo específico de precipitação é o granizo, que é formado quando as correntes ascendentes no interior das tempestades são fortes o suficiente para levar gotículas de água acima do nível do congelamento. A formação de cristais de gelo e o congelamento de gotículas em temperaturas muito abaixo de 0 °C acaba formando o granizo que pode crescer à medida que água ou outros cristais de gelo adicional se congela nele (KNIGHT *et al.*, 2001). Eventualmente, o granizo se torna pesado a tal ponto que

as correntes ascendentes não são mais capazes de sustentá-lo na atmosfera. Em geral, na maior parte das tempestades as pedras de gelo apresentam tamanhos entre 1,5 e 2,0 cm de diâmetro, mas podem chegar a mais de 10 cm em casos extremos. A abrangência espacial da chuva de granizo varia de 1 a 2 km de largura e de 10 a 20 km de extensão, embora estas dimensões possam chegar a várias dezenas de km, ou seja, apresentam formato extremamente alongado, mas relativamente estreito (KNIGHT; HEYMSFIELD, 1983; PUNGE; KUNZ, 2016).

Quando moléculas de vapor de água interagem com partículas de aerossol, elas podem ser adsorvidas à superfície das partículas ou absorvidas em seu interior (PÖSCHL, 2005). Para partículas que consistem em material solúvel em água, a absorção de vapor de água pode levar à formação de gotículas de soluções aquosas concentradas com tendência a capturarem mais água e aumentarem o seu diâmetro. Grãos de pólen atraem água em umidades relativas bem abaixo de 100% e, portanto, podem atuar localmente como núcleos de condensação de nuvens, influenciando a sua formação (JAENICKE, 2005). Outras partículas biológicas, incluindo vegetação em decomposição (SCHNELL; VALI, 1976) e plâncton marinho, originam eficientes núcleos de gelo. Estes desencadeiam precipitação e assim removem a água da atmosfera (HOOSE; MÖHLER, 2012; LEE; WARREN; GUSTA, 1995; MÖHLER et al., 2007; MORRIS; GEORGAKOPOULOS; SANDS, 2004; ROGERS; YAU, 1976; WALLACE; HOBBS, 2006).

Um aumento das concentrações de núcleos de condensação de nuvens e núcleos de gelo na atmosfera pode ter diferentes efeitos na formação e propriedades da água líquida e gelo em nuvens de fase mista e na sua precipitação. Entre eles estão o chamado albedo da nuvem ou efeito Twomey (partículas de nuvens mais numerosas e menores refletem mais radiação solar), efeito no tempo de vida da nuvem (partículas de nuvens menores diminuem a eficiência da precipitação), efeito termodinâmico (gotículas de nuvens menores atrasam o início do congelamento), e efeitos na glaciação (mais IN aumentam a eficiência da precipitação) (COSTA *et al.*, 2014).

1.3.1 Super-resfriamento da água e nucleação de gelo

Termodinamicamente, o congelamento da água é favorecido abaixo de 0 °C. Entretanto, esta mudança de fase é limitada pelos “embriões de gelo”, que é a probabilidade de formação de aglomerados de moléculas estruturadas de maneira semelhante ao gelo. Estes arranjos são utilizados como moldes sobre os quais as demais moléculas de água se alinham para formar um cristal de gelo. A energia livre de superfície, que é a tensão superficial na interface sólido-líquido destes aglomerados, pode ocasionar a desintegração destes embriões, impedindo o seu crescimento e, assim, o congelamento da solução. Com isso, a água entra em um estado metaestável chamado de super-resfriamento. Para que ocorra a formação do gelo, os embriões devem conseguir atingir um determinado volume que seja suficiente para que a energia de cristalização (favorável à ocorrência da transformação) seja maior que a tensão superficial (desfavorável à transformação). Deste modo, os aglomerados possuem um tamanho crítico necessário para que ocorra o seu crescimento e, assim, desencadear o congelamento, constituindo uma barreira de ativação para esta transformação (MARGARITIS; BASSI, 1991; PUMMER et al., 2015; VALI, 1995). Quando a água é capaz de formar embriões de gelo efetivos de forma espontânea, sem núcleos de congelamento, e mudar de fase, é conhecido como nucleação homogênea do líquido. Isto normalmente ocorre em temperaturas consideravelmente baixas, aproximadamente -40 °C (SZYRMER; ZAWADZKI, 1997).

A probabilidade de congelamento é altamente afetada pela presença de algum material que facilite a formação e crescimento dos embriões de gelo. Isto pode ocorrer por meio de estruturas que atuam como nucleadoras de gelo, que são capazes de organizar as moléculas de água de forma semelhante ao arranjo cristalino do gelo, através de interações moleculares como ligações de hidrogênio. Assim, a mudança de fase é catalisada pela redução da energia livre de superfície. Este processo é conhecido como nucleação heterogênea.

Em 1947, Vonnegut procurou substâncias que possuíssem estrutura cristalográfica semelhante ao gelo que atuassem como nucleadoras, partindo da possibilidade de que seriam eficazes em rearranjar as moléculas de água de maneira a promover a sua cristalização. Com isso, descobriram que partículas

de iodeto de prata (AgI) eram capazes de agir desta maneira a $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Com o objetivo de controlar o clima, este composto, começou a ser estudado como ferramenta para manipular o congelamento da água em nuvens (MASON, 1961). Em alguns estudos são apontados vários materiais presentes no ambiente que poderiam apresentar alguma capacidade de nuclear gelo, como diferentes minerais, incluindo argilas (VONNEGUT, 1947). Assim, eventualmente, foram descobertos os núcleos biológicos, como é o caso de *Pseudomonas syringae*.

1.3.2 Nucleação de gelo biológica

A atividade de núcleos de gelo biológicos decorre de uma proteína oriunda de genes *INA*, *i.e.*, *Ice Nuclei Activity*. Nas células, esta proteína está localizada na membrana externa bacteriana (LINDOW, 1989; PALAIOMYLITOU et al., 1998). Por meio do trabalho de Lindow e Govindarajan (1988a), foi demonstrado que a parte hidrofóbica da membrana é essencial para a máxima nucleação de gelo, pois, estas proteínas necessitam estar na presença de fosfolipídios para obterem uma atividade de congelamento significativa.

Além disso, a formação dos núcleos depende da agregação destas proteínas na superfície da célula. Por meio da formação de agregados com várias dezenas de proteínas, os locais de nucleação se tornam maiores e funcionais a temperaturas mais altas, podendo ocorrer o congelamento até $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (GOVINDARAJAN; LINDOW, 1988; MUELLER; WOLBER; WARREN, 1990; RUGGLES; NEMECEK-MARSHALL; FALL, 1993). Este aumento da área que interage efetivamente com a água, permite que a organização de uma quantidade maior de moléculas seja realizada em uma superfície ativa maior, com isso, forma-se um embrião de gelo de tamanho suficiente para desencadear a nucleação (GARNHAM et al., 2011; GRAETHER; JIA, 2001).

Os núcleos de gelo formados apresentam uma distribuição que varia dos mais ativos e menos frequentes, até os menos ativos e mais frequentes. Assim, observa-se que núcleos ativos em temperaturas mais altas apresentam uma concentração proporcionalmente menor, presentes em menos células. Alguns autores sugerem que estas características podem ser usadas como base para classificar os núcleos de gelo (YANKOFFSKY et al., 1981). Os do tipo I tendem a ser os mais raros, e aceleram o congelamento da água super-resfriada acima de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$; os de tipo II atuam entre -5 e $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$; enquanto os de tipo III agem abaixo

de -7 °C. Mueller e colaboradores (1990), propõem que para esta distribuição acontecer em populações homogêneas, ocorre a variação no tamanho dos agregados de proteínas de nucleação de gelo em cada célula. Um exemplo é a função desempenhada pela temperatura na nucleação de gelo realizada pela *P. syringae*, em temperaturas de incubação entre 15 e 20 °C favorecem a manutenção e maior expressão da atividade de congelamento (GURIAN-SHERMAN; LINDOW, 1995; MUELLER; WOLBER; WARREN, 1990; NEMECEK-MARSHALL; LADUCA; FALL, 1993; RUGGLES; NEMECEK-MARSHALL; FALL, 1993). Já em temperaturas acima de 25 e 30 °C apresentam uma diminuição da atividade de congelamento, pois, ocorre uma diminuição da estabilidade dos agregados maiores de proteína devido ao calor. Assim, os de tipo I apresentam maior instabilidade dos núcleos mais eficientes, isto significa, que o congelamento em torno de 0 °C é eliminado mais rapidamente, enquanto a atividade perto -10 °C se mantém por um período maior de tempo sob o calor. A habilidade de nucleação perdida pode ser recuperada com incubação a baixa temperatura, em um processo que envolve a síntese de novas proteínas (NEMECEK-MARSHALL; LADUCA; FALL, 1993; RUGGLES; NEMECEK-MARSHALL; FALL, 1993).

A disponibilidade de nutrientes no meio de cultura de bactérias pode afetar a nucleação de gelo. Nas *P. syringae*, quando inoculadas em um meio com privação de alguns nutrientes, nitrogênio em especial, tem um aumento na expressão de núcleos do tipo I (NEMECEK-MARSHALL; LADUCA; FALL, 1993; POOLEY; BROWN, 1991). Em ambientes que podem ser pobres em determinados nutrientes, como nas células recolhidas de folhas de plantas, a frequência de congelamento tende a ser muito maior em temperaturas altas do que culturas em que o meio é rico e complexo (O'BRIEN; LINDOW, 1988).

1.3.3 Bactérias nucleadoras de gelo

As Gram-negativas são as bactérias com atividade de nucleação de gelo mais estudadas. Pertencem aos gêneros *Pseudomonas*, *Xanthomonas* e *Pantoea* (HIRANO; UPPER, 1995). Apenas algumas espécies destes gêneros possuem um gene como a *inaZ* e expressa a capacidade de auxiliar o congelamento da água. A maioria dos indivíduos que compõe estes grupos é conhecida por sua associação com superfície de plantas (HIRANO; UPPER,

1995; LORV; ROSE; GLICK, 2014). As principais causadoras da formação de gelo em superfícies vegetais, em temperaturas acima de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, são as bactérias nucleadoras de gelo (LINDOW, 1983; LINDOW, STEVEN; ARNY; UPPER, 1982). Além de plantas, estas bactérias nucleadoras foram isoladas de solos, ambientes polares, marinhos, e de água doce (FALL; SCHNELL, 1985; HIRANO; UPPER, 1995; LORV; ROSE; GLICK, 2014; MAKI; WILLOUGHBY, 1978; PIETSCH; VINATZER; SCHMALE, 2017; WILSON; KELLEY; WALKER, 2006). Outras bioaerossóis já tiveram esta atividade descrita, como pólen (DIEHL *et al.*, 2002; PUMMER *et al.*, 2012), fungos parasíticos e de vida livre (FRÖHLICH-NOWOISKY *et al.*, 2015; GONÇALVES; MASSAMBANI, 2011; MORRIS *et al.*, 2013; POULEUR *et al.*, 1992). Dentre estes organismos, algumas espécies de fungos ascomicetos em sua fase anamorfa pertencentes ao gênero *Fusarium* são capazes de congelar em temperaturas mais quentes que $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (POULEUR *et al.* 1992).

1.3.4 Influência dos aerossóis e bioaerossóis nas nuvens

Como supracitado, os aerossóis integram uma abundante dispersão de partículas suspensas na atmosfera, sendo os bioaerossóis os de origem biológica, todos importantes na formação das nuvens. Esta última classificação também inclui as células de diversos microrganismos, sendo elas viáveis ou não (BAUER, HEIDI *et al.*, 2003; BURROWS *et al.*, 2009; SMITH, 2013). Os aerossóis participam na formação das gotículas de água líquida, atuam na forma de núcleos de condensação de nuvens e são essenciais para o surgimento das nuvens. No estado de supersaturação, quando a umidade relativa está ligeiramente acima de 100%, típica na formação de nuvens, a presença destes núcleos de condensação facilita o crescimento de aglomerados de moléculas de água na fase líquida a partir do vapor, eles adsorvem e promovem a condensação.

Diversos tipos de aerossóis encontrados na atmosfera, orgânicos e inorgânicos, naturais e antropogênicos, podem apresentar atividade de núcleos de condensação em variados níveis (SUN; ARIYA, 2006), o que inclui também os microrganismos (BAUER *et al.*, 2003; MÖHLER *et al.*, 2007, 2008). Algumas bactérias, como espécies do gênero *Pseudomonas*, demonstraram potencial

para atuarem como núcleos de condensação de nuvens (AHERN *et al.*, 2007; EKSTRÖM *et al.*, 2010; RENARD *et al.*, 2016).

As parcelas de ar presentes dentro das nuvens, ao alcançarem camadas de ar mais frias em maior altitude, alcançam um ambiente em que a água está sujeita a um super-resfriamento. Esta água super-resfriada pode ocorrer devido à ausência de agentes nucleadores de gelo em uma camada da nuvem, sendo muito perigosos a navegação, pois ao tocarem na aeronave, congelam imediatamente. Alguns autores relataram a presença de gotículas de água líquida a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ nestas condições (HEYMSFIELD; MILOSHEVICH, 1993). Outra influência importante dos aerossóis na atmosfera é a sua habilidade de atuarem como nucleadores de gelo.

Por meio da metaestabilidade da água super-resfriada, algumas transformações podem ocorrer rapidamente em nuvens abaixo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (FAN *et al.*, 2016; MURRAY *et al.*, 2012). Nestas condições, a pressão de vapor sobre a água líquida é maior do em relação aos cristais de gelo. Assim, as partículas congeladas conseguem crescer consumindo a umidade das gotículas líquidas através da fase gasosa, sendo este processo conhecido como Wegener-Bergeron-Findeisen (MASON, 1961; MURRAY *et al.*, 2012). Com este processo, a formação de partículas de gelo maiores é favorecida. Desta forma, a glaciação, formação de gelo nas nuvens, aumenta a probabilidade de precipitação (LOHMANN; FEICHTER, 2005; STORELVMO; HOOSE; ERIKSSON, 2011). Análises realizadas por satélite demonstram que nuvens com fases congeladas são um dos principais mecanismos de chuva sobre áreas continentais (MÜLMENSTÄDT *et al.*, 2015). Um outro mecanismo seria a “chuva quente”, decorrente apenas da fase líquida. Neste processo, a origem das gotas de precipitação é por meio da colisão e coalescência de gotículas de água menores que são formadas através dos núcleos de condensação (MÖHLER *et al.*, 2007). Isto ocorre mais comumente sobre oceanos em regiões tropicais (MÜLMENSTÄDT *et al.*, 2015).

Grande parte dos materiais encontrados em alta quantidade na atmosfera, como é o caso das cinzas vulcânicas, fuligem, poeira dos desertos, e fragmentos de minerais, apresentam atividade de nucleação de gelo em torno de $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os núcleos de gelo biológicos como *P. syringae* são ativos em temperatura de até $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (MURRAY *et al.*, 2012), portanto bem mais quentes. Assim, estas bactérias

podem contribuir para mecanismos de multiplicação de gelo nas nuvens (ARAUJO et al., 2019). Neste caso, o processo Hallet-Mossop é muito importante, pois ocorre na faixa de temperatura de -3 à -8 °C, coincidindo com o intervalo em que as bactérias são ativas. Por meio deste processo, ocorre a solidificação de gotículas de água líquida quando se chocam com as partículas de gelo, originando em recobrimento congelado. Este recobrimento pode se fragmentar, produzindo estilhaços e contribuindo para o aumento da concentração de partículas de gelo presentes na nuvem (HALLETT; MOSSOP, 1974; MORRIS et al., 2014). Portanto, as bactérias podem ser eficientes na glaciação atmosférica, impactando a precipitação, inclusive na formação de granizos.

1.4 Impacto das tempestades de granizo

As tempestades de granizo, na maioria das vezes, causam danos expressivos em diversos setores da sociedade, mas notadamente em edifícios, agricultura e automóveis (BALTAÇI; AKKOYUNLU; TAYANC, 2018). Em 28 de junho de 2006, por exemplo, na Alemanha, os danos chegaram a cerca de 250 milhões de euros (ARNOLDUSSEN; HÖPPE, 2014; KUNZ, MICHAEL; PUSKEILER, 2010). Em 2013, no final de julho, uma série de tempestades de granizo varreu parte da Alemanha e causou prejuízo em torno de 2,8 bilhões de euros (PUNGE; KUNZ, 2016). Em junho de 2014 as tempestades de granizo foram responsáveis por danos de 2,3 bilhões de euros na França, Bélgica e Alemanha, segundo Zimmerli (2005). Outro exemplo do elevado prejuízo que esse tipo de evento acarreta é a tempestade de granizo que ocorreu em Sydney, numa tarde de 14 de abril de 1999. Foi o desastre natural mais caro da história de seguros da Austrália, com danos segurados superando 1,7 bilhões de dólares. O valor seria muito maior se fossem incluídos os danos não segurados (SCHUSTER; BLONG; SPEER, 2005).

Segundo Kunz (2009), no estado de Baden-Württemberg, sudoeste da Alemanha, 38% de todos os danos causados por eventos naturais sobre edifícios no período 1986-2004 pode ser atribuído a eventos convectivos profundos. Quase um quarto do prejuízo associado a esses eventos naturais é causado exclusivamente por granizo. Apesar do dano substancial associado com a queda

de granizo, o conhecimento sobre o assunto ainda é limitado (KUNZ; SANDER; KOTTMEIER, 2009).

No caso particular do Brasil, existem poucos estudos científicos sobre o tema. Por outro lado, os danos associados à queda de granizo são recorrentes. Por exemplo, segundo a Defesa Civil do estado do Rio Grande do Sul, em abril de 2004 um forte temporal atingiu o município de Estrela Velha e derrubou galpões, postes, destelhou casas, deixou moradores sem energia elétrica e cerca de 400 pessoas desabrigadas. No total, calcula-se que o prejuízo tenha chegado a R\$ 1 milhão. No trabalho de Nedel e colaboradores (2012) foram analisados vinte anos de dados entre 1989 e 2009 para o Rio Grande do Sul. Os autores observaram que houve 290 e 132 eventos registrados na primavera e inverno, respectivamente. Os autores ainda afirmam que no ano de 2007, dos 67 municípios atingidos por eventos de granizo, 33 decretaram situação de emergência (NEDEL; SAUSEN; SAITO, 2012). Em relação aos cenários futuros, o relatório do IPCC (2012) indica que não há concordância entre os estudos. Segundo McMaster (1999), Niall e Walsh (2005) não deverá haver aumento nas perdas futuras causadas por tempestades de granizo na Austrália. Por outro lado, Botzen e colaboradores (2010) identificam um aumento significativo de danos na agricultura da Holanda (chegando a 200% até 2050).

Todavia, é importante ressaltar que os estudos, além de poucos, diferem tanto em metodologia quanto em localização, o que impede um resultado mais conclusivo sobre o assunto. Há, por outro lado, instrumentos capazes de detectar o granizo nas nuvens.

1.5 Monitoramento das tempestades de granizo usando radar polarimétrico

A tempestade de granizo é um fenômeno meteorológico significativo do ponto de vista de danos à agricultura e à propriedade. Os eventos de granizo são limitados no tempo e no espaço, e redes de observação terrestres podem fornecer apenas informações parcialmente completas sobre a distribuição espacial do granizo (SKRIPNIKOVÁ; ŘEZÁČOVÁ, 2014).

1.5.1 Radar meteorológico

O radar, acrônimo de *Radio Detection and Ranging*, é um equipamento utilizado como sistema de detecção, localização, monitoramento e caracterização de objetos (hidrometeoros) por meio da transmissão e recepção de ondas eletromagnéticas na faixa de frequência das micro-ondas. Na meteorologia, o radar tem como principal aplicação os fenômenos meteorológicos, na caracterização, previsão das suas severidades e o monitoramento dos sistemas precipitantes, além da previsão de comportamentos futuros (RINEHART, 1991). Historicamente, as pesquisas sobre radar se intensificaram na Segunda Guerra Mundial, onde a principal função do radar era indicar e monitorar a aproximação de navios e/ou aviões de guerra. Todavia, os operadores do radar tinham dificuldade em visualizar os alvos, pois, a precipitação interferia de forma negativa (BATTAN, 1962). Após a Segunda Guerra Mundial, a aplicabilidade do radar foi difundida para outras áreas, bem como, a sua fabricação passou a ser comercial. Assim, com a comercialização, a expansão do uso dos radares e o avanço da tecnologia, surgiram os radares Doppler.

1.5.2 Radares Doppler de dupla polarização

Os radares Doppler são capazes de determinar se os hidrometeoros estão se movendo em direção à antena do radar ou se afastando. Isso é possível porque o transmissor produz pulsos de ondas eletromagnéticas de alta frequência que são direcionados para o duplexador (circuito de micro-ondas não linear), que envia o sinal transmitido para a antena. Estes pulsos possuem uma dada largura e são transmitidos em uma determinada Frequência de Repetição de Pulso (do inglês, *Pulse Repetition Frequency* - PRF). Assim, ao deixar a antena, este pulso interage com o alvo (hidrometeoros) de forma que cada um espalha a energia incidente em diversas direções. Uma fração desta energia dispersada pelos hidrometeoros retorna à antena do radar e o duplexador envia os sinais retro-espalhados para o receptor, amplificando-os.

Em suma, o princípio básico de funcionamento do radar é o de emitir onda eletromagnética em determinada direção e conforme o feixe atinge os alvos na atmosfera, a energia é dispersada pelos alvos e uma fração dessa energia

retorna para o radar. Essa parte de energia que retorna é proporcional à secção transversal de retro-espalhamento que está associado ao tamanho do hidrometeoro, em outras palavras, os hidrometeoros (granizo, graupel, partícula de gelo, neve, chuva) são medidos no espaço e, assim, são detectados (RAGHAVAN, 2013; SAUVAGEOT, 1992). De forma geral, existem radares convencionais que possuem uma polarização única (monopolarização) geralmente horizontal, que enviam e recebem o campo elétrico do pulso em um único plano. Todavia, alguns radares são capazes de operar em dois planos, ou seja, podem realizar estas operações na polaridade vertical e horizontal. Estes radares são conhecidos como de dupla polarização (DOVIK, 2006; DOVIK; ZRNIC, 1993).

Em 2006, os autores Heinselman e Ryzhkov, desenvolveram um trabalho onde fornecem uma visão geral de técnicas para a pesquisa de detecção de granizo usando radares de monopolarização (ORTEGA; KRAUSE; RYZHKOV, 2016). As variáveis polarimétricas medidas pelos radares são sensíveis à forma, ao tamanho, ao estado de fase e à orientação de queda das partículas. Em comparação com uma polarização única, as medições polarimétricas por radar fornecem mais informações para a recuperação da estrutura microfísica de uma nuvem. Eles são capazes de identificar diferentes categorias microfísicas, incluindo o granizo (SKRIPNIKOVÁ; ŘEZÁČOVÁ, 2019a). Porém, o radar meteorológico de polarização única não consegue distinguir entre diferentes tipos de hidrometeoros, mas algumas características nos dados de refletividade, por exemplo, quando há ocorrências de alta refletividade em níveis específicos, podem representar processos físicos que estão relacionados com o crescimento do granizo (SKRIPNIKOVÁ; ŘEZÁČOVÁ, 2019b). No caso do radar de dupla polarização, este não só fornece informações para a classificação de hidrometeoros, mas também pode se mostrar útil para medir o tamanho do granizo dentro da tempestade (HEINSELMAN; HEINSELMAN; ROWE, 2005). Como é o caso da combinação do fator de refletividade horizontal do radar (Z_H) e da refletividade diferencial (Z_{DR}), onde mostra-se eficiente para a discriminação entre chuva pura e granizo devido à orientação mais aleatória das pedras de granizo em queda e sua constante dielétrica inferior em relação às gotas de chuva. Portanto, Z_{DR} baixo associado a Z_H alto é uma certa indicação de granizo (RYZHKOV *et al.*, 2013).

1.5.3 Variáveis polarimétricas

A combinação das variáveis polarimétricas descrevem propriedades microfísicas dos hidrometeoros. Investigar a relação das variáveis polarimétricas com o tamanho do granizo pode ser benéfico para melhorar os avisos de tempestades que produzem granizo. Para o monitoramento de sua ocorrência, é essencial a compreensão dos processos físicos que levam à formação do granizo e a determinação das possíveis assinaturas precursoras associadas à formação e crescimento do granizo (HEINSELMAN; HEINSELMAN; ROWE, 2005). Pesquisas anteriores indicam relações entre variáveis polarimétricas que podem permitir a categorização do tamanho do granizo (por exemplo, Skripniková & Řezáčová, 2019). Destacam-se também, trabalhos que utilizaram a refletividade horizontal (Z_H) e a refletividade diferencial (Z_{DR}) para delimitar as zonas entre granizo e chuva, bem como, a detecção de granizo e análise de perfis verticais para a classificação de graupel e granizo (BRINGI; SELIGA; AYDIN, 1984). O desenvolvimento deste estudo é possível porque a refletividade horizontal (Z_H) é proporcional à potência recebida de um campo elétrico polarizado a partir do volume de resolução do radar (SKRIPNIKOVÁ; ŘEZÁČOVÁ, 2019b). Combinado com outras variáveis polarimétricas, a Z_H pode ser útil para estimar o tamanho máximo de granizo dentro da tempestade (HEINSELMAN; HEINSELMAN; ROWE, 2005). Dado o tamanho e forma da partícula, o gelo produz um Z_H superior à água líquida, devido a diferença na constante dielétrica (SKRIPNIKOVÁ; ŘEZÁČOVÁ, 2019b). Já a refletividade diferencial (Z_{DR}) é obtida a partir da relação entre a potência retornada na horizontal (Z_H) e a potência retornada na vertical (Z_V) e está relacionada com a forma média da partícula, como demonstrado na fórmula:

$$Z_{DR} = 10 \log \left(\frac{Z_H}{Z_V} \right) \quad (1)$$

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

O principal objetivo deste estudo é fornecer uma caracterização da composição microbiológica, igualmente da química e física de amostras das tempestades de granizo na região Sul do Brasil, bem como a proveniência das massas de ar que deram origem a estas tempestades.

2.2 Objetivos específicos

- Quantificar a concentração de bactérias e fungos (em unidades formadoras de colônias/mL);
 - Identificar as bactérias e fungos encontrados;
 - Identificar os elementos químicos presentes no granizo;
 - Investigar a relação das variáveis polarimétricas com o tamanho do granizo;
- Comparar estimativas de tamanho de granizo laboratoriais, *in situ* e provenientes de variáveis polarimétricas.

3 Justificativa

As tempestades relacionadas a tempo severo representam ameaças significativa à vida, propriedade e economia. Portanto, o conhecimento detalhado é importante para a detecção precoce e melhoria da previsão de tempestades e suas características (WAPLER, 2017). No Brasil, é na Região Sul onde se observa a maior incidência de eventos severos (MARCELINO; NUNES; KOBIYAMA, 2006; PINHEIRO; ESCOBAR; ANDRADE, 2014; ZIPSER et al., 2006). Embora os mecanismos associados ao desenvolvimento das tempestades de granizo sejam altamente complexos e não precisamente bem compreendidos (MUSIL *et al.*, 1991; NIALL; WALSH, 2005), sabe-se que certas condições atmosféricas favorecem a formação de granizo. Entre as quais, cabe destacar, a umidade em baixos níveis, instabilidade atmosférica, mudança na direção e velocidade do vento com a altura (cisalhamento do vento), atividade convectiva e temperaturas mínimas acima da média, características geográficas e altura do nível de congelamento (MCMMASTER, 1999).

Conforme apresentado no trabalho de Kunz e colaboradores (2009), as tempestades representam uma ameaça significativa para a sociedade. Apesar de suas características em escala local, tempestades severas e eventos extremos associados com chuvas intensas, granizo, rajadas de vento ou tornados, causam danos consideráveis à agricultura, edifícios ou instalações de infraestrutura. A Região Sul do Brasil é grande produtora de café, soja, arroz, milho, trigo, maçã e laranja, além de destacar-se também pelo extrativismo e pecuária, sendo de extrema importância para a economia brasileira (IBGE, 2021). Sendo as principais culturas da região extremamente dependentes de condições climáticas favoráveis, o conhecimento acerca das tempestades torna-se estratégico.

Por outro lado, as bactérias e fungos transportadas pelo ar têm gerado muito interesse nos últimos anos, devido principalmente à sua onipresença e às evidências acumuladas de sua atividade na atmosfera (DELORT *et al.*, 2010). Estudos anteriores indicam que habitats terrestres, em especial solos e superfícies foliares, são as principais fontes de ambos. Além disso, os patógenos bacterianos e fúngicos de culturas agrícolas e pecuárias podem ser transportados pela atmosfera (BURROWS *et al.*, 2009; GONZÁLEZ;

LANDERAS; MENDOZA, 2000; ROMANTSCHUK; BAMFORD, 1986). Ao compreender o impacto das emissões naturais e antropogênicas na fase de desenvolvimento dos cristais de gelo no interior das nuvens, oferece-se uma janela importante para o desenvolvimento das modernas ferramentas de previsão.

Neste trabalho, será analisado a composição microbiológica dos granizos e sua origem; paralelamente, as análises física e química, predominantes em amostras de granizo, terão como intuito de contribuir para o entendimento dos sistemas convectivos, comuns na Região Sul do Brasil.

4 Metodologia

Neste capítulo, serão apresentados os métodos aplicados para as análises de microbiologia, química e propriedades físicas realizadas com o objetivo de caracterizar o granizo amostrado de tempestades oriundas da região Sul do Brasil. Aqui, irá também abordar como ocorrerá a utilização dos dados do Radar Meteorológico do Oeste (RMO). Além disso, descreverá como será realizado a análise de trajetória das massas de ar.

4.1 Locais de coleta

A região estudada está localizada na parte sul do Brasil e é composta por dois estados (Santa Catarina e Paraná) e por quatro municípios (Barracão, Dionísio Cerqueira, Guarujá do Sul e Princesa) (Figura 1). Este local contém um polo agropecuário extremamente diversificado (IBGE, 2021), conferindo uma produção de cereais, fumo e cana de açúcar, bem como, de extração de madeira e de erva-mate (IBGE, 2021; IPARDES, 2021). A atmosfera da região apresenta uma abundante diversidade de aerossóis que são essencialmente emitidos pela frota de veículos automotores e indústria (BEAL *et al.*, 2021). Quanto às emissões gasosas, as fontes móveis são responsáveis por 98% das emissões de Óxidos de Nitrogênio (NO_x), 95% de Óxidos de Enxofre (SO_x), 90% de Monóxido de Carbono (CO), 82% de Hidrocarbonetos (HC), e 89% de Material Particulado (MP) (GRAUER *et al.*, 2013).

As variáveis climáticas da região demonstram valores de umidade relativa superior a 70% (BEAL *et al.*, 2020a, 2021), média mensal de precipitação maior que 140 mm (BARROS; CASTANEDA; DOYLE, 2000; BARROS; DOYLE; CAMILLONI, 2008), velocidade do vento variando entre 5,4 km/h e 21,9 km/h e direções predominantes oriundas da direção nordeste (BEAL *et al.*, 2020a). Esta área é amplamente estudada por ser classificada como a região de mais fortes tempestades do globo (ZIPSER *et al.*, 2006). Esse local de coleta foi escolhido por dispor da presença de rede de monitoramento (*hailpads*), bem como, voluntários que se disponibilizaram em coletar as amostras (para maiores informações, vide item 4.3).

A seguir serão descritos os detalhes dos locais de coleta: Barracão (PR), Dionísio Cerqueira (SC) e Guarujá do Sul (SC).

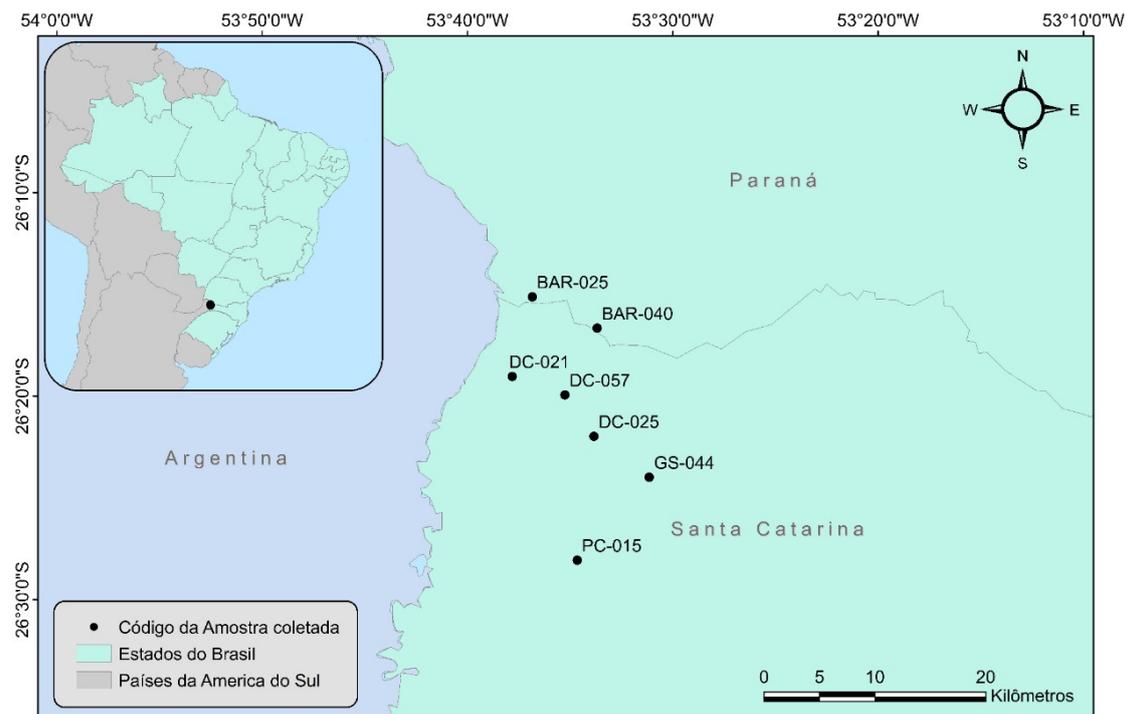


Figura 1 - Região estudada, composta pelos estados de Santa Catarina e Paraná. Ao todo são analisados quatro municípios, sendo eles: Barracão - PR, Dionísio Cerqueira - SC, Guarujá do Sul - SC e Princesa - SC.

4.1.1 Barracão

Os principais pontos de coleta estão localizados no município de Barracão, no estado do Paraná. Barracão está situado na região sudoeste do estado, que está localizado na coordenada $26^{\circ}15'09''S$ de latitude e $53^{\circ}38'06''W$ de longitude (Apêndice A – Tabela A1), em uma altitude de 820 m (IPARDES, 2021).

O que se conhece hoje como Barracão foi até 1914, um povoado situado nas cabeceiras dos Rios Capanema e Peperi Guaçu, na fronteira com a República do Prata. Sendo dividido, em 1916, entre dois estados, Paraná e Santa Catarina. A parte referente ao Paraná permaneceu com o nome de Barracão e a parte pertencente a Santa Catarina foi denominada de Dionísio Cerqueira (PREFEITURA MUNICIPAL DE BARRACÃO, 2021).

Atualmente, a região apresenta uma área de terreno total de 171.402.000 m² e 25.024.692 m² de área urbanizada (IBGE, 2021). A cidade de Barracão está inserida no planalto basáltico da Bacia do Paraná (ALMEIDA, 2017; PAISANI; PONTELLI; ANDRES, 2008). A região também apresenta a maioria da cultura do café do Brasil (ALMEIDA, 2017). O solo apresenta alta concentração de

nutrientes, alta fertilidade natural e maior profundidade, apresentando assim grande potencial para uso agrícola (SANTOS; ZARONI; CLEMENTE, 2020).

4.1.2 Dionísio Cerqueira

O município de Dionísio Cerqueira está situado na região noroeste do estado de Santa Catarina, que está localizado na coordenada 26°15'41"S de latitude e 53°37'15"W de longitude (Apêndice A – Tabela A1), estando a 830 m acima do nível do mar (IPARDES, 2021). Sua criação ocorreu em 14 de março de 1954 (Lei Estadual de Santa Catarina nº 86.133). Possui esse nome em homenagem ao General Dionísio Cerqueira, Ministro das Relações Exteriores do Brasil, que na época foi o encarregado por solucionar os conflitos fronteiriços entre Brasil e Argentina (FERRARI, 2013).

Atualmente, a região apresenta uma área de terreno total de 378,843 km² (IBGE, 2021). A cidade está situada no bioma Mata Atlântica, de clima temperado, com temperatura média entre 18 °C e 36 °C e precipitação anual de 1.700 a 2.000 mm (SANTOS, 2018).

4.1.3 Guarujá do Sul

A cidade de Guarujá do Sul localiza-se na região extremo oeste catarinense, mais precisamente na coordenada 26°23'4"S de latitude e 53°31'15"W de longitude, estando em uma altitude de 707 m (IPARDES, 2021).

Sua origem deu-se por meio do desmembramento de terras pertencentes a Dionísio Cerqueira (Resolução nº 10 de 12 de novembro de 1960). Sua colonização deu-se através de imigrantes descendentes de italianos e alemães advindos do Rio Grande do Sul (PREFEITURA MUNICIPAL DE GUARUJÁ DO SUL, 2018)

A base econômica deste município é a exploração agropecuária (IBGE, 2021). O clima da região é, de maneira geral, clima temperado, sem estação seca definitiva, com verão ameno, sendo a temperatura média do mês mais quente em torno de 22 °C. A precipitação total anual varia de 1790 a 2280 mm, com umidade relativa do ar variando entre 73 e 82% (ICEPA, 2005).

4.2 Período de coleta

Foram realizadas coletas de granizo de três eventos diferentes. Em Guarujá do Sul, a coleta de uma amostra ocorreu no dia 30 de junho de 2020. Em Barracão foi realizada a coleta de uma amostra no dia 28 de julho de 2020. Em Dionísio Cerqueira, as coletas foram realizadas no dia 15 de agosto de 2020, resultando em 4 amostras. Em alguns dias, houve problemas na coleta, no local de coleta e/ou no transporte da coleta, sendo assim essas amostras foram desconsideradas da análise (Tabela 1), como é o caso do município de Princesa.

Tabela 1 - Detalhes sobre o período de coleta e número de amostras coletadas

Data	Local	Número de amostras
30 de junho de 2020	Guarujá do Sul	1
28 de julho de 2020	Barracão	1
15 de agosto de 2020	Dionísio Cerqueira	4

NOTA: A amostra oriunda do município de Princesa (SC) teve sua análise microbiológica inviabilizada, por conta de derretimento.

4.3 Amostradores de granizo

As amostras foram coletadas em recipientes de polietileno de alta densidade (BEAL *et al.*, 2020a; FONTENELE; PEDROTTI, 2009; JUNG *et al.*, 2013; LEAL *et al.*, 2004) distribuídos para moradores da área estudada que se tornaram voluntários desse projeto.

4.3.1 Rede de monitoramento

Em 2014, uma rede de detecção de granizo foi instalada na região composta por seis municípios localizados na tríplice fronteira entre os estados do Paraná e Santa Catarina (Brasil) e Misiones (Argentina). Os municípios de Barracão (PR), Bom Jesus do Sul (PR), Flor da Serra do Sul (PR), Dionísio Cerqueira (SC), Guarujá do Sul (SC) e Princesa (SC) compõem essa rede.

Por meio da existência dessa rede, a partir de 2016, foram entregues recipientes para a coleta e armazenamento de granizo para os voluntários que colaboravam com o projeto de detecção de granizo (BEAL *et al.*, 2020a). Os recipientes entregues foram nomeados com as iniciais do município onde foi deixado para a coleta. Para cada um desses pontos anota-se o endereço, latitude e longitude e telefone como meio de contato.

4.3.2 Coleta de granizo

Para a coleta do granizo, os voluntários são notificados, via telefone, sempre que ocorre a possibilidade de granizo acontecer. Os granizos são coletados após a queda no solo. Após a coleta dos granizos, os recipientes são armazenados em freezer. É necessário que ocorra essa refrigeração para que não haja derretimento dos granizos. Após a notificação de coleta, as amostras são recolhidas com os voluntários, acondicionadas em caixas térmicas com gelo seco para a conservação, vedadas, transportadas até o campus da Universidade de São Paulo (USP) em São Paulo e armazenadas em freezer à -20 °C. Para a coleta das amostras com os voluntários, foi estabelecido um prazo de um mês para a organização da logística.

4.4 Análises laboratoriais

O material coletado foi submetido à diversas análises para se obter a caracterização da microbiota, dos íons e propriedades físicas do granizo. Na tabela 2 apresenta-se um resumo dos equipamentos e períodos de coleta, parâmetros medidos, equipamentos de análise e do local de análise.

Tabela 2 - Resumo da metodologia: equipamento de amostragem, instrumento de análise do material, parâmetros medidos, local onde a análise foi realizada e a quantidade de granizos que foram analisados para cada parâmetro medido

Data	Equipamento de coleta	Parâmetros medidos	Instrumento de análise	Local de análise	Granizos analisados
30 de junho de 2020	Recipientes de polietileno	Íons (Cátions e ânions)	Cromatógrafo de Íons (Metrohm)	IAG (USP) ¹	11
		Massa	Balança eletrônica analítica - Marte Científica (AD 330)	IQ (USP) ²	6
		Diâmetro	Paquímetro digital - Mitutoyo	IQ (USP) ²	6
		Tipo bacteriano e fúngico UFC/mL	MALDI-TOF	IAL ³	6
28 de julho de 2020	Recipientes de polietileno	Íons (Cátions e ânions)	Cromatógrafo de Íons (Metrohm)	IAG (USP) ¹	11
		Diâmetro	Paquímetro digital - Mitutoyo	IQ (USP) ²	6
		Massa	Balança eletrônica analítica - Marte Científica (AD 330)	IQ (USP) ²	6
15 de agosto de 2020	Recipientes de polietileno	Íons (Cátions e ânions)	Cromatógrafo de Íons (Metrohm)	IAG (USP) ¹	11
		Massa	Balança eletrônica analítica - Marte Científica (AD 330)	IQ (USP) ²	6
		Diâmetro	Paquímetro digital - Mitutoyo	IQ (USP) ²	6
		Tipo bacteriano e fúngico UFC/mL	MALDI-TOF	IAL ³	6

NOTA: ¹IAG (USP) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG), Universidade de São Paulo (USP). Laboratório de Análise dos Processos Atmosférico (LAPAT), São Paulo, Brasil.

²IQ (USP) – Instituto de química (IQ), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, Brasil.

³IAL – Instituto Adolfo Lutz, Centro de Parasitologia e Micologia, Departamento de Micologia Ambiental, São Paulo, Brasil

4.4.1 Análise física

Foram mensurados massa, volume, diâmetro e densidade de 18 pedras de granizo antes de descontaminar sua superfície. A caracterização física das amostras de granizo consiste no cálculo das médias aritméticas das grandezas massa, volume, diâmetro e densidade dos granizos de cada ponto de coleta (TEMKIV *et al.*, 2012). Os procedimentos para essas medições ocorrem em ambiente refrigerado para evitar a perda de material por derretimento durante o manuseio das pedras.

4.4.1.1 Massa

A medida da massa foi realizada em 18 amostras de granizo dos eventos ocorridos. A análise ocorreu três meses após o material ser coletado.

Na medição da massa dos granizos, seguiu-se a metodologia proposta por Šantl-Temkiv *et al.* (2012), e outras referências na área (BEAL *et al.*, 2020b; ŠANTL-TEMKIV *et al.*, 2013; TSAY, 2017). O procedimento ocorreu em câmara fria, operando à 10 °C. Foi utilizada uma balança analítica e a massa de cada granizo foi medida três vezes. Após essa etapa, foram realizados cálculos aritméticos para a determinação da média da massa.

4.4.1.2 Diâmetro

Para dimensionar o diâmetro, utiliza-se o paquímetro para medir o granizo em três eixos ortogonais. Os granizos não têm uma circunferência perfeita (Anexo A – Figura AA1), devido a isso faz-se a média aritmética dessas três medidas. Esse procedimento é realizado em câmara fria e foram analisados 18 granizos de cada tempestade analisada.

4.4.1.3 Volume

Em alguns trabalhos, o volume é mensurado pelo método de imersão, onde é submergido cada pedra de granizo em uma proveta preenchida com água destilada resfriada, a diferença de volume é equivalente ao volume do granizo (ŠANTL-TEMKIV *et al.*, 2012; TSAY, 2017). Knight e Heymsfield (1983) alegam que esse método é válido apenas quando o gelo medido é impermeável. Essa metodologia não pôde ser seguida porque, nos testes realizados, estava ocorrendo perda de volume por derretimento. Assim, foi considerado que o

granizo se assemelha ao formato de uma esfera (KNIGHT; HEYMSFIELD, 1983; KNIGHT, 1986) (Anexo A – Figura AA1). Portanto, para a determinação do volume médio das pedras de granizo empregam-se os dados adquiridos na fase de medição do diâmetro para o cálculo do volume (Equação 2).

$$v = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (2)$$

Onde v é o volume estimado e r é o raio médio do granizo amostrado.

4.4.1.4 Densidade

Para obter a densidade dos granizos amostrados, é realizado o cálculo da Equação 3.

$$D = \frac{m}{v} \quad (3)$$

Onde m é a massa mensurada do granizo amostrado e v é o volume calculado do granizo coletado.

4.4.2 Descontaminação das pedras de granizo

O processo de descontaminação é realizado nas amostras de granizo destinadas às análises microbiológicas e ocorre posteriormente à análise física. Ao todo, foram descontaminados 18 granizos amostrados.

Na descontaminação dos granizos, seguiu-se a metodologia proposta por Šantl-Temkiv *et al.* (2012). Resumidamente, em cada amostra é realizado o enxágue com uma mistura de 1% de cloreto de benzalcônio em uma solução de 70% de etanol, seguido por um enxágue final com água deionizada estéril.

Para a análise dos brancos – granizos feitos em laboratório com água deionizada estéril – utilizou-se a metodologia aplicada em outros trabalhos (BEAL *et al.*, 2021; MICHAUD *et al.*, 2014; ŠANTL-TEMKIV *et al.*, 2013, 2012; TSAY, 2017). Os brancos foram submetidos a uma simulação de queda no solo e processados com o mesmo protocolo que os granizos coletados, e os dados resultantes foram usados para validar o protocolo de descontaminação.

4.5 Análise Microbiológica

4.5.1 Cultivo da microbiota

Após o processo de descontaminação das amostras, cada granizo é inserido em um tubo tipo *ependorf* (microtubo) estéril, à temperatura ambiente e em condições assépticas dentro de um fluxo laminar para o descongelamento controlado.

Para o cultivo, cada granizo analisado tem uma alíquota de 100 µL inoculada por espalhamento em placas com o meio sólido R2A (REASONER; GELDREICH, 1985) (Apêndice B) para o cultivo e isolamento de bactérias (MICHAUD *et al.*, 2014; ŠANTL-TEMKIV *et al.*, 2013, 2012) e meio de cultura Sabouraud Dextrose ágar para cultivo e isolamento de fungos (SABOURAUD, 1892). Esse cultivo é feito em triplicata e as placas são incubadas a 30 ± 2 °C em condições aeróbicas, por sete dias. Posteriormente à incubação, as colônias formadas são contadas e caracterizadas de acordo com a cor, forma, relevo, tamanho e tipo de borda (Anexo A – Figura AA2).

4.5.2 Identificação da microbiota

Após o cultivo, os microrganismos foram enviados para a identificação. A metodologia utilizada para identificação das espécies de bactérias e fungos isoladas foi a espectrometria de massas. Este processo foi realizado no Núcleo de Micologia do Instituto Adolfo Lutz pela pesquisadora Dra. Dulcilena de Matos Castro e Silva.

A técnica MALDI-TOF MS (*Matrix-Assisted Laser Desorption Ionization-Time of Flight Mass Spectrometry*) foi utilizada de acordo com os padrões MALDI Biotyper (BRUKER Daltonics, EUA) (WILKENDORF *et al.*, 2020). As bactérias isoladas foram inoculadas em tubos contendo ágar tripton de soja (TSA) e incubadas por 24 horas em temperatura de 28 ± 2 °C. Após este período, uma pequena quantidade de colônias foi inoculada em 300 mL de água ultrapura em um microtubo de 1,5 mL. A solução foi homogeneizada até a dispersão das células e então se adicionou 900 µL de etanol 99%. Após a adição, a solução foi centrifugada a 18.000 RPM por dois minutos e o sobrenadante foi descartado.

O microtubo ficou aberto por cinco minutos para evaporação total do etanol. Após este tempo, adicionou-se 50 µL de ácido fórmico 70%, e o tubo foi homogeneizado em agitador vórtex por um minuto. Depois desse período, se adicionou 50 µL de acetonitrila e o tubo foi levado ao vórtex novamente por mais um minuto. Terminado este processo, o tubo passou pela centrifuga a 18.000 RPM por mais dois minutos. Para a transferência ao aparelho se utilizou 1 µL do sobrenadante adicionado de 1 µL de matriz para leitura (reagente próprio do instrumento) (REEVE; BACHMANN, 2019).

4.6 Ecologia microbiana

Os índices de diversidade de Shannon (Equação 4) e Simpson (Equação 5) (ODUM, 1971) foram calculados através da abundância das espécies de bactérias existentes nos granizos estudados.

Shannon:

$$H = - \sum \left(\frac{n_i}{N} \right) \log \left(\frac{n_i}{N} \right) \quad (4)$$

Simpson:

$$S = 1 - C \quad (5)$$

$$C = \sum \frac{n_i(n_i-1)}{N(N-1)} \quad (6)$$

Onde n_i refere-se ao valor de abundância para cada espécie e N é o total de abundância.

Aos valores dos índices de diversidade obtidos foi aplicada a técnica "*Jack-knife*" (MAGURRAN, 1988), para estimar os intervalos de confiança dos índices de diversidade. Os índices de uniformidade (Equação 7) (PIELOU, 1966), dominância (Equação 8) (SIMPSON, 1949) e de similaridade (Equação 9) (SORENSEN, 1948) também foram calculados baseados nos dados de abundância.

Uniformidade:

$$x = \frac{H}{\log S} \quad (7)$$

Onde S é o número de espécies

Dominância:

$$C = \sum \left(\frac{n_i}{N} \right)^2 \quad (8)$$

Similaridade:

$$S = \frac{2c}{a+b} \quad (9)$$

Onde a é o número de espécies encontrada na comunidade A, b é o número de espécies encontrada na comunidade B e, c é o número de espécies comuns às duas comunidades.

4.7 Dados meteorológicos

Os dados de velocidade e direção do vento, umidade relativa do ar, temperatura e precipitação, referentes aos dias coletados foram obtidos na "Estação Meteorológica Automática de Dionísio Cerqueira" localizado no município de Dionísio Cerqueira em Santa Catarina (coordenadas: 26°17'24"S, 53°37'48"W e altitude 810 m), administrado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

4.8 Análise das condições meteorológicas

As análises climatológicas foram retiradas do Boletim técnico do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) referente aos dias analisados (CPTEC, 2020).

Em julho e agosto ocorreram os dias mais secos do ano. As coletas ocorreram no inverno, sendo o frio mais intenso associado a massas de ar de origem polar. O local de coleta é conhecido por ocorrer geadas (SIMEPAR, 2020), além de nevoeiros como outro fenômeno típico (SIMEPAR, 2020). A temperatura média do ar apresentou valores ligeiramente acima da média climatológica para os meses estudados. O inverno demonstrou grandes oscilações de temperatura em intervalos de tempo de poucos dias. Nos meses junho, julho e agosto observou-se a ocorrência de vários dias consecutivos secos e mais quentes que o habitual para a estação, intercalados com períodos curtos de frio intenso (CPTEC, 2020).

4.9 Análise de trajetória

O modelo NOAA HYSPLIT foi utilizado para obter as trajetórias individuais (STEIN *et al.*, 2015) dos dias coletados e estimar a direção predominante da massa de ar considerando como ponto central o local de coleta (Barracão, Dionísio Cerqueira e Guarujá do Sul). Utilizou-se trajetórias para trás (*backward*) com duração de 96 horas iniciando as 00h e considerando os 3 dias coletados (30 de junho de 2020, 28 de julho de 2020 e 15 de agosto de 2020). Para o método de cálculo do movimento vertical utilizou-se o modelo de velocidade vertical, e a meteorologia foi a GDAS (1 degree, global, 2006-present) apresentado 6 alturas da camada (20 m, 100 m, 500 m, 1000 m, 5000 m, 10000 m). As cores das linhas indicam diferentes altitudes da massa de ar, sendo a linha vermelha representa altitudes de chegada de 20 m e 1000m, a linha azul refere-se a altitudes de chegada de 100 m e 5000 m e a linha verde representa altitudes de chegada de 500 m e 10000 m. Cada ponto na trajetória representa um período de 6 horas.

4.10 Análise estatística

O Teste de Mann Whitney é utilizado para comparar tendências centrais de duas amostras independentes de tamanhos diferentes (MANN; WHITNEY, 1947). Esse teste foi utilizado para verificar se as amostras pertencem ou não a uma mesma população. Para aplicar esse teste, as variáveis devem ser medidas em escala ordinal ou numérica. A aplicabilidade desse teste é relevante quando a amostra é pequena, a variável numérica não demonstra uma distribuição normal, não há homogeneidade das variâncias e/ou as pressuposições necessárias para realizar um teste paramétrico não foram atendidas. Assim, considerando os dados comparados, a hipótese de nulidade que será aceita ou rejeitada afirma que a distribuição das variáveis é a mesma. Para calcular o teste de Mann Whitney utilizam-se as equações:

$$U_n = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - R_1 \quad (10)$$

$$U_n = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2+1)}{2} - R_2 \quad (11)$$

Onde, U_n é a estatística W; R_1 é a soma dos postos do grupo 1, n_1 é o número de casos do grupo 1, R_2 é a soma dos postos do grupo 2 e n_2 é o número de casos do grupo 2.

O valor de U corresponde ao grupo que deve ser escolhido (menor valor de n), para determinar se rejeita ou aceita a hipótese nula. Para isso, fixa-se um valor de significância ($\alpha=0,05$) e compara-se o valor obtido na equação 12 com os valores críticos da distribuição normal padrão.

$$z = U - \left(\frac{\frac{(n_1 n_2)}{2}}{\sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{12}}} \right) \quad (12)$$

Assim, se o valor de Z indicar um $p < 0,05$, rejeita-se a hipótese de nulidade. Neste caso, aplicou-se este teste para verificar se a população de bactérias dos granizos da tempestade do dia 30 de junho de 2020 é a mesma encontrada nos granizos amostrados no dia 15 de agosto de 2020. O dia 28 de julho não foi analisado, pois, não ocorreu crescimento microbiano.

4.11 Análise de íons

O estudo foi realizado com o cromatógrafo de íons Metrohm no LAPAT (IAG/USP).

A análise de íons foi realizada com 11 granizos de cada ponto amostrado, totalizando 10 mL de cada amostra. Estes foram higienizados com água para remover impurezas, sendo então inseridos em tubos e foram agitados por uma hora e meia para otimizar a extração dos íons dos granizos. Na sequência, a solução foi filtrada com uma seringa e um filtro Millex (Milipore) de 0,22 μm , que havia sido previamente condicionado e então adicionada no cromatógrafo de íons. Para os cátions a corrida dura aproximadamente 20 minutos por amostra enquanto para os ânions a corrida dura 27 minutos por amostra. Por meio desse cromatógrafo é possível identificar cátions (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^+ e Mg^{2+}) e ânions (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}). A separação dos cátions ocorreu em uma coluna analítica Metrosep C 4 (150,0 mm X 4,0 mm), uma solução eluente de ácido oxálico (27 mmol/L) e uma taxa de fluxo de 0,9 ml/min. Para os ânions, a separação ocorreu em uma coluna analítica Metrosep A Supp 5 (250 mm X 4,0 mm), uma solução eluente de Na_2CO_3 (4 mmol/L) e NaHCO_3 (1 mmol/L) e uma taxa de fluxo de 0,7 ml/min).

4.12 Estimativa do tamanho do granizo usando radar polarimétrico

4.12.1 Radar Meteorológico do Oeste (RMO)

O RMO é um radar de dupla polarização (*i.e.*, emite e recebe sinais orientados na horizontal e na vertical), Doppler e banda S (*i.e.*, faixa de comprimento de onda que varia de 8 a 15 cm). Fornece mapas de precipitação a cada 328 segundos, com resolução espacial de 2 km x 2 km. Para varreduras em modo vigilância (*i.e.*, sem alvos, associado a tempestades) atua com área circular de 400 km, quando em operação com alvos próximos atua à 240 km, diminuindo sua abrangência para melhor qualidade dos dados. O RMO está posicionado no município de Chapecó – SC, especificamente nas coordenadas 27°05'47"S de latitude e 52°37'06"W de longitude e, em 822 m de altitude.

4.12.2 Variáveis polarimétricas

Para as análises propostas a partir do radar, são utilizados os dados polarimétricos de refletividade horizontal (Z_H) e refletividade diferencial (Z_{DR}) como entrada para obter a refletividade diferencial do granizo (H_{DR}). A refletividade horizontal (Z_H) é a radiação retro-espalhada no plano horizontal polarizado, sendo expressa em dBZ e representada pela equação (13) (SELIGA; BRINGI, 1976).

$$Z_H = \left(\frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K_w|^2} \right) \langle |S_{HH}|^2 \rangle \quad (13)$$

Onde, λ é o comprimento de onda do radar, S_{HH} é a radiação retro-espalhada horizontalmente e é o fator relacionado à constante dielétrica da água dado pela equação (14).

$$K_w = \frac{\epsilon_w - 1}{\epsilon_w + 1} \quad (14)$$

A refletividade diferencial (Z_{DR}) é obtida por meio da combinação da refletividade horizontal e a refletividade vertical, é expressa em dB e pode ser representada pela equação (15) (STRAKA; ZRNIĆ; RYZHKOV, 2000).

$$Z_{DR} = 10 \log \left(\frac{\langle |S_{HH}|^2 \rangle}{\langle |S_{VV}|^2 \rangle} \right) \quad (15)$$

Onde, S_{HH} é a radiação retro-espalhada horizontalmente e S_{VV} é a radiação retro-espalhada verticalmente.

4.12.3 Diâmetro máximo calculado

Para a o cálculo do diâmetro máximo dos granizos dos eventos estudados foi utilizada a metodologia aplicada por Skripniková e Řezáčová (2019). Por meio da combinação dos dados de refletividade horizontal (Z_H) e refletividade diferencial (Z_{DR}) é possível obter a refletividade diferencial do granizo (H_{DR}). Com isso, obtém-se o diâmetro máximo do granizo estudado.

A H_{DR} foi desenvolvida por Aydin e colaboradores, (1986), onde usa-se Z_H e Z_{DR} para distinguir o granizo da água. Das medidas polarimétricas, realiza-se uma parametrização desses dados. A expressão para esse cálculo é dada pela equação (16).

$$f(Z_{DR}) = \begin{cases} 27, & Z_{DR} \leq 0 \\ 19Z_{DR} + 27, & 0 < Z_{DR} \leq 1,74 \\ 60, & Z_{DR} > 1,74 \end{cases} \quad (16)$$

Onde, $f(Z_{DR})$ está em dB. A partir disso, o HDR (em dB) é definido pela equação (17).

$$H_{DR} = Z_H - f(Z_{DR}) \quad (17)$$

Os valores positivos de H_{DR} , que resultam de valores de Z_{DR} relativamente pequenos com valores de Z_H grandes, significam a presença de granizo (SKRIPNIKOVÁ; ŘEZÁČOVÁ, 2019a), ou seja, durante as ocorrências de precipitação com presença de gotas de chuva maiores, ocorrerá um valor alto e positivo de Z_{DR} , isto indica que a Z_{DR} é proporcional a Z_H , pois, a grande concentração de gotas maiores caracteriza uma precipitação mais intensa (AYDIN; SELIGA; BALAJI, 1986). Para a classificação dos diâmetros máximos estimados pelo radar, seguiu-se o estipulado por Depue e colaboradores (2007), onde examinaram os dados de H_{DR} como um identificador do tamanho do granizo (Tabela 3).

Tabela 3 - Tamanho do granizo, onde os valores dos dados de radar em cada linha são o resultado da integração sobre um espectro de tamanho de granizo especificado de um diâmetro mínimo de 3 mm até um diâmetro de $D_{máx}$.

$D_{máx}$ (mm)	dBZ	Z_{DR}	H_{DR}
53	73,8	0,0	46,8
48	73,0	0,1	44,1
43	71,1	0,2	41,1
38	66,7	0,2	35,2
33	62,3	0,2	30,7
28	62,6	0,2	32,6
23	61,8	0,2	31,4
18	58,9	0,2	28,7
13	53,0	0,1	23,6
8	44,6	0,1	15,2

Fonte: Depue *et al.* (2007)

4.12.4 Algoritmo para validação dos dados de Radar

Para a construção do algoritmo para determinar o diâmetro máximo das pedras de granizo foi utilizado o *software* Rstudio. Para a validação desse algoritmo, foram coletados granizos dos eventos (30/06/2020, 28/07/2020 e 15/08/2020), assim 27 pedras de granizos tiveram seus diâmetros medidos por meio de um paquímetro. A manipulação dos granizos foi realizada em uma câmara fria operando em 10°C.

Para todos os municípios tomou-se nota dos horários em que ocorreu a coleta de granizo para a análise em laboratório. No dia 30 de junho de 2020 a coleta ocorreu por volta das 15h, assim, foi analisado os diâmetros máximos da chuva de granizo ocorrida às 14h26min do mesmo dia. Já para a tempestade do dia 28 de julho de 2020, a coleta ocorreu por volta das 12h, então, a análise dos dados do radar meteorológico foi às 11h40min. Para o evento ocorrido em 15 de agosto de 2020, a coleta de granizo ocorreu em torno de 01h, portanto, o horário de da chuva de granizo analisada foi a ocorrida às 00h31min.

5 Resultados

Neste capítulo, serão apresentados os resultados experimentais obtidos das análises de microbiologia, química e propriedades físicas realizadas com o objetivo de caracterizar o granizo amostrado de tempestades oriundas da região Sul do Brasil. Aqui, será também abordado uma análise, interpretação e comparação dos resultados obtidos dos ensaios laboratoriais das propriedades físicas com os dados das variáveis polarimétricas do Radar Meteorológico do Oeste (RMO).

5.1 Meteorologia

O Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) relatou a ocorrência de um ciclone extratropical em 30 de junho de 2020, que favoreceu a ocorrência de rajadas de vento de moderada a forte intensidade. Uma forte massa de ar frio avançou pela região sul do Brasil e acentuou a queda das temperaturas (CPTEC, 2020). Para o dia 28 de julho de 2020, o boletim técnico do CPTEC informou que a intensidade da chuva foi forte devido ao avanço de uma frente fria que instabilizou o sul do Brasil. No dia 15 de agosto de 2020 ocorreu uma instabilidade no sul do país, devido ao escoamento de norte/nordeste direcionado para essa região, a presença de uma frente fria e a atmosfera baroclínica.

Dados da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o período amostrado (30 de junho, 28 de julho e 15 de agosto) mostram que a temperatura média era 14,6 °C, e a maior temperatura média ocorreu na chuva de granizo de 15 de agosto de 2020 com 15,1 °C e a menor temperatura ocorreu em 30 de junho de 2020 com 14,2 °C. A velocidade média do vento foi de 37,10 km/h com máxima de 50,07 km/h durante o evento de granizo em 30 de junho de 2020. A umidade relativa média foi de 91,46% (Tabela 4).

Tabela 4 - Valores médios das variáveis meteorológicas - Umidade relativa (%), Velocidade média do vento (m/s), Temperatura (°C), Precipitação (mm) dos dias coletados (30 de junho, 28 de julho e 15 de agosto de 2020)

Data	Temperatura do ar (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Precipitação (mm)	Velocidade Média do Vento (km/h)
30 de junho de 2020	14,29	91,46	2,34	37,10
28 de julho de 2020	14,42	86,17	0,71	13,43
15 de agosto de 2020	15,17	96,75	1,84	8,96

Os dados meteorológicos apresentam comportamentos esperados em relação a sazonalidade. Observou-se que no dia 30 de junho a umidade relativa do ar, precipitação e velocidade do vento são maiores em relação aos outros dias; no dia 28 de julho a precipitação e a umidade relativa do ar são menores em relação aos outros dias. Considerando a variação mensal, nota-se que o mês de junho teve a menor temperatura e a maior precipitação e o mês de agosto teve a menor precipitação. Além disso esse trimestre foi atípico, com temperaturas médias um pouco acima do normal (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores médios mensais das variáveis meteorológicas no período de junho, julho e agosto de 2020

Mês	Temperatura do ar (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Precipitação acumulada (mm)	Velocidade Média do Vento (km/h)
Junho	14,28	91,46	56,20	25,43
Julho	15,05	71,66	81,60	11,05
Agosto	13,37	80,07	123,98	11,02

Por meio da direção predominante do vento no período amostrado ponderada pela velocidade do vento obtém-se a rosa dos ventos (Figura 2). Para o dia 30 de junho a direção predominante do vento é de Sul-Sudeste, para o dia 28 de julho observa-se que em média, a direção predominante é de Sul e para 15 de agosto nota-se que a direção predominante do vento é de Sudoeste.

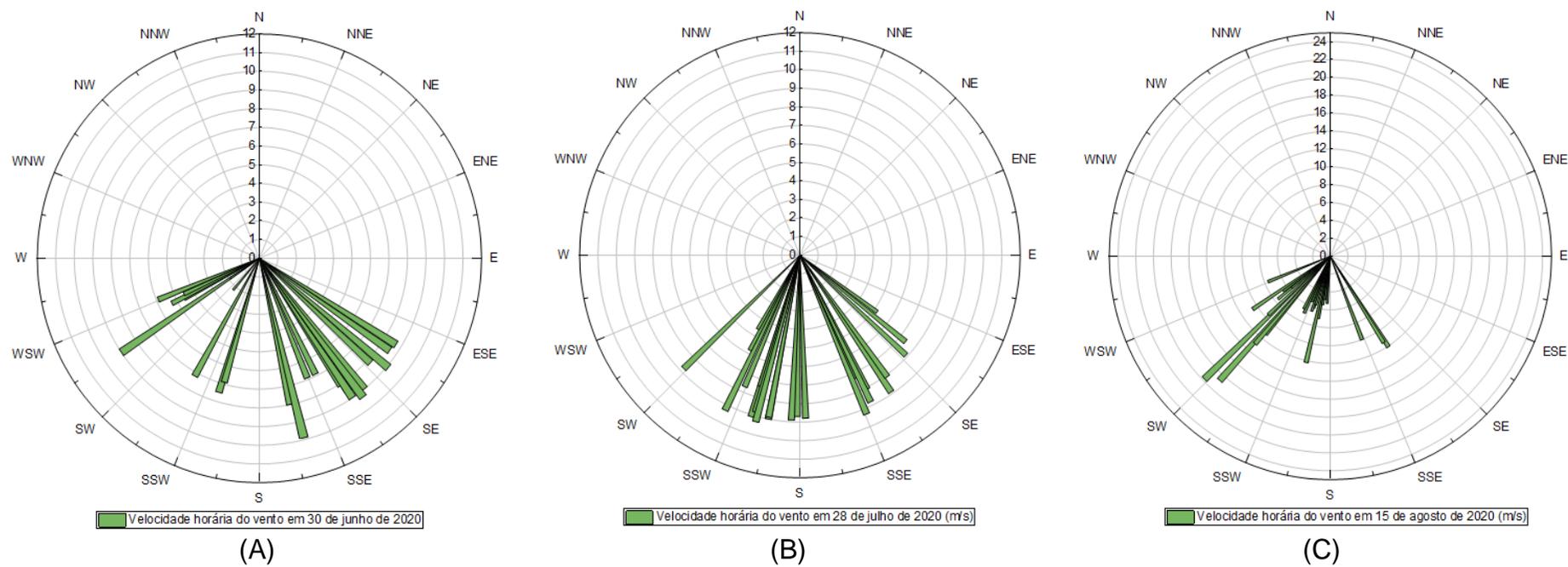


Figura 2 - Rosa dos ventos referente ao período coletado em 30 de junho de 2020 (A), 28 de julho de 2020 (B) e 15 de agosto de 2020 (C).

5.2 Variação da concentração da microbiota

Foram coletados 3 dias de amostras (30 de junho de 2020, 28 de julho de 2020 e 15 de agosto de 2020) e o número total de amostras examinadas foi de 118 granizos. Nos eventos coletados foram analisadas as propriedades químicas, físicas e microbiológicas dos granizos amostrados.

Com base na análise visual, foram identificados 85 isolados representativos de colônias cultivadas a partir de amostras de todos os pontos de coleta. Desse total, 89,74% pertenciam ao município Dionísio Cerqueira, e 10,26% ao município Guarujá do Sul, enquanto o município de Barracão não apresentou crescimento microbiano (Tabela 6). Culturas bacterianas a partir de pedras de granizos derretidos deram origem a 9-32 unidades formadoras de colônias (UFC) por granizo. O conjunto de bactérias que foram isoladas das pedras de granizo continha tipos de bactérias semelhantes às que foram anteriormente recuperadas (HARRISON, 1898; MANDRIOLI *et al.*, 1973; ŠANTL-TEMKIV *et al.*, 2013; TEMKIV *et al.*, 2012). O número médio de unidades formadoras de colônias obtidas pelo cultivo realizado (11 UFC mL^{-1}) é um pouco menor do que o encontrado no trabalho de Šantl-Temkiv *et al.* (2013) ($20\text{-}500 \text{ UFC mL}^{-1}$) e muito menor que o resultado entrado por Michaud *et al.* (2014) (519 UFC mL^{-1}). Essas diferenças podem ser explicadas pela influência da biogeografia, já que a espécies diferentes usam recursos diferentes e comunidades com maior riqueza de bactérias são mais produtivas, em geral, porque são mais susceptíveis de conter espécies com grande efeito no funcionamento do ecossistema (BELL *et al.*, 2005). Outro fator que pode influenciar nas diferenças de concentração é que o Brasil possui um alto nível de diversidade de plantas e os ecossistemas com os níveis mais elevados de diversidade bacteriana têm relativamente baixos níveis de diversidade de plantas (FIERER; JACKSON, 2006).

Tabela 6 - Características biológicas dos granizos amostrados

Amostra	1	2	3
Data	30 de junho de 2020	28 de julho de 2020	15 de agosto de 2020
Bactérias cultiváveis (Número mL^{-1})	8	-	77
Fungos cultiváveis (Número mL^{-1})	-	-	1

As concentrações encontradas nas amostras analisadas indicam que há uma variedade muito grande nas tempestades, sendo que em um evento há poucas bactérias e nenhum fungo, enquanto em outro evento foi encontrada uma situação inversa, há uma concentração de bactérias mais alta e a presença de fungo. Além disso, algumas bactérias se destacaram por ocorrerem com mais frequência. Algumas bactérias aparecem em poucas amostras, mas em grande quantidade, em compensação outras bactérias aparecem em mais amostras, mas em menor quantidade. Ao mesmo tempo, a presença de fungo não é encontrada em todos os granizos analisados, isto é, a sua frequência nos eventos estudados não é constante. Em compensação, o gênero *Bacillus*, é encontrado em praticamente todos os eventos estudados (Tabela 7). Esse tipo de comportamento é normal para esse tipo de análise, sendo encontrado em diversos trabalhos (HARRISON, 1898; MANDRIOLI *et al.*, 1973; MICHAUD *et al.*, 2014; ŠANTL-TEMKIV *et al.*, 2013; TEMKIV *et al.*, 2012).

Tabela 7 - Identificação Biológica (Fungos e Bactérias)

Amostras	Filo	Gênero	Espécie	UFC/mL
30 de junho de 2020	<i>Firmicutes</i>	<i>Bacillus</i>	<i>cereus</i>	3
	<i>Firmicutes</i>	<i>Bacillus</i>	<i>megaterium</i>	4
	<i>Firmicutes</i>	<i>Bacillus</i>	<i>horneckiae</i>	3
	<i>Firmicutes</i>	<i>Paenibacillus</i>	n.d.	1
15 de agosto 2020	<i>Actinobacteria</i>	<i>Arthrobacter</i>	<i>koreensis</i>	6
	<i>Actinobacteria</i>	<i>Arthrobacter</i>	<i>gandavensis</i>	5
	<i>Firmicutes</i>	<i>Bacillus</i>	<i>cereus</i>	5
	<i>Firmicutes</i>	<i>Bacillus</i>	<i>licheniformis</i>	3
	<i>Firmicutes</i>	<i>Bacillus</i>	<i>marisflavi</i>	6
	<i>Firmicutes</i>	<i>Bacillus</i>	<i>megaterium</i>	3
	<i>Firmicutes</i>	<i>Bacillus</i>	<i>pumillus</i>	4
	<i>Firmicutes</i>	<i>Bacillus</i>	<i>simplex</i>	7
	<i>Firmicutes</i>	<i>Bacillus</i>	<i>horneckiae</i>	2
	<i>Actinobacteria</i>	<i>Curtobacterium</i>	<i>flaccumfaciens</i>	9
	<i>Actinobacteria</i>	<i>Gordonia</i>	<i>rubripertincta</i>	2
	<i>Firmicutes</i>	<i>Lysinibacillus</i>	<i>fusiformis</i>	6
	<i>Proteobacteria</i>	<i>Methylobacterium</i>	<i>rhodesianum</i>	6
	<i>Firmicutes</i>	<i>Oceanobacillus</i>	n.d.	3
<i>Ascomycota</i>	<i>Fusarium</i>	<i>incarnatum</i>	1	

De todos os gêneros, apenas *Bacillus* foi encontrado em ambos os eventos que ocorreram crescimento microbiano (30 de junho e 15 de agosto de 2020). O gênero com menor número foi *Paenibacillus*. As concentrações médias de cada gênero de bactéria variam entre 1 bactéria/mL até 7 bactérias/mL, sendo que a maior média foi do *Bacillus megaterium* e *Bacillus cereus*. A segunda maior concentração foi encontrada no gênero dos *Bacillus licheniformis*, *Bacillus*

horneckiae e *Methylobacterium rhodesianum*, com concentração de 6 bactérias/mL.

As bactérias pertencentes ao filo Firmicutes foram as mais abundantes (Tabela 7), *Bacillus* foi o gênero mais frequente encontrado no granizo da região de estudo. Sendo assim, alguns trabalhos analisaram a microbiota presente no granizo, e nesses trabalhos, foi observado que ele é um gênero dominante (HARRISON, 1898; ŠANTL-TEMKIV *et al.*, 2012; ŠANTL-TEMKIV *et al.*, 2013; MICHAUD *et al.*, 2014). O gênero *Bacillus* encontra-se nos mais diversos ambientes, como o solo, e também pode ocorrer em ambientes extremos, com glaciares de grande altitude (CHRISTNER *et al.*, 2005; LI *et al.*, 2020), em neblina (FUZZI; MANDRIOLI; PERFETTO, 1997) e na atmosfera (LIGHTHART, 2006). Estas bactérias estão melhor adaptadas às condições de sobrevivência e crescimento na atmosfera, pois já estão adaptadas aos fatores de stress comuns às superfícies vegetais, como a dessecação e a radiação UV (ŠANTL-TEMKIV *et al.*, 2013).

Foram encontradas duas outras bactérias do filo Firmicutes, o gênero *Paenibacillus* está também presente em vários ambientes. A sua capacidade de formar esporos e a produção de várias enzimas degradantes permitem que o gênero persista em diversas condições (OH *et al.*, 2008). Os indivíduos do gênero *Paenibacillus*, bem como os do gênero *Bacillus*, existem muito provavelmente no ar sob a forma de endósporos, o que quer dizer que não estão ativamente crescendo na atmosfera (ŠANTL-TEMKIV *et al.*, 2013). Outra bactéria do filo Firmicutes (*Lysinibacillus*) também foi encontrada, e recentemente foi descoberto que algumas espécies de bactérias formadoras de gelo pertencem a este gênero (FAILOR *et al.*, 2017). Este gênero também se encontra no solo (AHMED *et al.*, 2007) e uma espécie deste gênero (*Lysinibacillus sphaericus*) é tipicamente usada como controle biológico (BERRY, 2012; SILVA FILHA; BERRY; REGIS, 2014).

Foram encontradas quatro bactérias do filo Actinobacteria (gênero *Arthrobacter*, *Curtobacterium* e *Gordonia*) representando a segunda maior concentração de bactérias. *Arthrobacter* pertence a um grupo predominante de microrganismos que são encontrados em solos de diferentes ambientes em todo o mundo (LEE *et al.*, 2003), incluindo regiões da Antártica (CHEN *et al.*, 2005; GUPTA, P. *et al.*, 2004; REDDY *et al.*, 2002; ROH *et al.*, 2008). São típicos da

filosfera ou biótopo do solo, onde desempenham um papel importante na degradação da matéria orgânica (AMATO *et al.*, 2005). *Curtobacterium* encontra-se normalmente na folhagem de plantas como o feijão e a soja (FUNKE; ARAVENA-ROMAN; FRODL, 2005; SOARES, 2017). O gênero *Gordonia* é normalmente encontrada no solo (ARENSKÖTTER; BRÖKER; STEINBÜCHEL, 2004) e amplamente utilizado na biorremediação de ambientes contaminados por compostos petrolíferos (FRANCISCO; QUEIROZ, 2018; JACQUES *et al.*, 2007; MANDRI; LIN, 2007; TONINI; REZENDE; GRATIVOL, 2010).

De todos os granizos analisados foi encontrado apenas um fungo do gênero *Fusarium*, pertencente ao filo *Ascomycota* na amostra do dia 15 de agosto de 2020. O gênero *Fusarium* ocorre em diversos ambientes, sendo caracterizado pela sua ampla distribuição geográfica (ALEXOPOULOS; MIMS; BLACKWELL, 1996). A espécie *Fusarium incarnatum* pode ocorrer no solo absorvendo substâncias orgânicas normalmente provenientes de matéria orgânica em decomposição ou agindo como patógeno em culturas, tais como milho, trigo e batata (GUPTA *et al.*, 1991), em áreas pantanosas (BASAVARAJA *et al.*, 2008) e em partes da Espanha em que há produção de arroz (LÓPEZ; SOLANO; RUFINA, 2014). Na literatura, *Fusarium incarnatum* pode ser encontrado como *Fusarium semitectum* (LÓPEZ; SOLANO; RUFINA, 2014).

Um dos primeiros estudos sobre a microbiota presente no granizo foi realizado por Harisson em 1890, onde duas análises microbiológicas foram realizadas em tempestades de granizo ocorridas em julho de 1887 na cidade de Guelph no Canadá e em maio de 1888 na cidade de Varsóvia na Polônia. Nestas análises foi constatado a presença de bactérias do gênero *Bacillus* nas amostras. Em 1973, Mandrioli e colaboradores conduziram um trabalho sobre a distribuição dos microrganismos nas pedras de granizo. Eles verificaram a presença de fungos (*Ascomycota*, *Penicillium* sp., *Moniliales* e *Cladosporium* sp.). Amato e colaboradores (2005) coletaram amostras de água de nuvens no topo da montanha Puy de Dôme na França para apresentar metodologias de amostragem e análise utilizadas e descrever a estrutura das comunidades microbianas em água amostrada de nuvens. Eles observaram a presença predominante de bactérias do gênero *Bacillus* e *Arthrobacter* e fungos do filo *Ascomycota* e *Basidiomycota*. Šantl-Temkiv e colaboradores (2012) realizaram um estudo sobre a diversidade bacteriana obtida por meio de pedras de granizos

coletados em tempestade ocorrida em Ljubljana na Eslovênia em maio de 2009. Eles observaram que no granizo amostrado existia a presença de bactérias pertencentes ao gênero *Methylobacterium*, *Bradyrhizobium*, *Bacillus*, *Paenibacillus* e *Afipia*. No ano de 2014, um grupo de pesquisadores da Universidade de Montana (USA) coletaram granizo proveniente de tempestades ocorridas em junho e julho de 2010 e agosto de 2011. Eles encontraram 12-535 unidades formadoras de colônia por embrião de granizo analisado (granizo com exterior removido para descontaminação). O único trabalho desenvolvido com microbiota oriunda do interior do granizo presente em tempestades ocorridas no sul do Brasil é o conduzido por Tsay em 2017. A autora realizou a caracterização da composição microbiológica do granizo coletado de tempestade na região de Barracão. Nesse trabalho observou-se a presença de bactérias pertencentes aos filos *Actinobacteria*, *Firmicutes* e *Proteobacteria*, especificamente os gêneros *Microbacterium*, *Curtobacterium*, *Legionella*, *Oceanobacillus*, *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Sporosarcina* e *Staphylococcus*. Sendo assim, confirmamos estas observações ao analisar amostras de Barracão e encontrarmos uma diversidade de bactérias originárias do filo *Firmicutes* e *Actinobacteria*.

Os principais gêneros de bactérias encontrados foram *Bacillus* com 52,6%, *Arthrobacter* com 12,8%, *Oceanobacillus* 8,6%, *Lysinibacillus* 7,4%, *Methylobacterium* 7,2%, *Gordonia* 5,6%, *Curtobacterium* 4,6% e *Paenibacillus* 1,3% (Figura 3). Essas porcentagens indicam, que além do principal gênero de bactérias encontrados no granizo ser *Bacillus*, há uma grande variedade de bactérias nas amostras. Apesar disso, com 8 gêneros de bactérias encontrados no total, apenas 1 grupo (*Lysinibacillus*) já foi descrito como contendo espécies nucleadoras de gelo. Em relação ao fungo encontrado, o gênero *Fusarium* apresenta espécies nucleadoras, como *Fusarium acuminatum* e *Fusarium avenaceum* (POULEUR *et al.*, 1992).

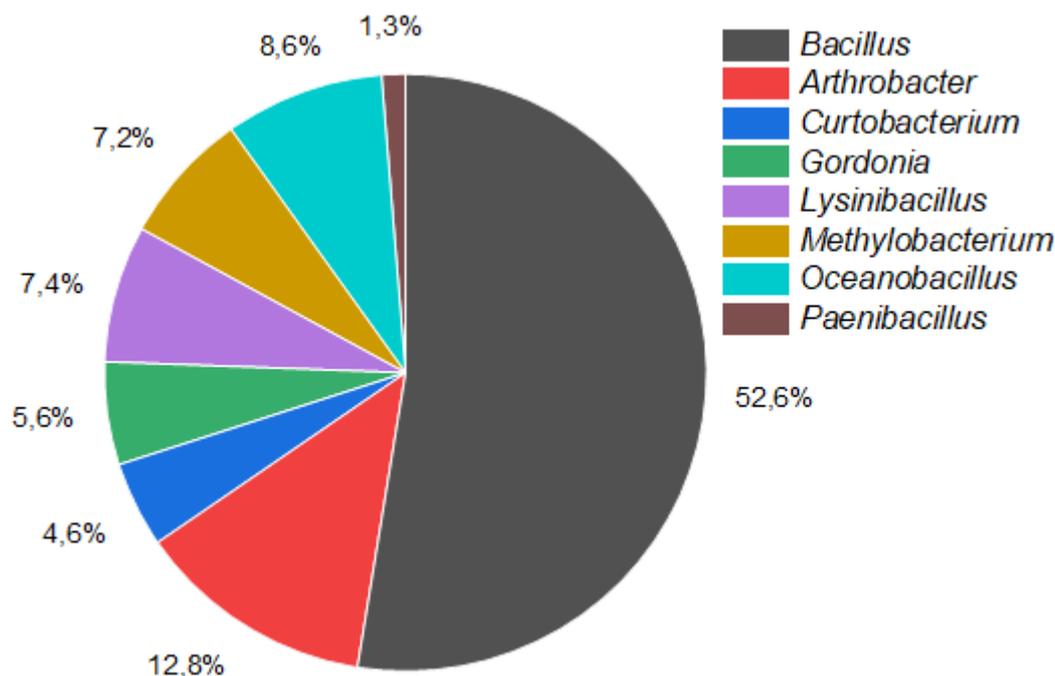


Figura 3 - Gêneros de bactérias encontradas e porcentagens do total de isolados identificados

5.3 Associação entre os eventos ocorridos

Foram coletadas amostras durante 3 tempestades de granizo (30 de junho, 28 de julho, 15 de agosto) em 2020 na região sudoeste do Paraná e noroeste de Santa Catarina e um total de amostras válidas foi de 6. Nesse período foram identificadas 16 espécies de bactérias e 1 espécie de fungo, como mostrado na Tabela 7. Foi obtida uma concentração média de microrganismos de 11 UFC/granizo, sendo a concentração máxima de bactérias total de 42 UFC/granizo no dia 15 de agosto de 2020.

Observando a riqueza encontrada nos diferentes dias amostrados fica evidente a diferença de quantidade de espécies. No dia 30 de junho de 2020 foram encontradas 4 espécies de bactérias. A amostra apresentou uma concentração média de microrganismos de 3 UFC/granizo e uma concentração máxima de bactérias total de 8 UFC/granizo. Para o evento ocorrido no dia 28 de julho de 2020, a amostra não apresentou crescimento microbiano, isso pode ocorrer devido ao processo de análise adotado neste trabalho. Métodos dependentes do cultivo biológico das células, com a possibilidade de analisar os dados e informações somente após a reprodução dos microrganismos, podem

apresentar limitações, sendo este o caso. Onde apenas pode-se estudar os microrganismos que sobreviveram até a fase final do cultivo microbiano. Na coleta realizada no dia 15 de agosto de 2020, obteve-se uma concentração média de microrganismos de 9 UFC/granizo e uma concentração de máxima de bactérias total de 42 UFC/granizo. Nesta amostra identificou-se um total de 15 espécies de bactérias e 1 espécie de fungo.

Comparando os dois dias em que apresentaram crescimento microbiano observa-se que as bactérias *Bacillus cereus*, *Bacillus megaterium* e *Bacillus horneckiae* foram encontradas em ambos os dias. A espécie *Bacillus cereus* apresenta um valor de abundância maior para o dia 15 de agosto de 2020 e a espécie *Bacillus megaterium* é mais abundante no dia 30 de junho de 2020.

Os índices de dominância, uniformidade e de similaridade evidenciam melhor as diferenças entre as comunidades bacterianas das duas tempestades. O índice de uniformidade em 30 de junho de 2020 foi maior ao calculado em 15 de agosto de 2020, indicando que neste último há menor uniformidade na comunidade bacteriana (Tabela 8).

Tabela 8 - Valores dos índices de dominância (C), uniformidade (x) e similaridade (S) das comunidades bacteriana das tempestades analisadas.

Data	C	x	S
30 de junho	0,28±0,17	1,45±0,49	
15 de agosto	0,15±0,09	0,97±0,03	0,31±0,05

Os dois índices de diversidade calculados mostram que a tempestade de granizo ocorrida no dia 15 de agosto de 2020 apresenta maior diversidade de espécies de bactérias quando comparado com o evento do dia 30 de junho. Os cálculos realizados para a diversidade de Simpson demonstram valores dentro do intervalo de confiança ou próximos aos obtidos utilizando a técnica "Jack-knife", isto demonstra a possibilidade de se utilizar estes índices na comparação destes eventos estudados (Tabela 9).

Tabela 9 - Valores dos índices de diversidade de Shannon (H) e Simpson (Ds), "Jack-knives" (JK) e intervalos de confiança (IC) das comunidades bacteriana das tempestades analisadas.

Data	Ds	JK	IC médio	IC Lim. Inf.	IC Lim. Sup.
30 de junho	8,56±4,74	9,94±0,01	9,5±1,8	5,97	13,03
15 de agosto	13,76±0,01	22,5±5,5	16±2,74	10,64	21,36
Data	H	JK	IC médio	IC Lim. Inf.	IC Lim. Sup.
30 de junho	2,01±0,67	0,87±0,01	1,57±1,08	0,70	2,44
15 de agosto	2,68±0,02	1,58±0,36	2,34±1,98	0,76	3,93

As comunidades dos eventos analisados são fisionomicamente semelhantes nas tempestades estudadas, fato que se deve à presença abundante do gênero *Bacillus*. Poucos gêneros, e com unidade formadora de colônia (UFC) reduzida, aparecem apenas nas tempestades que foram estudadas na América do Sul, tais como, *Curtobacterium* e *Oceanobacillus*. Apesar desta aparente semelhança entre as duas comunidades, os resultados obtidos demonstram a grande diferença na estrutura e dinâmica de UFC das comunidades bacterianas, pois no evento do dia 15 de agosto de 2020 observa-se forte dominância de *Curtobacterium flaccumfaciens*, enquanto isto não ocorre nos granizos analisados do dia 30 de junho de 2020. Esta dominância é corroborada pela análise dos valores de uniformidade calculados, pelos quais observa-se grande concentração bacteriana em uma única espécie no dia 15 de agosto (*Curtobacterium flaccumfaciens*) e uma equitabilidade entre as espécies do dia 30 de junho. As diferenças na estrutura das comunidades bacterianas dos dois eventos estudados poderiam ser produto devido a diversos fatores, tais como, natureza físico-química do granizo, disponibilidades de nutrientes e as interações entre as diferentes populações e os mecanismos de transportes realizados pelos processos atmosféricos (TONINI; REZENDE; GRATIVOL, 2010). Estes mecanismos incluem os relacionados com as emissões provenientes de várias fontes, o transporte na atmosfera e a deposição (MORRIS et al., 2011). Morris e colaboradores (2011) ressaltam que a pouca informação disponível sobre as propriedades das partículas que transportam microrganismos deixa-nos com muitos questionamentos sobre como os microrganismos sobrevivem, os fatores que contribuem para a sua atividade metabólica na atmosfera, e os valores mais adequados para os parâmetros de partículas nos modelos para estimar as suas trajetórias.

O fato de a concentração de microrganismos obtida no dia 15 de agosto de 2020 ter sido maior do que aquela obtida na tempestade do dia 30 de junho de 2020 pode ser explicada porque o local de coleta recebeu fluxos de massas de ar provenientes de regiões norte e oeste, respectivamente (Figura 4). As direções de fluxo das massas de ar são diferentes, assim como a quantidade de microrganismos identificados para as duas amostras (Tabela 6). A amostra do dia 15 de agosto de 2020 teve a contribuição de massas de ar da Amazônia e maior riqueza de espécies do que as outras amostras. Este fluxo da parte norte do país deve-se ao escoamento de baixo nível causado pelos Jatos de Baixos Níveis. Esses jatos trazem umidade da Amazônia favorecendo a formação de granizo na região de estudo (MARENGO, 2004). Como a parte norte do país tem uma vasta área florestada, muito maior do que a vegetação da área circunvizinha da região de estudo, sendo assim o local é mais propício para o crescimento e desenvolvimento de alguns tipos bacterianos e fúngicos.

Utilizando o Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney (W) foi possível verificar que as amostras coletadas que a duas tempestades produziram não pertencem a uma mesma população e a concentração no dia 15 de agosto é maior que a da tempestade do dia 30 de junho de 2020, sendo esta diferença estatisticamente significativa ($W=25,00$; $p\text{-value}=0,00$).

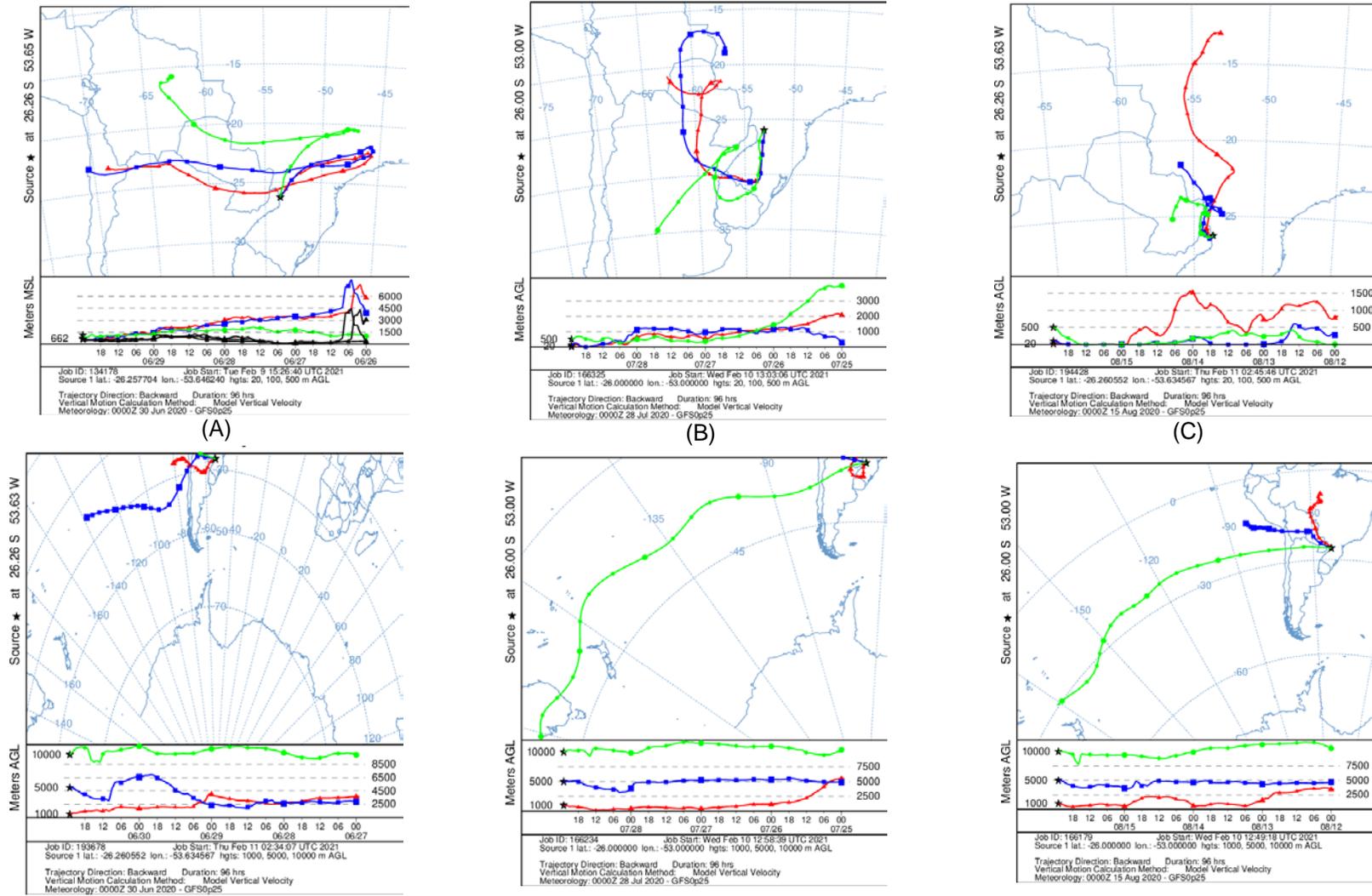


Figura 4 - Trajetórias *backward* das massas de ar dos dias analisados (a) 30 de junho (b) 28 de julho e (c) 15 de agosto (HYSPLIT model) para as alturas de 20 m (linha vermelha), 100 m (linha azul), 500 m (linha verde), 1000 m (linha vermelha), 5000 m (linha azul) e 10000 m (linha verde)

5.4 Propriedades físicas das amostras de granizo

Os parâmetros físicos encontrados (Tabela 10), no geral são menores do que os observados nos trabalhos anteriores, que utilizaram uma metodologia semelhante (ŠANTL-TEMKIV *et al.*, 2012, 2013; MICHAUD *et al.*, 2014; TSAY, 2017). No trabalho de Tsay (2017), as coletas foram realizadas em Bom Jesus do Sul (PR), as massas, diâmetros e volumes identificados foram de, em média, 1,82 g, 1,47 cm e 2,1 cm³, respectivamente. Essa diferença pode ser ocasionada pelo processo de formação do granizo, já que no trabalho de Tsay, foi coletado amostras de uma tempestade em que ocorreu a combinação de um sistema frontal estacionário em superfície e de escoamentos em altos, médios e baixos níveis, favorecendo a ocorrência de queda de granizo em alguns municípios (CPTEC, 2020).

Tabela 10 - Dados físicos das amostras coletadas, massa (g), tamanho (cm), volume (cm³) e densidade (g/cm³) por evento.

Data	Massa (g)	Tamanho (cm)	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)
30 de junho	0,339±0,077	0,699±0,026	0,178±0,018	0,548±0,089
28 de julho	0,353±0,136	0,84±0,095	0,322±0,104	1,071±0,123
15 de agosto	0,556±0,081	1,03±0,039	0,574±0,064	0,971±0,118

Confrontando os resultados com outros trabalhos feitos em outros países, que utilizam uma metodologia semelhante, as massas e os volumes encontradas por Šantl-Temkiv e colaboradores (2012) foram, em média, de 17,26 g e 20,70 cm³, respectivamente e o estudo de Michaud (2014), que coletou granizos de tamanhos de 1 cm a 4 cm de diâmetro. Essas diferenças podem ser explicadas parcialmente pela localidade, forma de coleta e pelo processo de formação do granizo, já que no trabalho de Šantl-Temkiv, a coleta foi realizada no leste europeu (Liubliana/Eslovênia) por meio de sacolas estéreis e o de Michaud, a amostragem ocorreu em Montana (EUA) através de sacolas estéreis tipo Whirl-Pak (Nasco). Ainda deve ser considerado que, devido à metodologia utilizada em todos os trabalhos necessitar de uma análise manual, podem-se ter diferenças nas interpretações dos resultados obtidos.

A medições das densidades médias dos granizos analisados variaram entre 0,5 e 1,07 g/cm³. Ao analisar os trabalhos anteriores, as densidades apresentadas variaram entre 0,04 e 0,9 g/cm³ (KNIGHT; HEYMSFIELD, 1983; NAKAYA; TERADA, 1935; WANG, 2013). Esta variação pode ser ocasionada devido ao ar aprisionado por gotículas de água que congelaram no interior da pedra de granizo. Assim, os granizos

com mais bolhas de ar são menos densos. Além disso, a presença dessas bolhas de ar altera a aparência do granizo, deixando-o opaco. No caso de pedras mais transparentes e límpidas, geralmente, são mais densas (BROWNING, 1963; BROWNING; LUDLAM; MACKLIN, 1963).

5.4.1 Tamanho do granizo amostrado

Os valores médios de massa, volume, diâmetro e densidade das pedras de granizo analisadas são apresentados na Tabela 10, de acordo com o dia do evento amostrado.

As pedras de granizo mostram variações nos parâmetros analisados em relação aos diferentes eventos coletados, a amostra do dia 15 de agosto de 2020 é ligeiramente maior que as amostras dos dias 30 de junho e 28 de julho de 2020. Isso é possível devido ao processo de crescimento dos cristais de gelo dentro da nuvem, passando por processos de crescimento por difusão seguido de colisão e coalescência (ROGERS; YAU, 1976). Com isso, quanto mais tempo os cristais de gelo passam dentro da nuvem, maior será seu tamanho (ROGERS; YAU, 1989). Assim, cristais de gelo crescem ao tamanho de graupel e, em seguida, ao tamanho de granizo (~5 mm) (AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, 2012; CHANGNON JR, 1977). O trabalho desenvolvido por Rosinski e colaboradores (1979) apresentou valores dimensionais maiores que os presentes neste estudo. Além de terem analisado a presença de partículas insolúveis em embriões de 167 pedras de granizo oriundas de diversos locais de ocorrência de tempestades, os autores dimensionaram os granizos a partir de duas medidas, tendo seus valores variando entre 1,2 cm por 1,7 cm e 6,6 cm por 6,5 cm. Essa diferença pode ser ocasionada pelo fato de que as formas tomadas pelos granizos podem ser circulares ou elípticas, e estão sujeitas à microfísica de sua formação e crescimento (WANG, 2013).

5.4.2 Formato do granizo analisado

As pedras de granizo podem ser esferoidais, cônicas ou geralmente irregularmente moldadas, com um diâmetro de 5 mm ou mais (AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, 2012; CHANGNON JR, 1977). Neste estudo, as amostras coletadas apresentaram forma esferoidal, assim seu volume foi calculado por meio de uma esfera (Anexo A – Figura AA1).

As principais razões de interesse nas formas das pedras de granizo foram relacionadas a considerações sobre taxas de crescimento de granizo, cálculo da velocidade terminal, eficiência de coleta e transferência de calor. A diferença de simetria é provavelmente um reflexo da diferença no tipo de embrião do granizo. Embriões de granizo são predominantemente gotas congeladas e, portanto, são quase esféricos (KNIGHT, 1986). Graupel cônico são tipicamente rime de baixa densidade e, portanto, mais suscetíveis ao derretimento. Tanto o tipo de embrião quanto a umidade durante o crescimento da pedra de granizo são fatores claramente importantes na determinação da forma, ambos os fatores variam de tempestades para tempestades (KNIGHT, 1986).

5.5 Relação entre variáveis polarimétricas (Z_H e Z_{DR}) e granizo

Nos dias analisados, tem-se que as variáveis polarimétricas (Z_H e Z_{DR}) nas regiões de granizo, têm valores máximos e mínimos semelhantes para os dois eventos estudados. Para a ocorrência de granizo do dia 30 de junho de 2020, pode-se verificar que o máximo e o mínimo para o Z_{DR} foram de 6 e 0 dB, respectivamente (Figura 5). No caso do dia 28 de julho de 2020, tem-se que o valor máximo e mínimo para o Z_{DR} foi de -0,5 a 2,71 (Figura 6). Já para o dia 15 de agosto de 2020 o valor máximo e mínimo vai de 0 a 4 dB (Figura 7). Ao analisar a variável Z_H tem-se que o valor máximo ficou em torno de 60 dB para os três dias estudados.

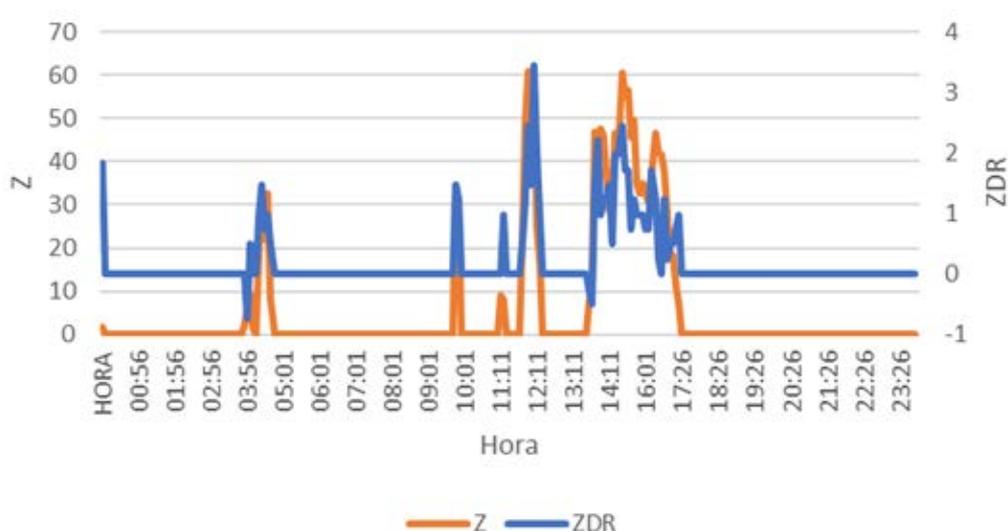


Figura 5 - Análise das variáveis polarimétricas (Z_H e Z_{DR}) para o município de Guarujá do Sul, no dia 30 de junho de 2020.

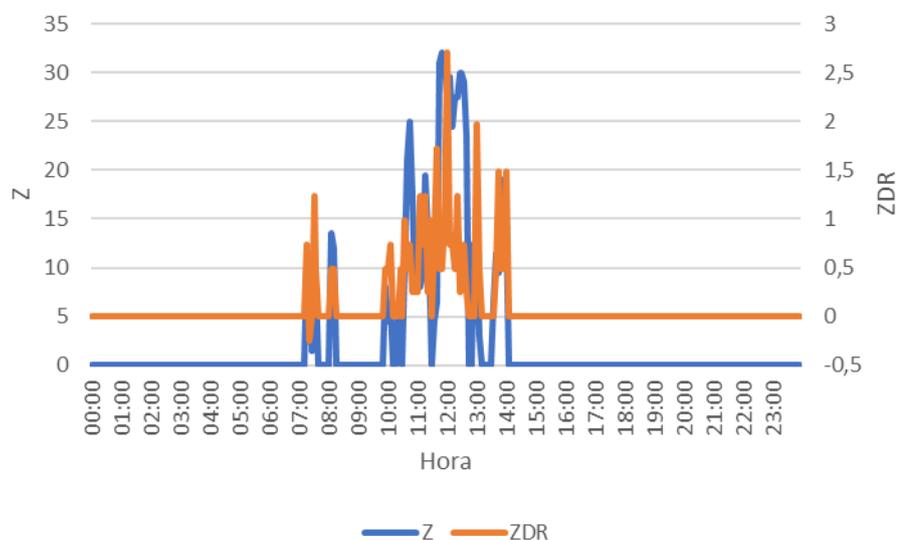


Figura 6 - Análise das variáveis polarimétricas (Z_H e Z_{DR}) para o município de Barracão, no dia 28 de julho de 2020.

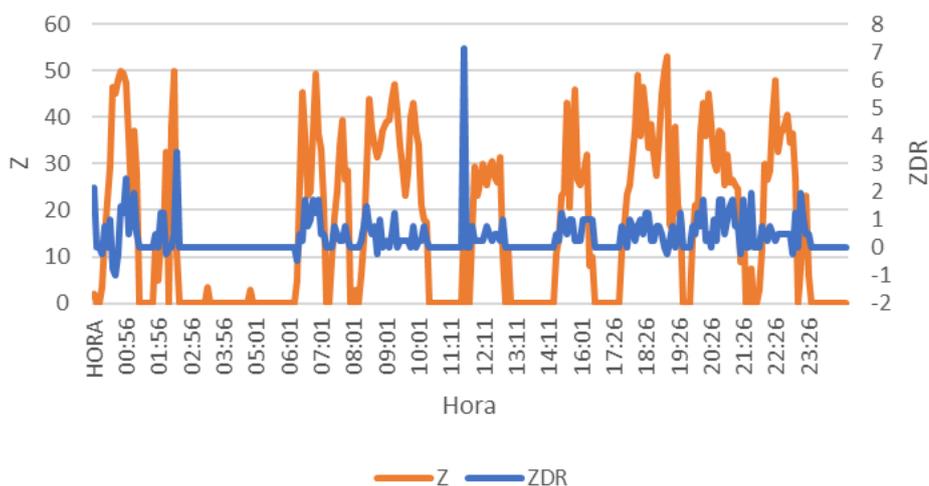


Figura 7 - Análise das variáveis polarimétricas (Z_H e Z_{DR}) para o município de Dionísio Cerqueira, no dia 15 de agosto de 2020.

Estes valores se devem ao fato de que o Z_H geralmente aumenta em relação às regiões de chuva (AYDIN; SELIGA; BALAJI, 1986). Os valores positivos de Z_{DR} representam hidrometeoros orientados horizontalmente (ou seja, chuva), valores próximos a 0 indicam hidrometeoros esféricos (ou seja, granizo) ou granizo em queda, e valores inferiores a 0 indicam hidrometeoros orientados verticalmente (ou seja, graupel ou granizo com forma cônica) (SKRIPNIKOVÁ; ŘEZÁČOVÁ, 2019). Uma vez que o granizo começa a derreter, ele adquire gradualmente atributos polarimétricos de chuva, e a detecção de granizo derretido misturado com a chuva torna-se menos simples porque o Z_{DR} aumenta à medida que o granizo derrete progressivamente (AYDIN; SELIGA; BALAJI, 1986).

5.6 Diâmetros máximos identificados por meio da refletividade diferencial do granizo (H_{DR})

Para o município de Guarujá do Sul, o maior diâmetro encontrado foi de 8 mm às 14h26min. Este tamanho de granizo ocorreu em todas as ocorrências registradas pelo radar para as alturas de 3,81 e 5,94 km (Figura 8).



Figura 8 - Diâmetros máximos encontrados para o município de Guarujá do Sul no dia 30 de junho de 2020

Em relação ao município de Barracão, o diâmetro encontrado foi de 8 mm às 11h40min (Figura 9). Esse diâmetro foi encontrado em uma altura de 3,81 km.



Figura 9 - Diâmetros máximos encontrados para o município de Barracão no dia 28 de julho de 2020

Para o município de Dionísio Cerqueira, o maior diâmetro encontrado foi às 00h31min com o diâmetro máximo de 13 mm e ocorreu nas alturas de 2,14, 3,81, 5,94 e 8,32 km. Já o maior diâmetro foi 18 mm às 19h06min na altura de 2,14 km (Figura 10).

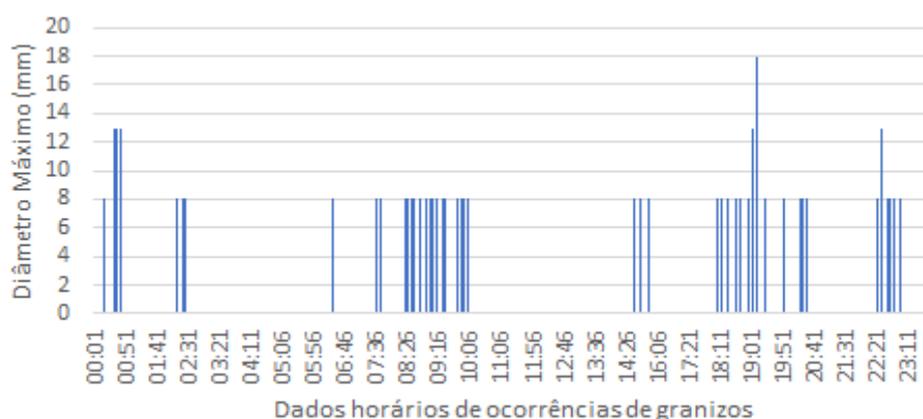


Figura 10 - Diâmetros horários máximos encontrados para o Município de Dionísio Cerqueira no dia 15 de agosto de 2020

As Figuras 8, 9 e 10 demonstram gráficos em função do diâmetro máximo (em mm, eixo y) estimado pelo radar meteorológico e dos dados horários de ocorrências de granizos (horas, eixo x). De forma geral, todos os eventos de granizos apresentam tamanhos semelhantes. Destaca-se o registro de diâmetro máximo estimado de 18 mm no dia 15 de agosto de 2020 às 19h01min para o município de Dionísio Cerqueira.

Para todos os diâmetros das pedras de granizo analisados (Tabela 12) foi possível verificar que nenhum diâmetro foi maior que o diâmetro máximo calculado pelo algoritmo desenvolvido, tornando o algoritmo válido para utilização em pesquisas futuras. Assim, com os dados coletados e as análises efetuadas tem-se que a variação dos diâmetros máximos é de 6 a 18 mm. Vale ressaltar que em 2013, o estudo de Ryzhkov e colaboradores alertou que mesmo Depue e colaboradores (2007) utilizarem o parâmetro de refletividade diferencial de granizo (H_{DR}), que combina a refletividade de radar (Z_H) e a refletividade diferencial (Z_{DR}), para discriminar entre granizo de tamanho menor e maior, o trabalho não leva em conta o processo de derretimento do granizo. Apesar disso, o algoritmo se deu de forma satisfatória neste estudo. A etapa de validação dos dados é essencial diante da necessidade de demonstrar a efetividade do radar na utilização das variáveis polarimétricas para estudos em acerca da microfísica de sistemas precipitantes.

Tabela 11 - Diâmetros medidos em laboratório para granizos coletados dos municípios de Barracão, Dionísio Cerqueira e Guarujá do Sul para os eventos ocorridos no dia 30 de junho de 2020, 28 de julho de 2020 e 15 de agosto de 2020

Município	Data	Diâmetro máximo (mm)	Diâmetro mínimo (mm)	Diâmetro médio (mm)
Guarujá do Sul	30/06/2020	8	6	6
Barracão	28/07/2020	9	7	8
Dionísio Cerqueira	15/08/2020	10	8	8

O radar meteorológico apresentou uma pequena superestimação dos diâmetros máximos, o que pode estar relacionado a distância que está localizado o radar. Este distanciamento entre o local de coleta e o radar é importante devido ao efeito do feixe. Conforme afasta-se do radar, o feixe tende a ser alterado para cima em razão da curvatura da Terra e do índice de refração do ar (DOVIÁK; ZRNIC, 1993), assim, o tamanho do granizo em níveis mais elevados (estimado pelo radar) pode ser maior em relação àquele em superfície (medido em laboratório). Ainda, o fator de derretimento do granizo no momento da coleta em superfície deve ser levado em consideração, bem como, o transporte do mesmo até o laboratório para análise.

5.7 Íons

Trinta e três pedras de granizos amostradas das tempestades de 30 de junho de 2020, 28 de julho de 2020 e 15 de agosto de 2020 foram submetidas à análise de íons (Tabela 13).

Tabela 12 - Concentração de íons de cada tempestade de granizo coletada

Íons ($\mu\text{mol/L}$)	30 de junho de 2020	28 de julho de 2020	15 de agosto de 2020
Na ⁺	68,01 \pm 33,06	11,38 \pm 2,41	64,90 \pm 31,55
NH ₄ ⁺	34,24 \pm 14,65	25,63 \pm 2,72	33,71 \pm 14,43
K ⁺	64,41 \pm 29,88	7,91 \pm 2,84	38,32 \pm 14,94
Mg ⁺²	9,57 \pm 5,16	1,54 \pm 1,04	2,71 \pm 1,22
Ca ⁺	13,51 \pm 0,82	3,51 \pm 0,94	11,69 \pm 0,71
F ⁻	110,09 \pm 35,04	3,78 \pm 1,11	36,47 \pm 23,20
Cl ⁻	65,82 \pm 39,64	11,22 \pm 1,10	67,29 \pm 40,53
NO ₃ ⁻	-	5,70 \pm 0,01	7,49 \pm 4,04
SO ₄ ⁻²	5,02 \pm 0,62	6,96 \pm 0,01	4,73 \pm 0,58
PO ₄ ⁻³	-	17,90 \pm 0,02	-

O elemento que apresentou a maior concentração foi o flúor (110,09 $\mu\text{mol/L}$) no dia 30 de junho de 2020 seguido pelo sódio (68,01 $\mu\text{mol/L}$). Pelo trabalho desenvolvido por Lovelock e colaboradores em 1971, tem-se que os fluoretos são, de especial interesse porque entram na atmosfera apenas a partir de fontes industriais e domésticas, enquanto outras emissões industriais gasosas são também produtos naturais; a sua distribuição na atmosfera pode, por conseguinte, ser um indicador útil dos movimentos do ar e das direções do vento. Amostras coletadas na mesma região deste estudo mostraram uma concentração diferente da observada nesse trabalho, já que os municípios de coleta são distintos (BEAL *et al.*, 2021).

A concentração de íons demonstrou presença de sulfato e nitrato, tendo suas concentrações médias em torno de 5,57 e 6,59 $\mu\text{mol/L}$, respectivamente. Os valores

encontrados por Beal e colaboradores (2021) são maiores que os encontrados neste trabalho. A presença de sulfato e nitrato podem ser associados com a formação de aerossol secundário ou combustíveis fósseis (ANDRADE *et al.*, 2012), e assim, representam uma fonte antropogênica. Outras fontes de compostos de nitrogênio atmosférico incluem produtos gasosos da decomposição de matéria orgânica, processos fotoquímicos na atmosfera, efluentes atmosféricos de processos industriais, processos de combustão de alta temperatura e fertilizantes agrícolas. Já os compostos de enxofre atmosférico podem ser oriundos de poeira do solo, selagem do mar, produtos gasosos de decaimento da matéria orgânica, efluentes atmosféricos de processos industriais e produtos da combustão de combustíveis fósseis (GAMBELL; FISHER, 1964).

O potássio uma concentração média de 36,88 $\mu\text{mol/L}$. A presença deste elemento químico na atmosfera pode ser derivada de fontes biogênicas, especialmente a partir da liberação ativa de esporos de fungos e outros derivados de fungos (ELBERT *et al.*, 2007; PÖHLKER *et al.*, 2012; ZHANG *et al.*, 2015). Sua presença pode estar contida na fração fina do material particulado quando há queima de biomassa, sendo considerado um bom traçador para a combustão (ANDREAE, 1983; ENGLING *et al.*, 2006; GRAHAM, 2002; MAYOL-BRACERO, 2002), apesar de também apresentar outras fontes como solo e sal marinho (ANDREAE, 1983; RAM; SARIN, 2011). O cloreto apresentou concentração média de 48,11 $\mu\text{mol/L}$. O potássio e o cloreto são componentes presentes em emissões de queima agrícola, tais como a queima de vegetação rasteira e da cana-de-açúcar (POZZA *et al.*, 2009). Além disso, as partículas de origem marinha apresentam-se ricas em cloreto e sódio (GAMBELL; FISHER, 1964). A concentração média observada do sódio nesse trabalho foi de 48,09 $\mu\text{mol/L}$. O sódio pode ser derivado de poeira do solo, mas os aerossóis de sal marinho são geralmente o principal contribuinte (GAMBELL; FISHER, 1964).

A concentração de fosfato foi de 17,90 $\mu\text{mol/L}$, sendo presente apenas nas amostras do dia 28 de julho de 2020. Este elemento pode ser decorrente dos aerossóis minerais, bem como, derivado de partículas primárias biogênicas e fontes de combustão (MAHOWALD *et al.*, 2008).

A presença de elementos, como potássio e magnésio, mostra uma origem com característica de ressuspensão de poeira de solo (AMATO *et al.*, 2005; MORRIS *et al.*, 2011). Como supracitado (Tópico 1.4), a constituição dos aerossóis atmosféricos pode ser por íons inorgânicos e orgânicos solúveis em água (Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-}

e outros), elementos inorgânicos insolúveis em água (argilo-minerais, óxidos de ferro e metais coprecipitados, e outros), carbono gráfico, hidrocarbonetos (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e outros) e material biogênico (pólen, fragmentos de vegetais, bactérias e outros). Com isso, para as substâncias orgânicas voláteis na atmosfera, as bactérias transmitidas pelo ar podem atuar como potenciais fontes e sumidouros (AMATO *et al.*, 2005; MORRIS *et al.*, 2011).

6 CONCLUSÃO

Fazendo-se uma discussão geral, os resultados obtidos por meio desse trabalho constituem um grande avanço nas pesquisas envolvendo a composição microbiológica, física e química presente em granizos coletados na região Sul do Brasil. Com esse projeto foi possível compreender quais são os principais grupos de bactérias e fungos na atmosfera da área no momento do estudo, bem como, os principais elementos químicos. Há poucos estudos no mundo discutindo esses aspectos.

Foi possível observar que a distribuição dos microrganismos (bactérias e fungos) na atmosfera não é igual para todos os gêneros de bactérias e fungos, sendo que cada grupo é influenciado por diversos fatores. O gênero *Bacillus* foi identificado em estudos realizados anteriormente, sua presença foi majoritária em análises de pedras de granizo, tornando este assunto uma das questões interessantes na microbiologia meteorológica, com implicações para clima e tempo.

Outra contribuição deste trabalho foi através das análises e cálculos utilizando a correlação de Z_H com Z_{DR} para o cálculo do tamanho do granizo. Com esses dados, ocorre o melhor entendimento do funcionamento dos avisos de tempestades que produzem granizo, compreendendo os processos físicos que levam à formação do granizo e determinando as possíveis assinaturas precursoras associadas à formação e crescimento do granizo. Por meio deste trabalho foi possível verificar a importância do estudo de radar relacionado às ocorrências de granizo. O granizo de tamanho suficientemente grande inflige danos substanciais de modo que, além da detecção de granizo, é necessária a discriminação entre granizo de diferentes tamanhos e densidades. Com as análises realizadas, compreende-se que o derretimento de graupel e granizo afeta fortemente os perfis verticais das variáveis de radar polarimétrico em tempestades convectivas.

Além dessas análises, foi possível observar que as maiores concentrações de íons são oriundas de possíveis emissões industriais. Em particular, as contribuições de ressuspensão do solo e queima agrícola foram observadas na literatura como possíveis fontes para os elementos químicos. Dentre as origens encontradas na literatura para estes elementos estão as emissões locais por residências, veículos e transporte de outras regiões derivados da queima de biomassa, queima de vegetação rasteira e queima de cana de açúcar.

E como conclusão temos que os objetivos propostos para este estudo puderam ser atingidos de maneira satisfatória. Para tal, estes são desenvolvidos na ordem em que foram expostos inicialmente e, na sequência, as conclusões adicionais deste trabalho são apresentadas.

1. Quantificou-se a concentração das bactérias e fungos para as amostras, baseada em metodologias descritas na literatura. Isto permitiu a caracterização dos principais grupos de bactérias e fungos presentes na atmosfera da região. Tipicamente, foram encontrados entre 9 e 32 unidades formadoras de colônias (UFC) por grânulo, sendo em média 11 UFC mL⁻¹;

2. Identificaram-se 19 espécies de microrganismos (bactérias e fungos), sendo que 52,6% das bactérias identificadas pertencem ao gênero *Bacillus*, este grupo também foi encontrado em outros trabalhos que envolvem identificação microbiológica a partir de amostras de grânulo em diversas partes do mundo (com base em dados disponíveis na literatura: HARRISON, 1898; ŠANTL-TEMKIV *et al.*, 2012; 2013; MICHAUD *et al.*, 2014);

3. Investigou-se a relação das variáveis polarimétricas com o tamanho do grânulo, a variável ZH demonstrou diferenças entre as tempestades estudadas, sugerindo a existência de variações entre os tipos, formatos e quantidades de hidrometeoros das duas tempestades. Ao analisar o comportamento de Z_{DR}, verificou-se que as três tempestades apresentam processos associados a formação de gotas de chuva;

4. Observou-se que para o cálculo do diâmetro do grânulo, utilizando as variáveis polarimétricas do radar meteorológico, obtiveram-se valores indo de 8 a 18 mm. O valor encontrado foi muito próximo ao observado laboratorialmente nas amostras coletadas, de 6 a 10 mm, com range ligeiramente menor. Portanto, o radar meteorológico apresentou desempenho satisfatório ao estimar o tamanho do grânulo através de variáveis polarimétricas, apesar das interferências já supracitadas;

5. Dentre os íons identificados, o flúor (110,09 µmol/L), sódio (68,01 µmol/L), cloreto (67,29 µmol/L) e potássio (64,41 µmol/L) apresentaram as maiores concentrações. Estes demonstraram que as atividades locais da região contribuíram para a presença. Como dito na introdução, a área de estudo é caracterizada por atividade agrícola e a grande maioria das estradas não são pavimentadas, sendo sendo que a ressuspensão do solo, o uso de fertilizantes, a criação de gado, bem

como, as emissões biogênicas da vegetação podem auxiliar na origem destes elementos. O modelo HYSPLIT mostrou que as parcelas são oriundas das regiões norte e oeste, demonstrando escoamento com origem da região Amazônica e de regiões circunvizinhas à área de coleta.

Esse estudo forneceu uma especificação física, química e biológica abrangente e uma reflexão sobre a relevância e contribuição dos bioaerossóis para a formação do granizo. Além disso, desenvolveram-se ferramentas que poderão ser usadas em análises futuras, facilitando assim, o avanço do conhecimento sobre o desenvolvimento do granizo na nuvem.

7 Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados obtidos elucidaram vários questionamentos sobre a composição do granizo. Contudo, algumas limitações estão envolvidas. Assim, sugere-se para estudos futuros análises com resolução temporal maior, bem como, mais amostragens. Recomenda-se também uma comparação entre as estações sazonais e entre anos, e assim, os resultados sejam mais reprodutíveis e consistentes. Sugere-se também verificação de nucleação de gelo de espécies predominantes ou suspeitas, acoplada a metodologias adicionais de quantificação e identificação de bioaerossóis.

Análises químicas e de HYSPLIT devem ter uma amostragem maior para que se tenha uma visão mais holística da formação dos granizos no sul do Brasil.

REFERÊNCIAS

Barracão (PR). Prefeitura. Disponível em: <http://barracao.pr.gov.br/o-municipio/sobre-barracao/historia/>. Acesso em: dezembro 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/barracao/panorama>. Acesso em: dezembro 2021.

IPARDES - .

AHERN, H. E. *et al.* Fluorescent pseudomonads isolated from Hebridean cloud and rain water produce biosurfactants but do not cause ice nucleation. *Biogeosciences*, v. 4, n. 1, p. 115–124, 12 fev. 2007. Disponível em: <<https://bg.copernicus.org/articles/4/115/2007/>>.

AHMED, I. *et al.* Proposal of *Lysinibacillus boronitolerans* gen. nov. sp. nov., and transfer of *Bacillus fusiformis* to *Lysinibacillus fusiformis* comb. nov. and *Bacillus sphaericus* to *Lysinibacillus sphaericus* comb. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, v. 57, n. 5, p. 1117–1125, 2007.

ALEXOPOULOS, C. J.; MIMS, C. W.; BLACKWELL, M. *Introductory Mycology*. 4th ed. ed. New York: John Wiley, 1996.

ALMEIDA, F. F. M. O planalto basáltico da Bacia Do Paraná. *Boletim Paulista de Geografia*, p. 3–34, 2017.

ALVES, C. Aerossóis atmosféricos: Perspectiva histórica, fontes, processos químicos de formação e composição orgânica. *Química Nova*, v. 28, n. 5, p. 859–870, 2005.

AMATO, P. *et al.* Microbial population in cloud water at the Puy de Dôme: Implications for the chemistry of clouds. *Atmospheric Environment*, v. 39, n. 22, p. 4143–4153, 2005.

ANDRADE, M. DE F. *et al.* Vehicle emissions and PM_{2.5} mass concentrations in six Brazilian cities. *Air Quality, Atmosphere & Health*, v. 5, n. 1, p. 79–88, 20 mar. 2012.

ANDREAE, M. O. Soot Carbon and Excess Fine Potassium: Long-Range Transport of Combustion-Derived Aerosols. *Science*, v. 220, n. 4602, p. 1148–1151, 10 jun. 1983.

ARENSKÖTTER, M.; BRÖKER, D.; STEINBÜCHEL, A. *Biology of the metabolically diverse genus Gordonia*. *Applied and Environmental Microbiology*. [S.l.: s.n.], jun. 2004

ARIYA, P. A. *et al.* *Physical and chemical characterization of bioaerosols - Implications for nucleation processes*. [S.l: s.n.], 2009. v. 28.

ARIYA, PARISA A.; AMYOT, M. *New Directions: The role of bioaerosols in atmospheric chemistry and physics*. *Atmospheric Environment*. [S.l.]: Elsevier Ltd. , 2004

ARNOLDUSSEN, L.; HÖPPE, P. Relevance of changing weather patterns, *Geo Risks Research competence at Munich Re*. n. October, p. 14, 2014.

ARTAXO, P. *et al.* Química atmosférica na Amazônia: a floresta e as emissões de queimadas controlando a composição da atmosfera amazônica. *Acta Amazonica*, v. 35, n. 2, p. 185–196, 2005.

AYDIN, K.; SELIGA, T. A.; BALAJI, V. *Remote sensing of hail with a dual linear polarization radar*. *Journal of Climate & Applied Meteorology*. [S.l: s.n.]. , 1986

BALTACI, H.; AKKOYUNLU, B. O.; TAYANC, M. An Extreme Hailstorm on 27 July 2017 in Istanbul, Turkey: Synoptic Scale Circulation and Thermodynamic Evaluation. *Pure and Applied Geophysics*, v. 175, n. 11, p. 3727–3740, 1 nov. 2018.

BASAVARAJA, S. *et al.* Extracellular biosynthesis of silver nanoparticles using the fungus *Fusarium semitectum*. *Materials Research Bulletin*, v. 43, n. 5, p. 1164–1170, 6 maio 2008.

BATTAN, L. J. *Radar Observes the Weather*. 18. ed. [S.l: s.n.], 1962.

BAUER, H. *et al.* The contribution of bacteria and fungal spores to the organic carbon content of cloud water, precipitation and aerosols. *Atmospheric Research*, v. 64, n. 1–4, p. 109–119, 2002.

BAUER, HEIDI *et al.* Airborne bacteria as cloud condensation nuclei. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 108, n. 21, 2003.

BEAL, A. *et al.* Climatology of hail in the triple border Paraná, Santa Catarina (Brazil) and Argentina. *Atmospheric Research*, v. 234, p. 104747, 2020a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104747>>.

BEAL, A. *et al.* Climatology of hail in the triple border Paraná, Santa Catarina (Brazil) and Argentina. *Atmospheric Research*, v. 234, n. October 2019, p. 104747, 2020b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104747>>.

BEAL, A. *et al.* Evaluation of the chemical composition of hailstones from triple border Paraná, Santa Catarina (Brazil) and Argentina. *Atmospheric Pollution Research*, v. 12, n. 3, p. 184–192, 2021.

BELL, T. *et al.* The contribution of species richness and composition to bacterial services. *Nature*, v. 436, n. 7054, p. 1157–1160, 25 ago. 2005. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/nature03891>>.

BERRY, C. *The bacterium, Lysinibacillus sphaericus, as an insect pathogen. Journal of Invertebrate Pathology.* [S.l.: s.n.], jan. 2012

BOWERS, R. M. *et al.* Characterization of airborne microbial communities at a high-elevation site and their potential to act as atmospheric ice nuclei. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 75, n. 15, p. 5121–5130, 2009.

BRINGI, V. N.; SELIGA, T. A.; AYDIN, K. Hail Detection with a Differential Reflectivity Radar Abstract. *Science*, v. 225, p. 1145–1147, 1984.

BROWNING, K. A. The growth of large hail within a steady updraught. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 89, n. 382, p. 490–506, out. 1963.

BROWNING, K. A.; LUDLAM, F. H.; MACKLIN, W. C. The density and structure of hailstones. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 89, n. 379, p. 75–84, jan. 1963.

BRUCE, T. *et al.* Bacterial community diversity in the brazilian atlantic forest soils. *Microbial Ecology*, v. 60, n. 4, p. 840–849, 2010.

BURGE, H. Education Bioaerosols: Prevalence and health effects in the indoor environment. *THE JOURNAL OF ALLERGY AND CLINICAL IMMUNOLOGY*, v. 86, p. 687–701, 1990.

BURROWS, S. M. *et al.* Bacteria in the global atmosphere - Part 1: Review and synthesis of literature data for different ecosystems. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 9, n. 23, p. 9263–9280, 2009.

CHANGNON JR, S. The Scales of Hail. *Journal of Applied Meteorology*, v. 16, p. 626–648, 1977.

CHEN, M. *et al.* *Arthrobacter ardleyensis* sp. nov., isolated from Antarctic lake sediment and deep-sea sediment. *Archives of Microbiology*, v. 183, n. 4, p. 301–305, maio 2005.

CHRISTNER, B. C. *et al.* Glacial ice cores: A model system for developing extraterrestrial decontamination protocols. *Icarus*, v. 174, n. 2 SPEC. ISS., p. 572–584, 2005.

CONSTANTINIDOU, H. *et al.* Atmospheric dispersal of ice nucleation-active bacteria: The role of rain. *Phytopathology*, p. 934–937, 1990.

CONSTANTINIDOU, H. A. *et al.* Plants as sources of airborne bacteria, including ice nucleation-active bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 44, n. 5, p. 1059–1063, 1982.

COSTA, T. S. *et al.* Bacterial ice nuclei impact cloud lifetime and radiative properties and reduce atmospheric heat loss in the BRAMS simulation model. *Environmental Research Letters*, v. 9, n. 8, 1 ago. 2014.

CPTEC, C. DE P. DE T. E E. C. *Boletim Técnico*. Disponível em: <<http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt>>. Acesso em: 9 mar. 2022.

DE ARAUJO, G. G. *et al.* Survival and ice nucleation activity of *Pseudomonas syringae* strains exposed to simulated high-altitude atmospheric conditions. *Scientific Reports*, v. 9, n. 1, p. 7768, 23 dez. 2019. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/s41598-019-44283-3>>.

DELORT, A. M. *et al.* A short overview of the microbial population in clouds: Potential roles in atmospheric chemistry and nucleation processes. *Atmospheric Research*, v. 98, n. 2–4, p. 249–260, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.07.004>>.

DESPRÉS, V. R. *et al.* Primary biological aerosol particles in the atmosphere: A review. *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology*, v. 64, n. 1, 2012.

DIEHL, K. *et al.* The ice nucleating ability of pollen: *Atmospheric Research*, v. 61, n. 2, p. 125–133, fev. 2002.

DOUWES, J. *et al.* Bioaerosol Health Effects and Exposure Assessment: Progress and Prospects. *The Annals of Occupational Hygiene*, v. 47, n. 3, p. 187–200, abr. 2003a. Disponível em: <<https://academic.oup.com/annweh/article/47/3/187/171690/Bioaerosol-Health-Effects-and-Exposure-Assessment>>.

DOUWES, J. *et al.* Bioaerosol health effects and exposure assessment: Progress and prospects. abr. 2003b, [S.l: s.n.], abr. 2003. p. 187–200.

DOVIK, R. J. *Doppler radar and weather observations*. [S.l.]: Courier Corporation, 2006.

DOVIK, R.; ZRNIC, D. *Doppler Radar and Weather Observations*. . San Diego: Academic Press, 1993.

DOVIK; ZRNIC. *Doppler Radar and Weather Observations*. [S.l.]: Elsevier, 1993.

EDUARD, W. *et al.* *Bioaerosol exposure assessment in the workplace: The past, present and recent advances. Journal of Environmental Monitoring.* [S.l: s.n.], , fev. 2012

EHRENBERG, C. G. *Neue Beobachtungen über blutartige Erscheinungen in Aegypten, Arabien und Sibirien, nebst einer Übersicht und Kritik der früher bekannten.* . [S.l: s.n.], 1830.

EKSTRÖM, S. *et al.* A possible role of ground-based microorganisms on cloud formation in the atmosphere. *Biogeosciences*, v. 7, n. 1, p. 387–394, 2010.

ELBERT, W. *et al.* Contribution of fungi to primary biogenic aerosols in the atmosphere: wet and dry discharged spores, carbohydrates, and inorganic ions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 7, n. 17, p. 4569–4588, 7 set. 2007.

EMYGDIO, A. P. M. *et al.* One year of temporal characterization of fungal spore concentration in São Paulo metropolitan area, Brazil. *Journal of Aerosol Science*, v. 115, p. 121–132, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.07.003>>.

ENGLING, G. *et al.* Determination of levoglucosan in biomass combustion aerosol by high-performance anion-exchange chromatography with pulsed amperometric detection. *Atmospheric Environment*, v. 40, p. 299–311, 2006.

ERCOLANI, G. L. ; *et al.* Epiphytic survival of *Pseudomonas syringae* on hairy vetch in relation to epidemiology of bacterial brown spot of bean in Wisconsin. *Phytopathology*, p. 1330–1339, 1974.

FAILOR, K. C. *et al.* Ice nucleation active bacteria in precipitation are genetically diverse and nucleate ice by employing different mechanisms. *ISME Journal*, v. 11, n. 12, p. 2740–2753, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/ismej.2017.124>>.

FALL, R.; SCHNELL, R. C. Association of an ice-nucleating pseudomonad with cultures of the marine dinoflagellate, <l>Heterocapsa niei</l> *Journal of Marine Research*, v. 43, n. 1, p. 257–265, 1 fev. 1985. Disponível em: <<http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=0022-2402&volume=43&issue=1&spage=257>>.

FAN, J. *et al.* Review of Aerosol–Cloud Interactions: Mechanisms, Significance, and Challenges. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 73, n. 11, p. 4221–4252, 1 nov. 2016. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JAS-D-16-0037.1>>.

FERRARI, M. Zona de fronteira, cidades gêmeas e interações transfronteiriças no contexto do MERCOSUL. *Revista Transporte y Territorio*, p. 87–104, 2013.

FIEGEL, J.; CLARKE, R.; EDWARDS, D. A. *Airborne infectious disease and the suppression of pulmonary bioaerosols. Drug Discovery Today*. [S.l: s.n.], jan. 2006

FIERER, N.; JACKSON, R. B. The diversity and biogeography of soil bacterial communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 103, n. 3, p. 626–631, 17 jan. 2006. Disponível em: <<https://pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.0507535103>>.

FONTENELE, A. P. G.; PEDROTTI, J. J. Avaliação de metais traços e íons majoritários em águas de chuva na cidade de São Paulo. *Química Nova*, v. 32, n. 4, p. 839–844, 2009.

FRANCISCO, W. C.; QUEIROZ, T. M. DE. BIORREMEDIAÇÃO. *Nucleus*, v. 15, n. 1, p. 249–256, 30 abr. 2018.

FRÖHLICH-NOWOISKY, J. *et al.* Ice nucleation activity in the widespread soil fungus <i>Mortierella alpina</i>. *Biogeosciences*, v. 12, n. 4, p. 1057–1071, 19 fev. 2015. Disponível em: <<https://bg.copernicus.org/articles/12/1057/2015/>>.

FRÖHLICH-NOWOISKY, JANINE *et al.* Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem interactions. *Atmospheric Research*, v. 182, p. 346–376, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.018>>.

FUNKE, G.; ARAVENA-ROMAN, M.; FRODL, R. First description of *Curtobacterium* spp. isolated from human clinical specimens. *Journal of Clinical Microbiology*, v. 43, n. 3, p. 1032–1036, 2005.

FUZZI, S.; MANDRIOLI, P.; PERFETTO, A. *FOG DROPLETS-AN ATMOSPHERIC SOURCE OF SECONDARY BIOLOGICAL AEROSOL PARTICLES*. [S.l: s.n.], 1997.

GAMBELL, A. W.; FISHER, D. W. Occurrence of sulfate and nitrate in rainfall. *Journal of Geophysical Research*, v. 69, n. 20, p. 4203–4210, 15 out. 1964. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/JZ069i020p04203>>.

GARNHAM, C. P. *et al.* Novel dimeric β -helical model of an ice nucleation protein with bridged active sites. *BMC Structural Biology*, v. 11, n. 1, p. 36, 27 dez. 2011. Disponível em: <<https://bmcstructbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/1472-6807-11-36>>.

GONÇALVES, F. L. T. ; MASSAMBANI, O. Bacteria and fungal spores as ice nuclei from *Coffea arabica* L. *Ciência e Natura*, p. 73–93, 2011. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=467546360005>>.

GONG, J. *et al.* Concentration, viability and size distribution of bacteria in atmospheric bioaerosols under different types of pollution. *Environmental Pollution*, v. 257, 1 fev. 2020.

GONZÁLEZ, A. J.; LANDERAS, E.; MENDOZA, M. C. Pathovars of *Pseudomonas syringae* causing bacterial brown spot and halo blight in *Phaseolus vulgaris* L. are distinguishable by ribotyping. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 66, n. 2, p. 850–854, 2000.

GORBUSHINA, A. A. *et al.* Life in Darwin's dust: Intercontinental transport and survival of microbes in the nineteenth century. *Environmental Microbiology*, v. 9, n. 12, p. 2911–2922, dez. 2007.

GOVINDARAJAN, A. G.; LINDOW, S. E. Phospholipid requirement for expression of ice nuclei in *Pseudomonas syringae* and in vitro. *Journal of Biological Chemistry*, v. 263, n. 19, p. 9333–9338, jul. 1988. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0021925819765454>>.

GRAETHER, S. P.; JIA, Z. Modeling *Pseudomonas syringae* Ice-Nucleation Protein as a α -Helical Protein. *Biophysical Journal*, v. 80, n. 3, p. 1169–1173, mar. 2001. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0006349501760936>>.

GRAHAM, B. Water-soluble organic compounds in biomass burning aerosols over Amazonia1. Characterization by NMR and GC-MS. *Journal of Geophysical Research*, v. 107, n. D20, p. 8047, 2002.

GUPTA, P. *et al.* *Arthrobacter gangotriensis* sp. nov. and *Arthrobacter kerguelensis* sp. nov. from Antarctica. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, v. 54, n. 6, p. 2375–2378, nov. 2004.

GUPTA, S. *et al.* *Isolation of beauvericin as an insect toxin from Fusarium semitectum and Fusarium moniliforme var. subglutinans.* *Mycopathologia*. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1991.

GURIAN-SHERMAN, D.; LINDOW, S. E. Differential Effects of Growth Temperature on Ice Nuclei Active at Different Temperatures That Are Produced by Cells of *Pseudomonas syringae*. *Cryobiology*, v. 32, n. 2, p. 129–138, abr. 1995. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0011224085710127>>.

HALLETT, J.; MOSSOP, S. C. Production of secondary ice particles during the riming process. *Nature*, v. 249, n. 5452, p. 26–28, maio 1974. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/249026a0>>.

HARRISON, F. C. Bacterial Content of Hailstones. *Botanical Gazette*, v. 26, n. 3, p. 211–214, 1898.

HEINSELMAN, P.; HEINSELMAN, P. L.; ROWE, A. *Estimating hail size using polarimetric radar Estimating Hail Size Using Polarimetric Radar (P9R.16)*. . [S.l: s.n.], 2005. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/228375845>>.

HEYMSFIELD, A. J.; MILOSHEVICH, L. M. Homogeneous Ice Nucleation and Supercooled Liquid Water in Orographic Wave Clouds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 50, n. 15, p. 2335–2353, ago. 1993. Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0469\(1993\)050<2335:HINASL>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0469(1993)050<2335:HINASL>2.0.CO;2)>.

HIRANO, S. S.; UPPER, C. D. Ecology of ice nucleation-active bacteria. *Biological ice nucleation and its applications*, p. 41–61, 1995.

HOOSE, C.; KRISTJÁNSSON, J. E.; BURROWS, S. M. How important is biological ice nucleation in clouds on a global scale? *Environmental Research Letters*, v. 5, n. 2, 2010.

HOOSE, C.; MÖHLER, O. *Heterogeneous ice nucleation on atmospheric aerosols: A review of results from laboratory experiments*. [S.l: s.n.], 2012. v. 12.

ICEPA. *Levantamento Agropecuário de Santa Catarina: dados preliminares*. . [S.l: s.n.], 2005.

IPARDES, I. P. DE D. E. E S. *CADERNO ESTATÍSTICO DO MUNICÍPIO DE BARRAÇÃO*. . [S.l: s.n.], 2021. Disponível em: <www.ipardes.gov.br>.

JACQUES, R. J. S. *et al.* Biorremediação de solos contaminados com hidrocarbonetos aromáticos policíclicos. *Ciência Rural*, n. 4, p. 1192–1201, 2007.

JAENICKE, R. Abundance of cellular material and proteins in the atmosphere. *Science*, v. 308, n. 5718, p. 73, 2005.

JAENICKE, R. ATMOSPHERIC AEROSOLS AND GLOBAL CLIMATE. *J Aerosol Sci*, v. 11, p. 577–588, 1980.

JOUNG, Y. S.; GE, Z.; BUIE, C. R. Bioaerosol generation by raindrops on soil. *Nature Communications*, v. 8, 7 mar. 2017.

JUNG, J. *et al.* Atmospheric inorganic nitrogen input via dry, wet, and sea fog deposition to the subarctic western North Pacific Ocean. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 13, n. 1, p. 411–428, 2013.

KHALED, A. *et al.* Biodegradation by bacteria in clouds: An underestimated sink for some organics in the atmospheric multiphase system. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/acp-2020-778>>.

KNIGHT, C. A. *et al.* Hailstorms. [S.l: s.n.], 2001. .

KNIGHT, N. C.; HEYMSFIELD, A. J. *Measurement and interpretation of hailstone density and terminal velocity. Journal of the Atmospheric Sciences.* [S.l: s.n.], 1983

KNIGHT, NANCY C. Hailstone Shape Factor and Its Relation to Radar Interpretation of Hail. *Journal of Climate & Applied Meteorology*, v. 25, p. 1956–1958, 1986.

KUNZ, M.; SANDER, J.; KOTTMEIER, C. Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany. *International Journal of Climatology*, v. 29, n. 15, p. 2283–2297, dez. 2009.

KUNZ, MICHAEL; PUSKEILER, M. High-resolution assessment of the hail hazard over complex terrain from radar and insurance data. out. 2010, [S.l: s.n.], out. 2010. p. 427–439.

LACEY, J.; DUTKIEWICZ, J. *BIOAEROSOLS AND OCCUPATIONAL LUNG DISEASE. J. Aerosol Sci.* [S.l: s.n.], 1994.

LEAL, T. F. M. *et al.* Composição iônica majoritária de águas de chuva no centro da cidade de São Paulo. *Química Nova*, v. 27, n. 6, p. 855–861, 2004.

LEE, J. S. *et al.* *Arthrobacter koreensis* sp. nov., a novel alkalitolerant bacterium from soil. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, v. 53, n. 5, p. 1277–1280, 2003.

LEE JR., R. E.; WARREN, G. J.; GUSTA, L. V. *Biological Ice Nucleation and Its Applications.* [S.l: s.n.], 1995.

LI, X. *et al.* Chemical composition of a hailstone: evidence for tracking hailstone trajectory in deep convection. *Science Bulletin*, v. 65, n. 16, p. 1337–1339, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.04.034>>.

LIGHTHART, B. The ecology of bacteria in the al fresco atmosphere. *FEMS Microbiology Ecology*, v. 23, n. 4, p. 263–274, 17 jan. 2006. Disponível em:

<<https://academic.oup.com/femsec/article-lookup/doi/10.1111/j.1574-6941.1997.tb00408.x>>.

LINDEMANN, J.; UPPER, C. D. Aerial Dispersal of Epiphytic Bacteria over Bean Plants. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 50, n. 5, p. 1229–1232, nov. 1985. Disponível em: <<https://journals.asm.org/doi/10.1128/aem.50.5.1229-1232.1985>>.

LINDOW, S. E. Localization of Ice Nucleation Activity and the *iceC* Gene Product in *Pseudomonas syringae* and *Escherichia coli*. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, v. 2, n. 5, p. 262, 1989. Disponível em: <<http://www.apsnet.org/publications/mpmi/backissues/Documents/1989Abstracts/Microbe02-262.htm>>.

LINDOW, S. E. Methods of preventing frost injury caused by epiphytic ice-nucleation- active bacteria. *Plant Disease*, p. 327–333, 1983.

LINDOW, STEVEN E; ARNY, D. C.; UPPER, C. D. *Bacterial Ice Nucleation: A Factor in Frost Injury to Plants*. *Physiology*. [S.l: s.n.], 1982. Disponível em: <<http://www.jstor.orgURL:http://www.jstor.org/stable/4267644>>.

LOHMANN, U.; FEICHTER, J. Global indirect aerosol effects: a review. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 5, n. 3, p. 715–737, 3 mar. 2005. Disponível em: <<https://acp.copernicus.org/articles/5/715/2005/>>.

LÓPEZ, M. D. C.; SOLANO, C. V.; RUFINA, H. M. Fusarium spp. asociadas a clavel (*Dianthus caryophyllus* L.) en Fusarium spp. associated with carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) in Baja California, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, p. 1409–1415, 2014. Disponível em: <<http://isolate.fusariumdb.>>.

LORV, J. S. H.; ROSE, D. R.; GLICK, B. R. Bacterial Ice Crystal Controlling Proteins. *Scientifica*, v. 2014, p. 1–20, 2014.

MAGURRAN, A. E. *Ecological Diversity and Its Measurement*. Cambridge: [s.n.], 1988.

MAHOWALD, N. *et al.* Global distribution of atmospheric phosphorus sources, concentrations and deposition rates, and anthropogenic impacts. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 22, n. 4, p. n/a-n/a, dez. 2008.

MAKI, L. R.; WILLOUGHBY, K. J. *Bacteria as Biogenic Sources of Freezing Nuclei*. *Journal of Applied Meteorology*. [S.l: s.n.], 1978

MANDRI, T.; LIN, J. Isolation and characterization of engine oil degrading indigenous microorganisms in Kwazulu-Natal, South Africa. *African Journal of*

Biotechnology, v. 6, n. 1, p. 23–027, 2007. Disponível em: <<http://www.academicjournals.org/AJB>>.

MANDRIOLI, P. *et al.* Distribution of Microorganisms in Hailstones. *Nature*, v. 246, p. 416, 1973.

MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The Annals of Mathematical Statistics*, v. 18, p. 50–60, 1947.

MARCELINO, E. V.; NUNES, L. H.; KOBAYAMA, M. Banco De Dados De Desastres Naturais: Análise De Dados Globais E Regionais. *Caminhos de Geografia*, v. 7, n. 19, p. 130–149, 2006. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/15495/8774>>.

MARENGO, J. A. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 78, n. 1–3, p. 79–96, 2004.

MARGARITIS, A.; SINGH BASSI, A. *Principles and Biotechnological Applications of Bacterial Ice Nucleation. Critical Reviews in Biotechnology*. [S.l.: s.n.], 1991.

MARTINS, J. A. *et al.* Climatology of destructive hailstorms in Brazil. *Atmospheric Research*, v. 184, p. 126–138, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.10.012>>.

MASON, B. J. The Growth of Snow Crystals. *Scientific American*, v. 204, n. 1, p. 120–133, jan. 1961. Disponível em: <<https://www.scientificamerican.com/article/the-growth-of-snow-crystals>>.

MATTHIAS-MASER, S *et al.* Seasonal variation of primary biological aerosol particles in the remote continental region of Lake Baikal/Siberia. *Atmospheric Environment*, p. 3805–3811, 2000.

MATTHIAS-MASER, S.; JAENICKE, R. The size distribution of primary biological aerosol particles with radii > 0.2 μm in an urban/rural influenced region. *Atmospheric Research*, v. 39, n. 4, p. 279–286, dez. 1995. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0169809595000178>>.

MATTHIAS-MASER, SABINE; JAENICKE, R. *The size distribution of primary biological aerosol particles in the multiphase atmosphere. Aerobiologia*. [S.l.: s.n.], 2000.

MAYOL-BRACERO, O. L. Water-soluble organic compounds in biomass burning aerosols over Amazonia 2. Apportionment of the chemical composition and

importance of the polyacidic fraction. *Journal of Geophysical Research*, v. 107, n. D20, p. 8091, 2002.

MCMMASTER, H. J. *THE POTENTIAL IMPACT OF GLOBAL WARMING ON HAIL LOSSES TO WINTER CEREAL CROPS IN NEW SOUTH WALES*. [S.l: s.n.], 1999.

MICHAUD, A. B. *et al.* Biological ice nucleation initiates hailstone formation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 119, n. 21, p. 12,186-12,197, 16 nov. 2014. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/2014JD022004>>.

MÖHLER, O. *et al.* Heterogeneous ice nucleation activity of bacteria: new laboratory experiments at simulated cloud conditions. *Biogeosciences*, v. 5, n. 5, p. 1425–1435, 21 out. 2008. Disponível em: <<https://bg.copernicus.org/articles/5/1425/2008/>>.

MÖHLER, O. *et al.* Microbiology and atmospheric processes: The role of biological particles in cloud physics. *Biogeosciences*, v. 4, n. 6, p. 1059–1071, 2007.

MORRIS, C E. Microbiology and atmospheric processes: an upcoming era of research on bio-meteorology. *Biogeosciences Discussions*, v. 5, n. 1, p. 191–212, 2008.

MORRIS, C. E. *et al.* Microbiology and atmospheric processes: Research challenges concerning the impact of airborne micro-organisms on the atmosphere and climate. *Biogeosciences*, v. 8, n. 1, p. 17–25, 2011.

MORRIS, C. E. *et al.* Urediospores of rust fungi are ice nucleation active at >10 °c and harbor ice nucleation active bacteria. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 13, n. 8, p. 4223–4233, 2013.

MORRIS, C. E.; GEORGAKOPOULOS, D. G.; SANDS, D. C. Ice nucleation active bacteria and their potential role in precipitation. *Journal De Physique. IV : JP*, v. 121, p. 87–103, 2004.

MORRIS, C. E.; SANDS, D. C. *From Grains to Rain: the link between landscape, airborne microorganisms and climate processes*. [S.l: s.n.], 2012. Disponível em: <<http://bioice.wordpress.com>>.

MORRIS, CINDY E. *et al.* Bioprecipitation: a feedback cycle linking Earth history, ecosystem dynamics and land use through biological ice nucleators in the atmosphere. *Global Change Biology*, v. 20, n. 2, p. 341–351, fev. 2014. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.12447>>.

MUELLER, G. M.; WOLBER, P. K.; WARREN, G. J. Clustering of ice nucleation protein correlates with ice nucleation activity. *Cryobiology*, v. 27, n. 4, p. 416–422, ago. 1990. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/001122409090018Y>>.

MÜLMENSTÄDT, J. *et al.* Frequency of occurrence of rain from liquid-, mixed-, and ice-phase clouds derived from A-Train satellite retrievals. *Geophysical Research Letters*, v. 42, n. 15, p. 6502–6509, 16 ago. 2015. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/2015GL064604>>.

MURRAY, B. J. *et al.* Ice nucleation by particles immersed in supercooled cloud droplets. *Chemical Society Reviews*, v. 41, n. 19, p. 6519–6554, 2012.

MUSIL, D. *et al.* Some Interior Observation of Southeastern Montana Hailstorms. *Journal of Applied Meteorology*, v. 30, p. 1596–1612, 1991.

NAKAYA, U.; TERADA, T. Simultaneous Observations of the Mass, Falling Velocity and Form of Individual Snow Crystals. *J. Fac. Sci.*, p. 191–200, 1935.

NAZAROFF, W. W. Indoor bioaerosol dynamics. *Indoor Air*, v. 26, n. 1, p. 61–78, 1 fev. 2016.

NEDEL, A.; SAUSEN, T. M.; SAITO, S. M. ZONEAMENTO DOS DESASTRES NATURAIS OCORRIDOS NO ESTADO DO RIO GRANDE. *Revista Brasileira de Meteorologia*. [S.l: s.n.], 2012.

NEMECEK-MARSHALL, M.; LADUCA, R.; FALL, R. High-level expression of ice nuclei in a *Pseudomonas syringae* strain is induced by nutrient limitation and low temperature. *Journal of Bacteriology*, v. 175, n. 13, p. 4062–4070, jul. 1993. Disponível em: <<https://journals.asm.org/doi/10.1128/jb.175.13.4062-4070.1993>>.

NIALL, S.; WALSH, K. The impact of climate change on hailstorms in Southeastern Australia. *International Journal of Climatology*, v. 25, n. 14, p. 1933–1952, 30 nov. 2005.

NOVAKOV, T. *et al.* Aerosol organic carbon to black carbon ratios: Analysis of published data and implications for climate forcing. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 110, n. 21, p. 1–12, 2005.

O'BRIEN, R. D.; LINDOW, S. E. Effect of Plant Species and Environmental Conditions on Ice Nucleation Activity of *Pseudomonas syringae* on Leaves. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 54, n. 9, p. 2281–2286, set. 1988. Disponível em: <<https://journals.asm.org/doi/10.1128/aem.54.9.2281-2286.1988>>.

ODUM, E. P. *Fundamentals of Ecology*. Philadelphia: W. B. Saunders Company, 1971.

OH, H. W. *et al.* Ultrastructural analysis of chemical synapses and gap junctions between *Drosophila* brain neurons in culture. *Developmental Neurobiology*, v. 68, n. 3, p. 281–294, 15 fev. 2008.

ORTEGA, K. L.; KRAUSE, J. M.; RYZHKOV, A. V. Polarimetric radar characteristics of melting hail. Part III: Validation of the algorithm for hail size discrimination. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 55, n. 4, p. 829–848, 2016.

PAISANI, J. C.; PONTELLI, M. E.; ANDRES, J. *SUPERFÍCIES APLAINADAS EM ZONA MORFOCLIMÁTICA SUBTROPICAL ÚMIDA NO PLANALTO BASÁLTICO DA BACIA DO PARANÁ (SW PARANÁ / NW SANTA CATARINA): PRIMEIRA APROXIMAÇÃO*. [S.l: s.n.], 2008.

PALAIOMYLITOU, M. A. *et al.* Phospholipid Analysis and Fractional Reconstitution of the Ice Nucleation Protein Activity Purified from *Escherichia coli* Overexpressing the *inaZ* Gene of *Pseudomonas syringae*. *Cryobiology*, v. 37, n. 1, p. 67–76, ago. 1998. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0011224098921022>>.

PASTEUR, L. Mémoire sur les corpuscules organisés qui existent dans l'atmosphère. *Ann. Chim. Phys.*, v. 3, p. 5–110, 1890.

PAWANKAR, R. *Allergic diseases and asthma: A global public health concern and a call to action*. *World Allergy Organization Journal*. [S.l.]: BioMed Central Ltd. , 19 maio 2014

PIELOU, E. C. The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, v. 13, p. 131–144, dez. 1966. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022519366900130>>.

PIETSCH, R. B.; VINATZER, B. A.; SCHMALE, D. G. Diversity and Abundance of Ice Nucleating Strains of *Pseudomonas syringae* in a Freshwater Lake in Virginia, USA. *Frontiers in Microbiology*, v. 8, n. MAR, 9 mar. 2017. Disponível em: <<http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fmicb.2017.00318/full>>.

PINHEIRO, H. R.; JUAN ESCOBAR, G. C.; ANDRADE, K. M. Aplicação de uma ferramenta objetiva para previsão de tempo severo em ambiente operacional. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 29, n. 2, p. 209–228, 2014.

PÖHLKER, C. *et al.* Biogenic Potassium Salt Particles as Seeds for Secondary Organic Aerosol in the Amazon. *Science*, v. 337, n. 6098, p. 1075–1078, 31 ago. 2012.

POOLEY, L.; BROWN, T. A. Effects of culture conditions on expression of the ice nucleation phenotype of *Pseudomonas syringae*. *FEMS Microbiology Letters*, v. 77, n. 2–3, p. 229–232, 15 jan. 1991. Disponível em: <<https://academic.oup.com/femsle/article-lookup/doi/10.1111/j.1574-6968.1991.tb04353.x>>.

PÖSCHL, U. *et al.* Rainforest aerosols as biogenic nuclei of clouds and precipitation in the Amazon. *Science*, v. 329, n. 5998, p. 1513–1516, 2010.

PÖSCHL, ULRICH. Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health Effects. *Angewandte Chemie International Edition*, v. 44, n. 46, p. 7520–7540, 25 nov. 2005. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/anie.200501122>>.

POULEUR, S. *et al.* Ice Nucleation Activity in *Fusarium acuminatum* and *Fusarium avenaceum*. *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*. [S.l.: s.n.], 1992.

POZZA, S. A. *et al.* Sources of particulate matter: emission profile of biomass burning. *International Journal of Environment and Pollution*, v. 36, n. 1/2/3, p. 276, 2009.

PREFEITURA MUNICIPAL DE GUARUJÁ DO SUL. *Município de Guarujá do Sul*. Disponível em: <<https://www.guarujadosul.sc.gov.br/cms/pagina/ver/codMapaltem/40169>>. Acesso em: 10 set. 2021.

PUMMER, B. G. *et al.* Ice nucleation by water-soluble macromolecules. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 15, n. 8, p. 4077–4091, 2015.

PUMMER, B. G. *et al.* Suspendable macromolecules are responsible for ice nucleation activity of birch and conifer pollen. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 12, n. 5, p. 2541–2550, 7 mar. 2012. Disponível em: <<https://acp.copernicus.org/articles/12/2541/2012/>>.

PUNGE, H. J.; KUNZ, M. *Hail observations and hailstorm characteristics in Europe: A review. Atmospheric Research*. [S.l.]: Elsevier Ltd. , 1 jul. 2016

RAGHAVAN, S. *Radar meteorology*. [S.l.: s.n.], 2013. v. 27.

RAM, K.; SARIN, M. M. Day–night variability of EC, OC, WSOC and inorganic ions in urban environment of Indo-Gangetic Plain: Implications to secondary aerosol formation. *Atmospheric Environment*, v. 45, n. 2, p. 460–468, jan. 2011.

REASONER, D. J.; GELDREICH, E. E. *A New Medium for the Enumeration and Subculture of Bacteria from Potable Water*. *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*. [S.l.: s.n.], 1985. Disponível em: <<https://journals.asm.org/journal/aem>>.

REDDY, G. S. N. *et al.* *Arthrobacter roseus* sp. nov., a psychrophilic bacterium isolated from an Antarctic cyanobacterial mat sample. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, v. 52, n. 3, p. 1017–1021, 2002.

REEVE, M. A.; BACHMANN, D. MALDI-TOF MS protein fingerprinting of mixed samples. *Biology Methods and Protocols*, v. 4, n. 1, 1 jan. 2019. Disponível em: <<https://academic.oup.com/biomethods/article/doi/10.1093/biomethods/bpz013/5573534>>.

RENARD, P. *et al.* Screening of cloud microorganisms isolated at the Puy de Dôme (France) station for the production of biosurfactants. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 16, n. 18, p. 12347–12358, 29 set. 2016. Disponível em: <<https://acp.copernicus.org/articles/16/12347/2016/>>.

RINEHART, R. E. *Radar for meteorologists*. [S.l.]: University of North Dakota, 1991.

ROGERS, R. R.; YAU, M. K. *A Short Course in Cloud Physics*. [S.l.: s.n.], 1976. v. 113.

ROH, S. W. *et al.* *Arthrobacter soli* sp. nov., a novel bacterium isolated from wastewater reservoir sediment. *Journal of Microbiology*, v. 46, n. 1, p. 40–44, fev. 2008.

ROMANTSCHUK, M.; BAMFORD, D. H. The causal agent of halo blight in bean, *Pseudomonas syringae* pv. *phaseolicola*, attaches to stomata via its pili. *Microbial Pathogenesis*, v. 1, n. 2, p. 139–148, 1986.

RUGGLES, J. A.; NEMECEK-MARSHALL, M.; FALL, R. Kinetics of appearance and disappearance of classes of bacterial ice nuclei support an aggregation model for ice nucleus assembly. *Journal of Bacteriology*, v. 175, n. 22, p. 7216–7221, nov. 1993. Disponível em: <<https://journals.asm.org/doi/10.1128/jb.175.22.7216-7221.1993>>.

RYZHKOV, A. V. *et al.* Polarimetric radar characteristics of melting hail. part II: Practical implications. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 52, n. 12, p. 2871–2886, 2013.

ŠANTL-TEMKIV, T. *et al.* Hailstones: A Window into the Microbial and Chemical Inventory of a Storm Cloud. *PLoS ONE*, v. 8, n. 1, p. e53550, 23 jan. 2013. Disponível em: <<https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0053550>>.

SANTOS, D. C. O URBANO NA FRONTEIRA: A REALIDADE DAS CIDADES DE BARRAÇÃO/PR, DIONÍSIO CERQUEIRA/SC E BERNARDO DE IRIGOYEN/MISIONES/ARG. *Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia Maringá*, v. 10, n. 2, p. 163–181, 2018.

SANTOS, H. G.; ZARONI, M. J.; CLEMENTE, E. P. *Árvore do conhecimento: solos tropicais*. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000fzyjaywi02wx5ok0q43a0r9rz3uhk.html>.

SAUVAGEOT, H. *Radar meteorology*. [S.l.]: Artech House Publishers, 1992.

SCHNELL, R. C.; VALI, G. Biogenic Ice Nuclei: Part I. Terrestrial and Marine Sources. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 33, p. 1554–1564, 1976.

SCHUSTER, S. S.; BLONG, R. J.; SPEER, M. S. A hail climatology of the greater Sydney area and New South Wales, Australia. *International Journal of Climatology*, v. 25, n. 12, p. 1633–1650, set. 2005.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. *ATMOSPHERIC From Air Pollution to Climate Change SECOND EDITION*. [S.l.: s.n.], 2006.

SELIGA, T. A.; BRINGI, V. N. Potential Use of Radar Differential Reflectivity Measurements at Orthogonal Polarizations for Measuring Precipitation. *Journal of Applied Meteorology*, v. 15, n. 1, p. 69–76, jan. 1976.

SILVA FILHA, M. H. N. L.; BERRY, C.; REGIS, L. *Lysinibacillus sphaericus*. *Advances in Insect Physiology*. [S.l.]: Academic Press Inc., 2014. v. 47. p. 89–176. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128001974000038>>.

SIMEPAR, S. DE T. E M. A. DO P. *Boletim Climatológico*. Disponível em: <http://www.simepar.br/prognozweb/simepar/timeline/boletim_climatologico>. Acesso em: 11 mar. 2022.

SIMPSON, E. H. Measurement of Diversity. *Nature*, v. 163, n. 4148, p. 688–688, abr. 1949. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/163688a0>>.

SKRIPNIKOVÁ, K.; ŘEZÁČOVÁ, D. Comparison of radar-based hail detection using single- and dual-polarization. *Remote Sensing*, v. 11, n. 12, 2019a.

SKRIPNIKOVÁ, K.; ŘEZÁČOVÁ, D. Comparison of radar-based hail detection using single- and dual-polarization. *Remote Sensing*, v. 11, n. 12, 1 jun. 2019b.

SKRIPNIKOVÁ, K.; ŘEZÁČOVÁ, D. Radar-based hail detection. *Atmospheric Research*, v. 144, p. 175–185, 1 jul. 2014.

SMITH, D. J. *Microbes in the upper atmosphere and unique opportunities for astrobiology research*. *Astrobiology*. [S.l: s.n.], 1 out. 2013

SOARES, R. M. *Curtobacterium flaccumfaciens* sp. *flaccumfaciens* na cultura da soja. . Londrina: [s.n.], jun. 2017. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/fale-conosco>>.

SOLOMON, S. *et al.* Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007, Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

SORENSEN, T. *A method of establishing groups of equal amplitude in plant society based on similarity of species content*. . [S.l: s.n.], 1948.

STEIN, A. F. *et al.* NOAA's Hysplit atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 96, n. 12, p. 2059–2077, 2015.

STORELVMO, T.; HOOSE, C.; ERIKSSON, P. Global modeling of mixed-phase clouds: The albedo and lifetime effects of aerosols. *Journal of Geophysical Research*, v. 116, n. D5, p. D05207, 15 mar. 2011. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2010JD014724>>.

STRAKA, J. M.; ZRNIĆ, D. S.; RYZHKOV, A. V. Bulk Hydrometeor Classification and Quantification Using Polarimetric Radar Data: Synthesis of Relations. *Journal of Applied Meteorology*, v. 39, n. 8, p. 1341–1372, ago. 2000.

SUN, J.; ARIYA, P. A. Atmospheric organic and bio-aerosols as cloud condensation nuclei (CCN): A review. *Atmospheric Environment*, v. 40, n. 5, p. 795–820, 2006.

SZYRMER, W.; ZAWADZKI, I. Biogenic and Anthropogenic Sources of Ice-Forming Nuclei: A Review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 78, n. 2, p. 209–228, 1997.

TEMKIV, T. Š. *et al.* The microbial diversity of a storm cloud as assessed by hailstones. *FEMS Microbiology Ecology*, v. 81, n. 3, p. 684–695, set. 2012. Disponível em: <<https://academic.oup.com/femsec/article-lookup/doi/10.1111/j.1574-6941.2012.01402.x>>.

TOMASI, C.; FUZZI, S.; KIM, G. R. *Wiley Series in Atmospheric Physics and Remote Sensing Radiative Transfer Processes in Multi-dimensional Radiative Radiative Transfer in Coupled Satellite Remote Sensing of Clouds Atmospheric Radiative Transfer Satellite Microwave Remote*. [S.l.: s.n.], 2016.

TOMASI, C.; FUZZI, S.; KOKHANOVSKY, A. *Atmospheric Aerosols Life: Life Cycles and Effects on Air Quality and Climate*. [S.l.]: Wiley-VCH, 2017.

TONINI, R. M. C. W.; REZENDE, C. E.; GRATIVOL, A. D. DEGRADAÇÃO E BIORREMEDIAÇÃO DE COMPOSTOS DO PETRÓLEO POR BACTÉRIAS: REVISÃO. *Oecologia Australis*, v. 14, n. 04, p. 1010–1020, dez. 2010. Disponível em: <<https://revistas.ufrj.br/index.php/oa/article/view/7128>>.

TSAY, G. S. *COMPOSIÇÃO MICROBIOLÓGICA CULTIVÁVEL DO GRANIZO DE UMA TEMPESTADE NO SUDOESTE DO PARANÁ*. 2017. 1–74 f. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2017.

VAÏTILINGOM, MICKAËL *et al.* Contribution of microbial activity to carbon chemistry in clouds. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 76, n. 1, p. 23–29, jan. 2010.

VAÏTILINGOM, MICKAEL *et al.* Potential impact of microbial activity on the oxidant capacity and organic carbon budget in clouds. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 110, n. 2, p. 559–564, 8 jan. 2013.

VALI, G. Principles of ice nucleation. *Biological Ice Nucleation and its Applications*, n. January 1995, p. 1–28, 1995.

VALI, G. Quantitative Evaluation of Experimental Results on the Heterogeneous Freezing Nucleation of Supercooled Liquids. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 28, p. 402–409, 1970.

VONNEGUT, B. The Nucleation of Ice Formation by Silver Iodide. *Journal of Applied Physics*, v. 18, n. 7, p. 593–595, jul. 1947. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1697813>>.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. *Atmospheric science: An introductory survey*. Second edition ed. [S.l.]: Elsevier AP, 2006.

WANG, P. K. *Physics and Dynamics of Clouds and Precipitation*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2013.

WAPLER, K. The life-cycle of hailstorms: Lightning, radar reflectivity and rotation characteristics. *Atmospheric Research*, v. 193, p. 60–72, 1 set. 2017.

WHO. *Ambient (outdoor) air quality and health*. Disponível em: <[https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)>. Acesso em: 6 jan. 2022.

WILKENDORF, L. S. *et al.* Update on Matrix-Assisted Laser Desorption Ionization–Time of Flight Mass Spectrometry Identification of Filamentous Fungi. *Journal of Clinical Microbiology*, v. 58, n. 12, 18 nov. 2020. Disponível em: <<https://journals.asm.org/doi/10.1128/JCM.01263-20>>.

WILKINSON, D. M. *et al.* Modelling the effect of size on the aerial dispersal of microorganisms. *Journal of Biogeography*, v. 39, n. 1, p. 89–97, jan. 2012.

WILSON, S. L.; KELLEY, D. L.; WALKER, V. K. Ice-active characteristics of soil bacteria selected by ice-affinity. *Environmental Microbiology*, v. 8, n. 10, p. 1816–1824, out. 2006.

WOMACK, A. M.; BOHANNAN, B. J. M.; GREEN, J. L. *Biodiversity and biogeography of the atmosphere*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. [S.l.]: Royal Society. , 27 nov. 2010

XU, Z. *et al.* *Bioaerosol science, technology, and engineering: Past, present, and future*. *Aerosol Science and Technology*. [S.l.: s.n.]. , nov. 2011

YANKOFFSKY, S. A. *et al.* Some Basic Characteristics of Bacterial Freezing Nuclei. *Journal of Applied Meteorology*, v. 20, n. 9, p. 1013–1019, set. 1981. Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0450\(1981\)020<1013:SBCOBF>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0450(1981)020<1013:SBCOBF>2.0.CO;2)>.

ZHAI, W. *et al.* Profile of the skin microbiota in a healthy Chinese population. *Journal of Dermatology*, v. 45, n. 11, p. 1289–1300, 1 nov. 2018.

ZHANG, Z. *et al.* Significant influence of fungi on coarse carbonaceous and potassium aerosols in a tropical rainforest. *Environmental Research Letters*, v. 10, n. 3, p. 034015, 1 mar. 2015.

ZIMMERLI, P. *Hailstorms in Europe—A New Look at a Familiar Risk*. . Zurich: [s.n.], 2005.

ZIPSER, E. J. *et al.* Where are the most: Intense thunderstorms on Earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 87, n. 8, p. 1057–1071, 2006.

APÊNDICE A – DADOS AMOSTRAIS

Foram coletadas amostras de 4 municípios (Tabela A1). Por motivos de derretimento dos granizos coletados, as amostras do município de Princesa (SC) no dia 30 de junho de 2020 e de Barracão (PR) no dia 15 de agosto de 2020 não foram analisadas. Estas se encontram guardadas no Laboratório do Instituto de Química da USP para eventuais análises que possam vir a ocorrer.

Tabela A 1 - Locais de coleta das pedras de granizos amostradas

Data	Local	Latitude	Longitude
30 de junho de 2020	Guarujá do Sul - SC	26°23'59"S	53°31'09"W
	Princesa -SC	26°20'48"S	53°34'39"W
28 de julho de 2020	Barracão -PR	26°15'7"S	53°36'50"W
15 de agosto de 2020	Barracão - PR	26°16'39"S	53°33'41"W
	Dionísio Cerqueira - SC	26°21'58"S	53°33'50"W
	Dionísio Cerqueira - SC	26°19'56"S	53°35'15"W
	Dionísio Cerqueira - SC	26°19'2"S	53°37'49"W

APÊNDICE B – COMPOSIÇÃO DOS MEIOS DE CULTURA UTILIZADOS

Para a realização do cultivo da microbiota, utilizou-se os meios de cultura R2A (Tabela B1) e YM (Tabela B2).

O R2A foi usado para cultivo de bactérias pelo método de plaqueamento.

Tabela B 1 - Composição do meio de cultura Ágar R2A

Ingredientes	g/L
Peptona Proteose	0,5
Extrato de Levedura	0,5
Digestão Ácida de Caseína	0,5
Glicose	0,5
Amido Solúvel	0,5
Fosfato Dipotássico	0,3
Sulfato de Magnésio	0,024
Piruvato de Sódio	0,3
Agar	15,0

O meio de cultura YM foi utilizado para crescimento de microrganismos fúngicos pelo método de plaqueamento.

Tabela B 2 - Composição do meio de cultura Ágar R2A

Ingredientes	g/L
Peptona	5,0
Extrato de Levedura	3,0
Extrato de Malte	3,0
Glicose	10,0
Agar	20,0

APÊNDICE C - Estudo da habilidade dos bioaerossóis como núcleos de gelo

Para determinar o potencial dos microrganismos (bactérias e fungos) como potenciais núcleos de gelo, as amostras foram coletas dos microrganismos identificados a partir dos granizos amostrados.

O equipamento utilizado para determinar o potencial dos microrganismos como núcleos de gelo foi o Banho Ultratermostático Microprocessado com Circulador (Quimis).

O Banho Ultratermostático Microprocessado com Circulador (Quimis) foi preenchido com solução de etanol 96% e a temperatura varia entre -20 °C e 120 °C. Para o congelamento das amostras, utilizou-se uma bandeja de metal revestida com parafina para depositar a solução que será analisada. O equipamento está alocado no Instituto de Química da USP. Para a realização dessa etapa utilizou-se a metodologia desenvolvida por Araujo e colaboradores em 2017. Este experimento deu-se de forma piloto para direcionar futuras análises.

Para determinar a atividade como núcleo de gelo para cada amostra, utilizou-se a quantificação feita pelo ensaio de congelamento de gotículas. As soluções foram organizadas na bandeja de metal revestida com parafina, em 32 gotas de 10 µl cada para cada amostra analisada. Em seguida, selou-se a bandeja com tampa de acrílico transparente. Após isso, colocou-se a bandeja no banho termostático de 96% de etanol. O número de gotas congelados foi verificado entre as temperaturas de -2 °C e -10 °C, e foi contado cumulativamente. O cálculo da concentração cumulativa de núcleos de gelo foi descrito por Vali (1971):

$$c(T) = [\ln(N_{total}) - \ln(N_{total} - N(T))] / A$$

Onde $c(T)$ refere-se ao número de núcleos de gelo por célula na temperatura T , N_{total} é o número total de gotas testadas, $N(T)$ é o número de gotas congeladas na temperatura T , e A é o número de células por gota.

As frequências de congelamento observadas para o fungo foram relativamente próximas, a maior temperatura de congelamento foi -9 °C.

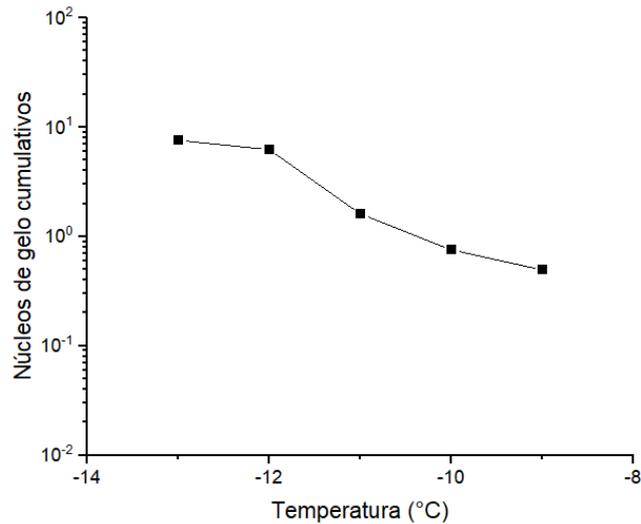


Figura AC 1 - Espectro da atividade de nucleação de gelo do *Fusarium* de acordo com o cálculo proposto por Vali (1971)

Ensaio de nucleação de bactérias renderam baixa atividade de nucleação de gelo. A maioria das bactérias estudadas não apresentaram resultados representativos. Avaliou-se estudar bactérias que crescessem em diferentes temperaturas de incubação. Ainda assim, observou-se inconsistências nestes ensaios. Não evidenciou atividade de nucleação de gelo das bactérias identificadas neste trabalho.

ANEXO A – FIGURAS



Foto fornecida pelos voluntários Ivanir Spironello e Seli Vergutz que coletaram a amostra em 30 de junho de 2020 no município de Guarujá do Sul - SC

Foto fornecida pelos voluntários Antônio e Gilmar Deborra que coletaram a amostra em 28 de julho de 2020 no município de Barracão - PR

Foto fornecida pelo voluntário Marcelo Walbrick que coletou a amostra em 15 de agosto de 2020 no município de Dionísio Cerqueira - SC

Figura AA 1 - Formato das pedras de granizo amostradas

Figura AA 2 – Colônias bacterianas formadas