



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE BIOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE MICOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA DE FUNGOS

FRANCISCA ROBERVÂNIA SOARES DOS SANTOS

**DIVERSIDADE DE FUNGOS MUCORACÉOS EM DOIS BREJOS DE ALTITUDE
DA MESOREGIÃO AGRESTE PERNAMBUCANO**

RECIFE

2023

FRANCISCA ROBERVÂNIA SOARES DOS SANTOS

**DIVERSIDADE DE FUNGOS MUCORACÉOS EM DOIS BREJOS DE ALTITUDE
DA MESOREGIÃO AGRESTE PERNAMBUCANO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia de Fungos, do Departamento de Micologia, do Centro de Biociências, da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestra em Biologia de Fungos.

Área de Concentração: Micologia básica.

Orientador (a): Dr. André Luiz Cabral M. de A. Santiago (UFPE)

Coorientador (a): Dr. Diogo Paes da Costa (UFRPE)

RECIFE

2023

Catálogo na Fonte
Bibliotecário: Marcos Antonio Soares da Silva
CRB4/1381

Santos, Francisca Robervânia Soares dos

Diversidade de fungos mucoráceos em dois brejos de altitude da mesoregião Agreste Pernambuco. /
Francisca Robervânia Soares dos Santos. – 2023.

106 f. : il., fig.; tab.

Orientador: André Luiz Cabral M. de A. Santiago.

Coorientador: Diogo Paes da Costa.

Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Biologia Fungos da Universidade
Federal de Pernambuco, 2023.

Inclui referências e apêndice.

1. Ecologia. 2. Filogenia. 3. Mucorales. 4. Solo. 5. Taxonomia. I. Santiago, André Luiz Cabral M. de
A. (Orient.). II. Costa, Diogo Paes da (Coorient.). III. Título.

579.5

CDD (22.ed.)

UFPE/CB – 2024-181

FRANCISCA ROBERVÂNIA SOARES DOS SANTOS

DIVERSIDADE DE FUNGOS MUCORACÉOS EM DOIS BREJOS DE ALTITUDE DA
MESOREGIÃO AGRESTE PERNAMBUCANO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia de Fungos, do Departamento de Micologia, do Centro de Biociências, da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestra em Biologia de Fungos.

Data de defesa: 11/09/2023

COMISSÃO EXAMINADORA

Dr. André Luiz Cabral Monteiro de Azevedo Santiago – (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco - Departamento de Micologia

Dra. Catarina Letícia Ferreira de Lima – (Examinador Titular Externo)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Dr. Diogo Xavier de Lima – (Examinador Titular Externo)
Secretária de Educação de Pernambuco - SEPE

Dr. Carlos Alberto Fragoso de Souza – (Examinador Suplente Externo)
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco - UFAPE

Dr. Rafael José Vilela de Oliveira – (Examinador Suplente Externo)
Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste - CETENE

*A minha mãe por todo amor
e dedicação que jamais esquecerei, aos
meus irmãos por serem meu apoio
e ao meu pai (in memoriam) pela proteção.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre ser minha fortaleza nos momentos mais difíceis.

À minha mãe, Telma Soares, por ser exemplo de mulher guerreira, uma inspiração e a minha maior incentivadora.

Aos meus irmãos, Socorro Soares e Robervalter Soares, por serem os que sempre estavam lá para me escutar, me ajudar e me apoiar.

Ao meu namorado, Robson Figueiredo, por estar sempre ao meu lado, me proporcionando os melhores momentos de risadas e de companheirismo.

Aos meus grandes amigos, Elizabele Freitas, Fernando Freitas, Hiago Maciel, Eudes Santos, Thaís Moura, Patrícia Maciel e Larissa Karen, por me proporcionarem os momentos mais alegres e me mostrarem o verdadeiro significado de amizade.

Ao meu afilhado, José Pedro, que sempre fez as minhas idas a Fortaleza recheadas de “fofura”. A minha querida amiga, Adryele Saraiva, que me ajuda desde a graduação e que aguenta meus desabafos e reclamações, sempre sendo uma das minhas pessoas preferidas no mundo.

Aos meus queridos companheiros do laboratório de Fungos Zigospróricos, da UFPE, em especial Thalline Cordeiro e Catarina Lima que foram grandes presentes divinos, Mateus Oliveira, Leslie Freitas, Joana Leitão, Alice Barbosa, Carolina Pinto, Suzana Brito e os ex-intergrantes Carlos Fragooso e Diogo Xavier, por serem pessoas inspiradoras e pesquisadoras e pesquisadores que admiro bastante. Obrigada por toda a aprendizagem e pelas conversas super irreverentes, pela ajuda nas atividades de bancada, molecular, nos artigos e na vivência de uma Pós-Graduação.

Aos integrantes do grupo de endofíticos, da UFPE, Rafael Vilela, Rejane Ferreira, Thays Oliveira, Deyse Viana, Mayara Alice e Elaine Muniz por toda parceria na divisão do laboratório, ajuda e por serem tão receptivos e agradáveis.

Às meninas do 202B, Nathalia Nogueira, Laura Silva, Gérsia Gonçalves, Brenna Veríssimo e Sara Nogueira, a quem eu tive o prazer de conhecer e conviver durante a experiência de morar em Recife. Os dias foram mais leves e divertidos com vocês.

Ao Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA), nas pessoas de Luciana Gurgel e Waldemar Melo (Dema), pela parceria e colaboração no traslado para as coletas e análise de solo, que permitiram a realização desse trabalho.

Às pessoas responsáveis pelas áreas de coleta, Elizabeth Andrade e seu marido (Brejão), e ao mateiro, José Feliciano da Costa (Zé Bier) e ao proprietário Marcelo Fernandes (Sanharó), pelo aceite em permitir que essa pesquisa fosse realizada.

Ao meu coorientador, Diogo Costa, por todo o envolvimento, comprometimento, cooperação e, principalmente, pela paciência em sempre elucidar minhas dúvidas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Biologia de Fungos (PPGBF), por todo auxílio e responsabilidade para com a pesquisa científica.

Ao meu orientador, André Santiago, por toda dedicação, aprendizado e paciência durante esses dois anos de mestrado. Muito obrigada por todo ensinamento e experiência transmitida.

Aos docentes do PPGBF, pela transmissão de conhecimento durante as disciplinas ofertadas.

À Universidade Federal de Pernambuco, por me acolher e me permitir ser uma integrante dessa comunidade tão engajada no ensino, pesquisa e extensão.

Obrigada a todos!

“O correr da vida embrulha tudo, a vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem.”

[Guimarães Rosa, J. (1986), trecho do romance *Grande Sertão Veredas*].

RESUMO

Mucorales abriga o maior número de espécies dentre as três ordens pertencentes ao filo Mucoromycota, com mais de 320 espécies descritas. A maioria dos fungos mucoráceos exibe crescimento rápido, mesmo em meios de cultura pobres em nutrientes, sendo a maioria das espécies sapróbias do solo, podendo também ser encontradas em serrapilheira, excrementos de animais e alimentos estocados. Embora alguns inventários desses fungos tenham sido realizados no Brasil, pouco se conhece sobre a distribuição e ecologia desse grupo no solo de áreas de brejo de altitude, que são ilhas de matas úmidas no semiárido nordestino. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo principal conhecer como as comunidades de fungos mucoráceos estão estruturadas no solo de dois diferentes brejos de altitude de Pernambuco, avaliando as possíveis influências dos atributos químicos do solo, da pluviosidade e temperaturas do solo e do ar na estruturação dessas comunidades. Foram realizadas quatro expedições para coleta de solo nos brejos de Brejão e de Jenipapo, em Pernambuco. Para o isolamento, cinco miligramas de solo foram espalhados sobre o meio de cultura ágar gérmem de trigo, adicionado de cloranfenicol, contido em placas de Petri, em quintuplicata. As colônias foram purificadas e estocadas em tubos de ensaio contendo o meio batata dextrose ágar e identificados com base na literatura específica. Foram identificadas 35 espécies e duas variedades de fungos mucoráceos, incluindo uma primeira ocorrência para a América do Sul e duas novas espécies. *Cunninghamella bertholletiae*, *Absidia saloaensis* e *A. pernambucoensis* foram as espécies mais abundantes e frequentes nos brejos de Brejão e do brejo de Jenipapo. De acordo com os resultados, os dois brejos estudados não diferiram com relação à diversidade e riqueza de espécies de fungos mucoráceos, o que indica que a precipitação e temperaturas do solo e do ar, bem como as variáveis químicas do solo não influenciam nesses parâmetros ecológicos para esses fungos, nas áreas de estudo. No entanto, foi verificado que os dois brejos diferem com relação à composição das comunidades dos fungos mucoráceos, e que essa composição varia com relação às coletas realizadas no brejo de Brejão, indicando que os fatores supracitados, com exceção da temperatura do solo, influenciam as comunidades de fungos mucoráceos nesses brejos, embora essa influência tenha sido limitada no brejo de Jenipapo. Os atributos do solo influenciam a comunidade de fungos mucoráceos de forma específica, ou seja, o grau de influência dessas variáveis variou de acordo com a espécie do fungo.

Palavras-chave: Ecologia; filogenia; Mucorales; solo; taxonomia.

ABSTRACT

Mucorales have the largest number of species among the three orders belonging to the phylum Mucoromycota, with more than 320 described species. Most mucoraceous fungi exhibit rapid growth even in nutrient-poor culture media, with most species being soil saprobes, and they can also be found in litter, animal excrement, and stored food. Although some inventories of these fungi have been carried out in Brazil, little is known about the distribution and ecology of this group in soils of Brazilian highland swamp areas, which are islands of humid forests in the northeastern semi-arid region of Brazil. Thus, the following work has as the main aim to know how the mucous fungi communities are structured in the soil of two different highland swamps of Pernambuco, evaluating the possible influences of the soil chemical attributes, rainfall and temperatures, and also of the air, on the structuring of these communities. Four expeditions were carried out to collect soil in the Brejão and Jenipapo swamps, in Pernambuco. For the isolation, five milligrams of soil were spread over the wheat germ agar culture medium, with the addition of chloramphenicol, contained in Petri dishes, in quintuplicate. Colonies were purified and stored in test tubes containing potato dextrose agar medium and, based on the specific literature, they were identified. Thirty-five species and two varieties of mucoraceous fungi were identified, including a first occurrence in South America, and two new species. *Cunninghamella bertholletiae*, *Absidia saloensis*, and *A. pernambucoensis* were the most abundant and frequent species in the Brejão and Jenipapo swamps. According to the results, the two studied marshes did not differ in relation to the mucous fungi species diversity and richness, which indicates that the precipitation, soil and air temperatures, as well as soil chemical variables do not influence these ecological parameters for these fungi from the study areas. However, it was verified that the two marshes differ in relation to the composition of the mucoraceous fungi communities, and that this composition varies in relation to the collections carried out in the Brejão swamp, indicating that the aforementioned factors, with the exception of soil temperature, influence the mucoraceous fungus communities in these marshes, although this influence was limited in the Jenipapo marsh. Soil attributes influence the mucoraceous fungus community in a specific way, that is, the degree of influence of these variables varied according to the fungus species.

Keywords: Ecology; phylogeny; Mucorales; soil; taxonomy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Alguns gêneros de Mucorales encontrados comumente em amostras de solo a) <i>Absidia</i> : Esporangióforo com esporângio globosa para piriforme. b) <i>Cunninghamella</i> : Esporóforo com ramificações simples e vesículas laterais clavadas e vesícula axial globosa com esterigmas aparentes. c) <i>Backusella</i> : Esporóforo com ramificação simpodial e esporangióolos multiesporados. d) <i>Gongronella</i> : Esporangióforo surgindo de hifa área com esporângio globoso e apófise destacada. e) <i>Mucor</i> : Esporangióforo simples com esporângio globoso. f) <i>Rhizopus</i> : Esporangióforo com esporângio rompido liberando esporangiosporos e columela deformada. g) Zigosporo: com células suspensoras. Escala = 25 μ m.....	25
Figura 2.	Localização do ponto de coleta no Município de Brejão (Brejão - PE, Brasil). A. Mapa da América do Sul com o estado de Pernambuco em verde escuro. B. Mapa do estado de Pernambuco. C. Mapa do município de Brejão com destaque do local de coleta em vermelho.....	37
Figura 3.	Aspecto da vegetação do Brejo de altitude de Brejão, Brejão, Pernambuco, Brasil.....	38
Figura 4.	Localização do ponto de coleta no Município de Sanharó (Sanharó - PE, Brasil). A. Mapa da América do Sul com o estado de Pernambuco em verde escuro. B. Mapa do estado de Pernambuco. C. Mapa do município de Sanharó com destaque do local de coleta em vermelho.....	38
Figura 5.	Aspecto da vegetação do Brejo de altitude de Jenipapo, Sanharó, Pernambuco, Brasil.....	39
Figura 6.	Representação do esquema de coletas de solo por quadrantes em cada Brejo de altitude visitado.....	41
Figura 7.	Análise da estrutura das comunidades de fungos mucoráceos no solo dos brejos de atitude das Brejão e Jenipapo, Pernambuco, em quatro épocas diferentes. A ordenação multivariada utilizada foi o escalonamento multidimensional não-métrico (NMDs) utilizando a distância de Jaccard sobre a matriz de presença e ausência de fungos contabilizados em placas de Petri.....	51
Figura 8.	Riquezas observadas e extrapolações para espécies de fungos mucoráceos encontrados em diferentes expedições (coletas), nos brejos	

	de altitude de Brejão (a) e Jenipapo (b). Linhas contínuas representam a curva ajustada e a pontilhada indica a extrapolação da riqueza para o caso em que o número de indivíduos coletados supera o observado.....	52
Figura 9.	Dispersões dos índices de diversidade para a composição de fungos mucoráceos no solo de dois brejos de altitude inventariados. a-b) Riqueza de espécies dos fungos mucoráceos em cada coleta, por brejo de altitude. c-d) índice de diversidade de Shannon-Wiener; e-f) índice de diversidade de Simpson.....	53
Figura 10.	a) Composição relativa das espécies dos fungos mucoráceos mais contrastantes no solo dos brejos de altitude Brejão e Jenipapo, Pernambuco. b) Número de ocorrência das espécies mais contrastantes no total das placas das amostras.....	53
Figura 11.	Associações monotônicas entre a ocorrência de espécies de fungos mucoráceos e as variáveis químicas do solo dos brejos de altitude de Brejão e Jenipapo, Pernambuco.....	55
Figura 12.	Associações monotônicas entre a ocorrência de espécies de fungos mucoráceos e variáveis climáticas dos brejos de altitude analisados. Correlações das espécies de fungos dos dois brejos analisados com as variáveis climáticas.....	57
Figura 13.	<i>Backusella paraconstricta</i> (URM 8637) A. Verso da colônia (esquerda) e reverso (direita), em (MEA), a 25 °C. B. Esporangióforo com esporângio. C. Ramificação do esporangióforo com esporângio. D–H. Esporangióforo com columela. I, J. esporangióforo curto com esporangíolos. K. Esporangiosporos. Barras de escala = 20 µm.....	59
Figura 14.	Árvore filogenética de <i>Backusella paraconstricta</i> (URM 8637) e espécies relacionadas inferidas a partir das análises concatenadas das regiões ITS e LSU do rDNA. Os valores de suporte nos ramos representam o suporte bootstrap de máxima verossimilhança e as probabilidades posteriores de inferência bayesiana. Valores de bootstrap inferiores a 70% ou 0,95 são marcados com “*”. A nova espécie está em negrito. <i>Mucor indicus</i> CBS	

226.29 foi usado como grupo externo. As cepas ex-tipo, ex-epítipo, ex-lectótipo estão marcadas com T, ET e LT, respectivamente..... 60

Figura 15. *Cunninghamella* sp.1 nov. (URM 8557) A. Verso da colônia (esquerda) e reverso (direita), em MEA a 25 °C, B. Esporóforo não ramificado com esporângios. C. Esporóforo ramificado com vesículas e verrugas (setas) em sua superfície. D. Esporóforo repetidamente ramificado com vesículas. E. Esporóforo ramificado com vesículas e esporângios pedicelados imaturos. F. Esporóforo bifurcado com vesículas e esporângios. G. Esporóforo ramificado com dois esporóforos surgindo diretamente da mesma vesícula (seta). H. Rizoides. I. Esporangíolos. Barras de escala = 25 µm..... 62

Figura 16. Árvore filogenética de *Cunninghamella* sp 1. nov. (URM 8557) e espécies relacionadas com base nas sequências combinadas de ITS e LSU rDNA. Valores de suporte são de análises de máxima verossimilhança e inferência bayesiana. Valores de bootstrap inferiores a 70% e 0,95 ou ausentes marcados com “–”. Nova espécie está em negrito *Absidia aguabelensis* URM 8213^T e *Absidia saloensis* URM 8209^T usado como grupo externo. As cepas ex-tipo, ex-epítipo, ex-lectótipo e ex-neótipo são marcadas com T, ET, LT e NT, respectivamente..... 63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Dados de precipitação pluviométrica, em períodos específicos, no município de Brejão, Pernambuco.....	40
Tabela 2.	Dados de precipitação pluviométrica, em períodos específicos, no município de Sanharó, Pernambuco.....	40
Tabela 3.	Meses e anos das coletas do solo dos brejos de altitude de Brejão e Jenipapo	41
Tabela 4.	Variáveis químicas de amostras compostas de solo de cinco quadrantes do brejo de altitude Brejão.....	41
Tabela 5.	Variáveis químicas de amostras de solo de cinco quadrantes do brejo de altitude Jenipapo.....	42
Tabela 6.	Espécimes depositados na Micoteca e Herbário URM da Universidade Federal de Pernambuco.....	45
Tabela 7.	Números (holótipos) das espécies novas.....	46
Tabela 8.	Sequências das regiões ITS e/ou LSU depositadas no Genbank.....	47
Tabela 9.	Unidades formadoras de colônia por grama de solo (UFC.g ⁻¹) de fungos mucoráceos nos brejos de altitude de Jenipapo e Brejão, Pernambuco.....	48
Tabela 10.	Frequência de ocorrência (%) dos fungos mucoráceos no solo dos brejos de altitude de Jenipapo e Brejão, Pernambuco.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEM	Ágar extrato de malte
BDA	Batata dextrose ágar
BRE	Brejão
CTC	Capacidade de troca de catiônica
EUA	Estados Unidos da América
Diâm.	Diâmetro
DNA	Ácido desoxirribonucleico
IPA	Instituto Agronômico de Pernambuco
ITS	Internal Transcribed Spacer
LSU	Large subunit
m%	Saturação por alumínio
pH	Potencial hidrogeniônico
PVLG	Polivinil-Lacto-Glicerol
SB	Soma de bases
JEN	Jenipapo
UFC	Unidade Formadora de Colônia
rDNA	DNA ribossômico
v%	Saturação por bases

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Alfa
β	Beta
%	Porcentagem
°C	Graus centígrados
μL	Microlitro
μm	Micrômetro
Al	Alumínio
Ca	Cálcio
cm	Centímetro
g	Grama
H	Hidrogênio
K	Potássio
km	Quilômetro
mm	Milímetros
m	Molar (mol)
Mg	Magnésio
mg	Miligrama
mg. L	Miligrama por litro
mL	Mililitro
Na	Sódio
P	Fósforo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1	CLASSIFICAÇÃO	21
2.2	MUCOROMYCOTA DOWELD.....	21
2.3	MUCORALES DUMORT.....	23
2.3.1	<i>Absidia</i> Tiegh.....	26
2.3.2	<i>Backusella</i> Hesselt. & J.J. Ellis.....	27
2.3.3	<i>Cunninghamella</i> Matr.....	28
2.3.4	<i>Gongronella</i> Ribaldi.....	30
2.3.5	<i>Mucor</i> Fresen.....	31
2.3.6	<i>Rhizopus</i> Ehrenb.....	32
2.4	OS FUNGOS MUCORÁCEOS ISOLADOS DO SOLO DE BREJOS DE ALTITUDE DE PERNAMBUCO.....	33
3	OBJETIVOS.....	36
3.1	GERAL.....	36
3.2	ESPECÍFICOS.....	36
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
4.1	ÁREA DE COLETA.....	37
4.1.1	Brejão – PE.....	37
4.1.2	Sanharó – PE.....	38
4.2	DADOS PLUVIOMÉTRICOS E DE TEMPERATURAS DO MUNICÍPIO E DO SOLO.....	39
4.3	COLETA DAS AMOSTRAS DE SOLO.....	40
4.4	ANÁLISE FISÍCO-QUÍMICA DO SOLO.....	41
4.5	ISOLAMENTO, PURIFICAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO.....	42
4.6	EXTRAÇÃO DO DNA, AMPLIFICAÇÃO E SEQUENCIAMENTO DAS REGIÕES ITS E LSU DO rDNA.....	43
4.7	ALINHAMENTO, ANÁLISES FILOGENÉTICAS E CONFIRMAÇÃO GENÉTICA.....	44
4.8	ANÁLISE BIOESTATÍSTICA.....	44

4.9	INCORPORAÇÃO DAS CULTURAS DOS ESPÉCIMES À COLEÇÃO DE CULTURAS MICOTECA URM, DE LÂMINAS NO HERBÁRIO URM E DAS SEQUÊNCIAS ITS E LSU DO rDNA NO GENBANK.....	45
5	RESULTADOS.....	48
5.1	FUNGOS MUCORÁCEOS NO SOLO DOS BREJOS DE JENIPAPO E BREJÃO.....	48
5.2	TAXONOMIA.....	58
5.2.1	<i>Backusella paraconstricta</i> sp. nov. F.R.S. Santos, T.R.L. Cordeiro, Hyang B. Lee & A.L. Santiago.....	58
5.2.2	<i>Cunninghamella</i> sp. 1 nov.....	61
5.3	CHAVES DE IDENTIFICAÇÃO.....	64
5.3.1	Chave de identificação do gênero <i>Cunninghamella</i> [adaptada de Zheng & Chen (2001)]	64
5.3.2	Chave de identificação para as espécies de <i>Backusella</i> encontradas nas Américas.....	66
6	DISCUSSÃO.....	68
6.1	ECOLOGIA DAS COMUNIDADES DE FUNGOS MUCORÁCEOS DOS BREJOS DE ALTITUDE BREJÃO E JENIPAPO.....	68
7	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
	APÊNDICE A – ARTIGO 1.....	95

1 INTRODUÇÃO

A região Nordeste do Brasil abrange 1.561 km², cerca de 18% de todo território nacional. Nessa região, encontra-se boa parte do semiárido brasileiro, cujos ecossistemas exibem particularidades que os diferem dos ambientes úmidos do país, sendo esses caracterizados pelas altas temperaturas, baixa umidade, longos períodos de estiagem e uma elevada taxa de evapotranspiração (ARAÚJO, 2011; MACÊDO *et al.*, 2017).

Embora grande parte do semiárido esteja representada pela Caatinga, existem, nesse domínio, fragmentos de matas úmidas, denominados de brejos de altitude, que formam verdadeiras “ilhas” em meio à paisagem da caatinga que os rodeiam (ANDRADE-LIMA, 1982; FREITAS *et al.*, 2019). Esses fragmentos tornam-se áreas de exceção, dentro do semiárido, que servem de abrigo para diversos organismos, incluindo espécies endêmicas (MEDEIROS, 2016). Para Santos *et al.* (2007), esses enclaves se arquitetaram a partir de modificações biogeográficas no Pleistoceno, permitindo a permuta de organismos entre ecossistemas neotropicais.

Os brejos de altitude são ecorregiões que apresentam condições atípicas, se comparadas às da Caatinga circundante, como altos índices de precipitação, com média anual entre 240 – 1200 mm, diferente dos índices pluviométricos observadas em áreas de Caatinga (IBGE, 1985; LINS, 1989; FREITAS *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2019), estando esses mais elevados índices diretamente relacionados à presença de planaltos e chapadas, entre 500 – 1200 m de altitude (ANDRADE-LIMA, 1960, 1961, 1966), que favorecem a ocorrência de zonas de clima úmido (TENÓRIO *et al.*, 2020) nesses ecossistemas. Por apresentar uma altitude mais elevada, se comparada com a do seu redor, além da exposição das suas vertentes aos ventos úmidos, nos brejos, são formados verdadeiros mesoclimas e fatores mesológicos diferenciados, os quais são evidentes, principalmente nas maiores altitudes, causando menores temperaturas e formação de nevoeiros e chuvas frequentes (LINS, 1989). Infelizmente, devido às condições climáticas favoráveis, a crescente degradação proveniente de práticas de agricultura e pecuária tem transformado os brejos em pastos e lavouras, o que está causando a perturbação desses ecossistemas, com perdas de biodiversidade (TABARELLI & SANTOS, 2004; MEDEIROS *et al.*, 2016). É, portanto, urgente, que sejam inventariadas as espécies de microrganismos, incluindo os fungos mucoráceos, nesses ecossistemas, antes que os mesmos desapareçam.

Mucorales Dumort. é uma das três ordens pertencentes ao filo Mucoromycota Doweld (TEDERSOO *et al.*, 2018), sendo essa a ordem com o maior número de espécies descritas (mais de 300) para esse filo (WIJAYAWARDENE *et al.*, 2022). Os fungos mucoráceos estão globalmente distribuídos, sendo a maioria desses sapróbios do solo, de excrementos de animais

(herbívoros e roedores) e grãos estocados (HOFFMANN *et al.* 2013; SANTIAGO *et al.*, 2013). A maioria das espécies de Mucorales exibem crescimento rápido (KIRCHMAIR *et al.*, 2008; HOFFMANN *et al.*, 2013), mesmo em meios de cultura pobres em nutrientes. Morfologicamente, esses fungos formam um micélio cenocítico e produzem um esporo sexuado, o zigosporo, além de esporos assexuados, como esporangiosporos e merosporangiosporos (HOFFMANN *et al.*, 2013; BENNY *et al.*, 2016).

Grande parte das espécies mucoráceas exercem funções importantes para os ecossistemas, atuando ativamente na ciclagem de nutrientes dos substratos, sendo responsáveis pela troca de nitrogênio e pela degradação de fontes simples de carbono nos ambientes (LIMA *et al.*, 2018). Tornando-se assim, peças-chaves nos processos ecológicos de diferentes recintos, são decompositores ativos de matéria orgânica, fato que se dá principalmente pelo grande número de espécies que são sapróbias do solo (FERREIRA *et al.* 2013; LIMA *et al.* 2016). Esses fungos apresentam em sua fisiologia capacidade de produção de enzimas que contribuem ativamente para os processos bioquímicos de ciclagem de nutrientes nos ambientes (RICHARDSON, 2009; ZIAEE *et al.* 2016).

Algumas espécies de fungos mucoráceos exibem importância industrial, como no ramo alimentício, principalmente em processos de fermentação na produção de alimentos como o tofu e tempeh, alguns são servidos como base nutricional na alimentação de animais (BENNY *et al.*, 2016; VOIGT *et al.*, 2016). Em processos biotecnológicos, algumas espécies possuem a capacidade de produzir enzimas como amilases, inulinases, lipases, pectinases e renina (HOFFMANN *et al.*, 2013, ARAÚJO 2018; SALES, 2018; DE PAIVA *et al.*, 2020). Na área médica, algumas espécies de Mucorales são associadas às mucormicoses, que acometem, na maioria dos casos, pessoas com a imunidade comprometida, como as que fizeram o uso prolongado de corticoides ou as portadoras de leucemias (QUIROZ *et al.*, 2017; FERIGATTO *et al.*, 2021). Essa infecção pode afetar vários órgãos, como cérebro, trato gastrointestinal e pulmões (KAMEI, 2000; RIBES *et al.*, 2000; BENNY *et al.*, 2014; WALTHER *et al.*, 2019).

Até o presente (agosto de 2023), foram descritas 55 espécies de fungos mucoráceos para o estado de Pernambuco (FLORA E FUNGA DO BRASIL, 2023), sendo algumas dessas novas e raras, encontradas em brejos de altitude (ALVES *et al.*, 2021; LIMA *et al.*, 2022; SANTOS *et al.*, 2023; CORDEIRO *et al.*, 2023). Com relação à ecologia desses fungos, em brejos de altitude, apenas três estudos (LUNDGREN, 2021; CORDEIRO, 2023; DE LIMA, 2023) foram realizados com dados mais robustos sobre as comunidades desses fungos nesses ecossistemas (resultados ainda não publicados). Dessa forma, existem muitas lacunas sobre como as comunidades de fungos mucoráceos estão estruturadas no solo dos brejos nordestinos,

bem como quais e como os atributos do solo e as variáveis ambientais influenciam as comunidades desses fungos nesses ambientes.

Diante do exposto, esse trabalho tem como principais hipóteses: 1 – O solo dos brejos de altitude de Brejão e de Jenipapo, localizados em Pernambuco, exibem elevadas diversidade e riqueza de fungos mucoráceos, incluindo táxons raros e/ou novos; 2 – Algumas variáveis do solo, como concentrações de P, K⁺, Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺, C, H⁺ e Al, além da SB (soma de bases), v% (saturação por bases em percentual), m% (saturação por alumínio em percentual) da matéria orgânica, capacidade de troca de cátions (CTC) e o pH influenciam a diversidade, abundância e distribuição das espécies de fungos mucoráceos nos solos dos brejos estudados. 3 – As mesmas variáveis do solo podem influenciar de forma diferente a estruturação das comunidades de fungos mucoráceos nos diferentes brejos de altitude.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CLASSIFICAÇÃO

Os fungos denominados informalmente como zigospóricos eram, até 2007, tratados como pertencentes ao não natural filo “Zygomycota”, que foi desconsiderado por ser polifilético (HIBBETT *et al.*, 2007). A reorganização do grupo ocorreu principalmente com base em alguns estudos filogenéticos (O’DONNELL *et al.*, 2001; JAMES *et al.*, 2006; HIBBETT *et al.*, 2007). Em 2016, um estudo em escala genômica agrupou os fungos zigospóricos em dois filios parafiléticos: Mucoromycota (subfilos: Mucoromycotina, Mortierellomycotina e Glomeromycotina) e Zoopagomycota (Entomophthoromycotina, Kickxellomycotina e Zoopagomycotina) (SPATAFORA *et al.*, 2016).

Em 2018, os fungos do antigo filo Zygomycota foram realocados em três sub-reinos: Basidiobolomyceta (filo Basidiobolomycota), Mucoromyceta (Calcarisporiellomycota, Mucoromycota, Mortierellomycota e Glomeromycota) e Zoopagomyceta (Entomophthoromycota, Kickxellomycota e Zoopagomycota) (TEDERSOO *et al.*, 2018). É relevante citar que, desses filios, apenas espécies de Glomeromycota não formam zigosporos.

Atualmente a classificação para esses fungos está associada a feita por Wijayawardene *et al.* (2022), que consideraram os mesmos filios estabelecidos por Tedersoo *et al.* (2018): Basidiobolomycota, Mucoromycota, Mortierellomycota, Calcarisporiellomycota, Glomeromycota, Entomophthoromycota, Kickxellomycota e Zoopagomycota.

2.2 MUCOROMYCOTA DOWELD

O filo Mucoromycota acomoda o subfilo Mucoromycotina, com três ordens (Endogonales, Mucorales e Umbelopsidales), 18 famílias, 64 gêneros e mais de 300 espécies (WIJAYAWARDENE *et al.*, 2022). Endogonales possui duas famílias (Densosporaceae e Endogonaceae) e engloba sete gêneros. Mucorales está distribuída em 14 famílias (Backusellaceae, Choanephoraceae, Cunninghamellaceae, Lentamycetaceae, Lichtheimiaceae, Mucoraceae, Mycocladaceae, Mycotyphaceae, Phycomycetaceae, Pilobolaceae, Radiomycetaceae, Rhizopodaceae, Saksenaaceae e Syncephalastraceae) englobando 55 gêneros, e Umbelopsidales, com duas famílias (Pygmaeomycetaceae e Umbelopsidaceae) abrigadas em dois gêneros (WIJAYAWARDENE *et al.*, 2022).

Estudos específicos sobre Mucoromycota tiveram início na França, Alemanha e Estados Unidos, quando a classificação das espécies era majoritariamente baseada em características morfológicas (VAN TIEGHEM & LE MONNIER, 1873; VAN TIEGHEN, 1975, 1878; BAINIER, 1882; SCHRÖTER, 1889). Com o passar dos anos, o interesse sobre esse grupo de fungos foi aumentando, o que inspirou autores de diferentes países a realizarem, em meados do século XX, revisões taxonômicas de vários gêneros, utilizando não somente dados morfológicos, como também o comportamento fisiológico das espécies, como o exposto nos trabalhos de Hesseltine & Fennel (1955), Hesseltine & Ellis (1961, 1964, 1966), Schipper (1973, 1975, 1976, 1978a, 1978b, 1984), Benny & Benjamin (1975, 1976), Benjamin (1979), Zheng & Chen (2001). Entretanto, o avanço nos estudos de classificação acerca desse grupo de fungos se deu principalmente pela utilização das técnicas de biologia molecular, com o sequenciamento de diferentes marcadores, como LSU, SSU e ITS (rDNA), RPB1, RPB2, TEF-1 α , α -tub e β -tub (HIBBETT *et al.*, 2007; HOFFMANN *et al.*, 2007); ZHENG *et al.*, 2007; ALASTRUEY-IZQUIERDO *et al.*, 2010; SPATAFORA *et al.*, 2016; TEDERSOO *et al.*, 2018; WAGNER *et al.*, 2019, 2020; CORDEIRO *et al.*, 2023).

Os representantes desse filo são em maioria sapróbios, podendo estar presentes em diversos substratos como solo, excrementos de animais (roedores e herbívoros) e alimentos estocados. Alguns são patógenos facultativos de humanos, outros animais e de plantas, e algumas espécies são micoparasitas facultativas (ALEXOPOULOS *et al.*, 1996; SPATAFORA *et al.*, 2016; TEDERSOO *et al.*, 2018; ÁNGELES-ARGÁIZ; GARIBAY-ORIJEL, 2019; CRUZ, 2022). As ordens desse filo abrigam espécies com morfologia e estratégias ecológicas variadas. Espécies da ordem Umbelopsidales, por exemplo, além de sapróbias do solo, podem exibir hábito endofítico (HOFF *et al.*, 2004). Os fungos da ordem Endogonales são sapróbios do solo e ectomicorrízicos de plantas, assim como endófitos (DESIRÒ *et al.*, 2017; BONFANTE & VENICE, 2020). A ordem Mucorales abrange em sua maioria sapróbios do solo e espécies patogênicas (SPATAFORA *et al.*, 2016; LIMA *et al.*, 2018).

No que se refere à reprodução dos fungos em Mucoromycota, essa ocorre mais comumente na forma assexuada, com a produção de esporangiosporos dentro de esporângios, esporângiolos e merosporângiosporos no interior de merosporângios. A reprodução assexuada também pode ocorrer, embora raramente, por artrosporos, brotamento de células e clamidosporos (BENNY *et al.*, 2014; SPATAFORA *et al.*, 2016; LIMA *et al.*, 2018). A reprodução sexuada, nesses fungos, é menos frequente do que a assexuada e ocorre por copulação gametangial, com a formação do zigospórângio, estrutura exclusiva desse grupo de fungos, que pode exibir parede lisa, espessa ou ornamentada, com coloração geralmente

castanha escura. No interior dessa estrutura, observa-se a presença de um único esporo sexuado, denominado zigosporo (BENNY *et al.*, 2016; TEDERSOO *et al.*, 2018). Na ordem Endogonales, podem ser formados esporocarpos, em cujo interior são encontrados zigosporos. (DESIRÒ *et al.*, 2017). Em relação a ordem Mucorales, a reprodução pode ocorrer tanto assexuadamente como sexuadamente, embora essa última não tenha sido observada em algumas espécies (BENNY *et al.*, 2016). No seguinte tópico se seguem mais informações da ordem Mucorales.

2.3 MUCORALES DUMORT.

Os fungos dessa ordem são caracterizados pelo crescimento rápido, mesmo em meios de cultura pobres em nutrientes (KIRCHMAIR *et al.*, 2008; HOFFMANN *et al.*, 2013). Como R-estrategistas, esses fungos são, em geral, os primeiros a colonizar substratos ricos em açúcares simples, de forma que investem energia em crescimento, reprodução e dispersão, garantindo a propagação das espécies (RICHARDSON, 2008; VOIGT *et al.*, 2014). Os fungos mucoráceos formam micélio cenocítico, com septos delimitando estruturas reprodutivas ou formados próximos aos pontos de ramificação das hifas. Esses septos também podem estar irregularmente espaçados em culturas envelhecidas (HOFFMANN *et al.*, 2013; BENNY, 2016). Os esporangióforos ou esporóforos podem surgir diretamente do substrato ou do micélio aéreo, sustentando, na maioria das vezes, esporângios terminais, embora esporângios laterais também possam ser visualizados, em algumas espécies (HOFFMANN *et al.*, 2013; BENNY *et al.*, 2016). Os esporângios apresentam variações morfológicas sendo, na maioria das vezes, globosos e/ou subglobosos, podendo exibir parede deliquescente, persistente ou evanescente, lisa ou equinulada, com um número incontável de esporangiosporos (KIRK *et al.*, 2008; BENNY, 2014). Podem apresentar também, esporangiólos que são considerados esporângios menores, com esporos que podem ser facilmente contados ao microscópio de luz, exibindo, em geral, parede persistente, sendo sustentados por pedicelos que surgem dos esporangióforos ou em esporóforos curtos (com apenas esporangiólos) que surgem diretamente do meio de cultura (HOFFMANN *et al.* 2013; BENNY *et al.* 2014). Os esporóforos também podem suportar merosporângios, que são esporângios com forma alongada, geralmente cilíndricos ou claviformes, com parede evanescente ou persistente, e portam um número contável de merosporangiosporos (ou merosporos) (BENNY *et al.*, 2014; HOFFMANN *et al.*, 2013; WALTHER *et al.*, 2019).

Os fungos mucoráceos se reproduzem, tanto assexuadamente como sexuadamente, embora essa última não tenha sido observada em algumas espécies (BENNY *et al.*, 2016). Os zigospórangios dos fungos mucoráceos são normalmente escuros, mas podem se apresentar amarelos, laranjas ou até vermelhos, em algumas espécies (Figura 1g), e a sua formação é induzida pelo ácido trispórico, que estimula o contato das hifas geneticamente compatíveis (zigóforos), na copulação gametangial (BENNY *et al.*, 2014; VOIGT *et al.*, 2016; WALTHER *et al.*, 2019). A reprodução assexuada ocorre por esporangiosporos, merosporangiosporos e raramente por células brotantes, clamidosporos e artrosporos (HOFFMANN *et al.*, 2013; BENNY *et al.*, 2014, 2016).

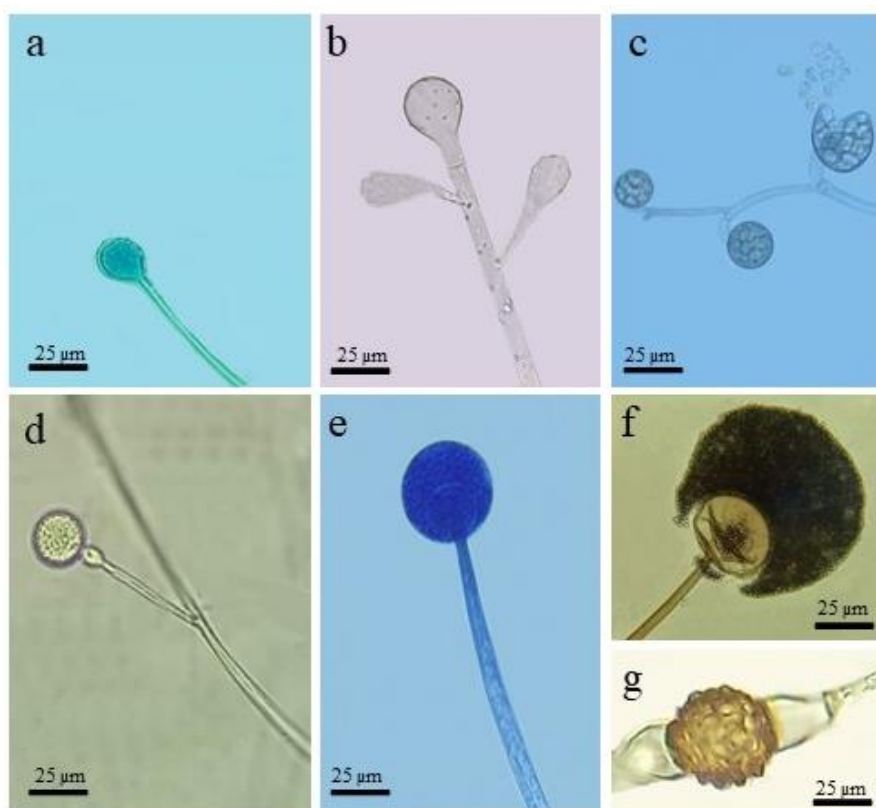
A ordem Mucorales acomoda a maioria das espécies do filo Mucoromycota, chegando a mais de 320 espécies descritas (WIJAYAWARDENE *et al.*, 2022). Embora a maioria das espécies dessa ordem sejam sapróbias do solo (SPATAFORA *et al.*, 2016; WALTHER *et al.*, 2019), algumas podem causar infecções sistêmicas, cutâneas, rino-orbitais-cerebrais e subcutâneas, em humanos, sendo conhecidas como mucormicose. Essas infecções comumente acometem pessoas imunocomprometidas, com comorbidades, ou as que fizeram o uso prolongado de corticoides. Espécies de *Apophysomyces*, *Cokeromyces*, *Cunninghamella*, *Lichtheimia*, *Mucor*, *Rhizomucor*, *Rhizopus* e *Saksenaea* normalmente são termofílicas crescendo a temperatura de 37 °C, temperatura do corpo humano, sendo esse um fator de virulência importante para o estabelecimento das mucormicose (PANDEY *et al.*, 2018). Outras espécies são micoparasitas, como as de *Parasitella* (KAMEI, 2000; RIBES *et al.*, 2000; BENNY *et al.*, 2014; BENNY, 2009; WALTHER *et al.*, 2019), ou fitopatógenas, infectando frutos, raízes, folhas, caules e flores, ocasionando perdas econômicas para a agricultura, como *Choanephora cucurbitarum*, *Gilbertella persicaria*, *Mucor piriformis* e *Rhizopus stolonifer* (HOFFMANN *et al.*, 2007; ÁLVAREZ *et al.*, 2011; BENNY *et al.*, 2014; SANTIAGO *et al.*, 2014; KHUNA *et al.*, 2019).

A principal função ecológica dos fungos mucoráceos é o processo de biodegradação de material orgânico, vegetal ou animal, liberando enzimas no substrato para quebra dos alimentos (SANTIAGO & SOUZA-MOTTA, 2006; DE SOUZA, 2018), de forma que esses fungos atuam ativamente nos processos de ciclagem de nutrientes, sendo responsáveis pela troca de nitrogênio e carbono nos ecossistemas (LIMA *et al.*, 2018). Ainda que espécies de Mucorales sejam em maioria mesofílicas, exibindo crescimento ótimo com esporulação em temperaturas entre 20 e 30 °C, algumas são termotolerantes, como as dos gêneros citados no parágrafo anterior (SANTIAGO *et al.*, 2013).

Os fungos mucoráceos possuem grande importância na indústria alimentícia, servindo de alimentos para animais, já que possuem um alto teor nutricional, além de serem utilizados pela culinária asiática na fermentação de alimentos (VOIGT *et al.*, 2016; BENNY *et al.*, 2016). No que se refere à taxonomia, essa ordem passou por mudanças consideráveis nos últimos anos. O homotalismo, a forma das células suspensoras e a formação de esporangióolos não são mais consideradas características taxonomicamente cruciais para determinar as espécies dessa ordem (WALTHER *et al.*, 2019). Além disso, estudos moleculares e filogenéticos tornaram-se cada vez mais importantes para delimitação de espécies, sendo as regiões do rDNA (ITS e LSU) as mais utilizadas para identificação desses fungos (WALTHER *et al.*, 2013).

A ordem Mucorales abrange cerca de 55 gêneros, sendo os mais comuns no solo: *Absidia* (Figura 1a), *Cunninghamella* (Figura 1b) *Backusella* (Figura 1c), *Gongronella* (Figura 1d), *Mucor* (Figura 1e) e *Rhizopus* (Figura 1f) (LIMA, 2023; CORDEIRO, 2023).

Figura 1. Alguns gêneros de Mucorales encontrados comumente em amostras de solo a) *Absidia*: Esporangióforo com esporângio globoso para piriforme. b) *Cunninghamella*: Esporóforo com ramificações simples e vesículas laterais clavadas e vesícula axial globosa com esterigmas aparentes. c) *Backusella*: Esporangióforo com ramificação simpodial e esporangióolos multiesporados. d) *Gongronella*: Esporangióforo surgindo de hifa área com esporângio globoso e apófise destacada. e) *Mucor*: Esporangióforo simples com esporângio globoso. f) *Rhizopus*: Esporangióforo com esporângio rompido liberando esporangiosporos e columela deformada. g) Zigosporo: com células suspensoras. Escala = 25 µm.



Fonte: A autora (2023).

2.3.1 *Absidia* Tiegh.

Absidia pertence à família Cunninghamellaceae (WIJAYAWARDENE *et al.*, 2022). Espécies desse gênero são predominantemente sapróbias, frequentemente isoladas de solo, de excrementos de animais, serrapilheira e de outros substratos em decomposição (VAN TIEGHEM, 1878; BENNY, 2010; CRUZ, 2022).

Esses fungos formam esporangióforos a partir de estolões, porém nunca opostos aos rizoides (VAN TIEGHEM, 1878). Os esporângios são subglobosos ou piriformes, com parede deliquescente, e englobam columelas apofisadas e com formas variadas: cônicas, subglobosas, hemisféricas, em forma de morango ou de figo. Essas columelas podem exibir de uma a três projeções filiformes, bulbosas e cônicas, no seu ápice (CORDEIRO *et al.*, 2020; LIMA *et al.*, 2020; LEITÃO *et al.*, 2021). Os esporangiosporos são hialinos e sem estrias, comumente cilíndricos, globosos ou subglobosos (VAN TIEGHEM, 1878; HOFFMANN *et al.*, 2007). Por reprodução sexuada, são produzidos os zigosporos, em zigosporângios, cujas células suspensoras são providas de apêndices (HOFFMANN *et al.*, 2007).

Espécies de *Absidia* foram tradicionalmente classificadas com base na morfologia dos esporangiosporos cilíndricos (HESSELTINE & ELLIS, 1964), globosos (ELLIS & HESSELTINE, 1965) e ovóides (ELLIS & HESSELTINE, 1966). Entretanto, Hoffmann *et al.* (2007) realizaram uma revisão do gênero e, com base na filogenia, morfologia e fisiologia, classificaram as espécies, até então consideradas como *Absidia*, em: mesofílicas, com crescimento ótimo em temperaturas entre 25 e 34 °C, micoparasitas de outros gêneros, com crescimento ideal entre 14 e 25 °C, e termotolerantes, que exibem crescimento em temperaturas elevadas, de 37 a 45 °C. Em seguida, Hoffmann & Voigt (2009) mantiveram somente as espécies mesofílicas no gênero *Absidia*, sendo as espécies micoparasitas e termotolerantes transferidas, respectivamente, para *Lentamyces* e *Lichtheimia*. Atualmente, 76 espécies de *Absidia* são aceitas (www.speciesfungorum.org) e, dessas, 14 foram reportadas para o Brasil: *A. aguabelensis*, *A. bonitoensis*, *A. caatingaensis*, *A. cylindrospora*, *A. cornuta*, *A. montepascoalii*, *A. multispora*, *A. pararepens*, *A. pseudocylindrospora*, *A. pernambucoensis*, *A. repens*, *A. spinosa*, *A. saloaensis* e *A. variicolumellata* (LIMA *et al.*, 2016; CORDEIRO *et al.*, 2020, 2021; LIMA *et al.*, 2020, LIMA *et al.*, 2021; LEITÃO *et al.*, 2021; FREITAS *et al.*, 2022), isoladas de diferentes domínios, Mata Atlântica, Caatinga e de brejos de altitude, em Pernambuco.

Dentre as espécies do gênero, destaca-se *A. cylindrospora*, que tem importância biotecnológica, pois é eficaz na produção de proteases de interesse na indústria alimentícia e farmacêutica. Uma vez testada, essa espécie foi capaz de remover cádmio, cobre e chumbo sob condições experimentais (CARDOSO *et al.*, 2017; ALBERT *et al.*, 2018). *A. glauca* Hagem e *A. spinosa* Lendn foram reportadas como endofíticas (ANGELINI *et al.*, 2012; PANCHER *et al.*, 2012; ASHKEZARI & FOTOUHIFAR, 2017; BHATTACHARYYA *et al.*, 2017; MARAK & KAYANG, 2018).

2.3.2 *Backusella* Hesselt. & J.J. Ellis

Backusella pertence à família Backusellaceae (WIJAYAWARDENE *et al.*, 2022). Esse gênero compreende espécies sapróbias, encontradas em excrementos de herbívoros, serapilheira, solo, invertebrados e sapos (BENNY & BENJAMIN, 1975; KIRK, 2012; LIMA *et al.*, 2016; WALTHER *et al.*, 2013; NGUYEN & LEE, 2018; NGUYEN *et al.*, 2021; URQUHART *et al.*, 2021). Segundo Ellis & Hesseltine (1969), espécies de *Backusella* exibem características morfológicas semelhantes às de *Mucor*, como a formação de esporangióforos com esporângios terminais, de parede deliquescente, além de esporangíolos uni e/ou multiesporados, de parede persistente (BENNY & BENJAMIN, 1975; KIRK, 2012; LIMA *et al.*, 2016). No entanto, em *Backusella*, são formados esporóforos longos, que são curvados quando jovens e eretos, quando maduros. Esses podem exibir pedicelos dispostos lateralmente que portam esporangíolos uni e/ou multiesporados. Esporóforos curtos também podem ser observados crescendo próximos ao meio de cultura, os quais formam apenas esporangíolos uni e/ou multiesporados (BENNY, 2005; WALTHER *et al.*, 2013; DE SOUZA *et al.*, 2014).

Tradicionalmente, as espécies de *Backusella* foram incluídas por Von Arx (1970) em Mucoraceae, Choanephoraceae e em Thamniaceae. Entretanto, um ano mais tarde, Pidoplichko & Milko (1971) agruparam todas as espécies em Thamniaceae, com base na formação de esporangíolos uniesporados e/ou multiesporados, que são características semelhantes às observadas em *Thamnidium*. Por produzirem simultaneamente esporângios e esporangíolos, uni e/ou multiesporados, Benny & Benjamin (1975) agruparam em *Backusella*: *B. circina* Ellis & Hesselt, *B. ctenidia* (Durrell & M. Fleming) Pidopl. & Milko ex Benny & R.K. Benj. e *B. lamprospora* Benny & Benj.

Em um trabalho de revisão sobre a ordem Mucorales, Walther *et al.* (2013), com base em características genéticas (regiões LSU e ITS do rDNA) e morfofisiológicas, transferiram para *Backusella* todas as espécies de *Mucor* que formavam esporangióforos

curvados, quando jovens, e eretos, na maturidade, e que também foram agrupadas distantemente das outras espécies de *Mucor*, nas árvores ITS e LSU geradas. Esses mesmos autores transferiram *B. ctenidia* para *Mucor* [*Mucor ctenidius* (Durrell & M. Fleming) Walther & de Hoog] (WALTHER *et al.*, 2013).

Urquhart *et al.* (2021) isolaram e descreveram 10 novas espécies de *Backusella* na Austrália. Atualmente, o gênero abriga 36 espécies, tendo algumas destas sido recentemente descritas: *B. brasiliensis*, *B. chlamydospora*, *B. dichotoma*, *B. gisgaspora*, *B. koreana*, *B. moniliformis*, *B. ovalispora*, *B. obliqua*, *B. pernambucoensis*, *B. solicola* e *B. thermophila* (NGUYEN *et al.*, 2021; DE LIMA *et al.*, 2022; HURDEAL *et al.*, 2022; CORDEIRO *et al.*, 2023). Para o Brasil, foram registradas *B. azygospora*, *B. brasiliensis*, *B. constricta*, *B. gigacellularis*, *B. lamprospora*, *B. obliqua* e *B. pernambucensis* (DE SOUZA *et al.*, 2011; DE SOUZA *et al.*, 2014; LIMA *et al.*, 2016; CROUS *et al.*, 2019; DE LIMA *et al.*, 2022; CORDEIRO *et al.*, 2023).

2.3.3 *Cunninghamella* Matr.

Cunninghamella pertence à família Cunninghamellaceae (WIJAYAWARDENE *et al.*, 2022). Espécies desse gênero podem ser observadas no solo, frutos, grãos estocados e excrementos de herbívoros, sendo algumas causadoras de infecções em indivíduos imunocomprometidos, principalmente em diabéticos sem controle da glicemia e portadores de doenças hematológicas (YU *et al.*, 2015). As espécies desse gênero apresentam crescimento rápido e formam colônias flocosas ou granuladas, de coloração branca ou pálida, cinzas-claras ou escuras (ZHENG & CHEN, 2001).

Espécies de *Cunninghamella* produzem esporângios unisporados em pedicelos presentes nas vesículas localizadas no ápice de esporóforos (ZHENG & CHEN, 2001; WALTHER *et al.*, 2013), sendo esses últimos eretos, simples ou ramificados em padrões que variam, entre monopodiais, simpodiais, verticilados, pseudoverticilados ou com ramificações de tamanhos diferentes. As vesículas podem ser globosas, subglobosas, clavadas ou de forma irregular. As hifas são cenocíticas, entretanto com septação irregular surgindo com o envelhecimento das colônias. Estolões e rizoides são formados (ZHENG & CHEN, 2001).

Tradicionalmente, a identificação das espécies de *Cunninghamella* era realizada, principalmente, com base em caracteres morfológicos macro e microscópicos, como coloração e aspecto das colônias, tamanho e pigmentação das vesículas, forma e tamanho dos

esporangíolos e pedicelos, bem como pelo padrão de ramificação dos esporóforos (ZHENG & CHEN, 2001).

Atualmente, as técnicas moleculares e filogenéticas têm contribuído para a descrição de novas espécies para o gênero (GUO *et al.*, 2015). Nos últimos anos, algumas espécies foram descritas: *C. arunaloeki*, *C. globospora*, *C. guizhouensis*, *C. saisamornae*, *C. verrucosa* (ZHANG *et al.*, 2020; HALLUR *et al.*, 2021; ZHAO *et al.*, 2021; SUWANNARACH *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2022).

Em um trabalho monográfico, realizado por Zheng e Chen (2001), foram consideradas 12 espécies e quatro variedades de *Cunninghamella*: *C. bertholletiae*, *C. elegans*, *C. binariae*, *C. blakesleeana*, *C. clavata*, *C. homothallica*, *C. intermedia*, *C. multiverticillata*, *C. phaeospora*, *C. septata*, *C. vesiculosa*, *C. echinulata* var. *antarctica*, *C. echinulata* var. *echinulata*, *C. echinulata* var. *nodosa* e *C. echinulata* var. *verticillata*. Recentemente, sete novas espécies foram descobertas: *C. bigelovii*, *C. gigacellularis*, *C. guizhouensis*, *C. arunaloeki*, *C. globospora*, *C. saisamornae* e *C. verrucosa* (GUO *et al.*, 2015; HYDE *et al.*, 2016; ZHANG *et al.*, 2020; HALLUR *et al.*, 2021; SUWANNARACH *et al.*, 2021; ZHAO *et al.*, 2021b; WANG *et al.*, 2022).

Algumas espécies de *Cunninghamella* sintetizam metabólitos secundários, como ácidos graxos insaturados, α -amirina e β -sitosterol, com funções antifúngicas e antibacterianas (CHA *et al.*, 2001; ALASMARY *et al.*, 2020; ELKHATEEB *et al.*, 2021; ZHAO *et al.*, 2021a). Algumas espécies, como *C. bertholletiae*, *C. elegans* e *C. echinulata* são agentes oportunistas e causam mucormicose em pacientes imunocomprometidos (SU *et al.*, 2016) com infecções severas (GONZÁLEZ-ABAD & SANZ, 2013), atacando as vias respiratórias dos infectados (CARCELLER *et al.*, 2014). No entanto, algumas espécies possuem potencial biotecnológico com relação à produção de biosurfactantes/bioemulsificantes (SILVA, 2014), inulinases (SANTIAGO & SOUZA-MOTTA, 2006), tanases (PAIVA, 2019) e nos processos de biorremediação de solo, com a retirada de compostos tóxicos derivados dos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (BABU *et al.*, 2019) e no tratamento de efluentes (DE OLIVEIRA CARVALHO *et al.*, 2019).

No Brasil, foram registradas nove espécies e três variedades deste gênero: *C. bainieri*, *C. bertholletiae*, *C. blakesleeana*, *C. clavata*, *C. echinulata* var. *antactica*, *C. echinulata* var. *echinulata*, *C. echinulata* var. *verticillata*, *C. elegans*, *C. gigacellularis*, *C. phaeospora* e *C. vesiculosa* (TRUFEM, 1981; SANTOS *et al.*, 1998; OLIVEIRA *et al.*, 2013; SANTIAGO *et al.*, 2013; ALVES, 2016; HYDE *et al.*, 2016; ALVES *et al.*, 2017; LIMA, 2018; DE SOUZA, 2019).

2.3.4 *Gongronella* Ribaldi

Gongronella pertence à família Cunninghamellaceae (WIJAYAWARDENE *et al.*, 2022). As espécies desse gênero formam colônias de crescimento lento, compostas por hifas hialinas, com rizoides e estolões pouco desenvolvidos. Os esporangióforos são eretos ou recurvados, ramificados e septados, e os esporângios são globosos, com parede deliquescente ou resistente (BENNY, 2005). As columelas têm tamanhos reduzidos e são globosas, subglobosas, com apófises proeminentes, podendo ser globosas, subglobosas, elípticas ou campanuladas. Os esporangiosporos são hialinos, elípticos, em forma de rim ou de gota de água. Os zigospórângios são negros, ornamentados e com células suspensoras opostas, sem apêndices (HESSELTINE & ELLIS, 1964).

Ribaldi (1952) observou que as principais características morfológicas desse gênero eram a presença de columelas reduzidas e de apófises bem proeminentes. Esse mesmo autor reportou *G. urceolifera* (atualmente *G. butleri* Lendn.) como a única espécie do gênero *Gongronella*. Posteriormente, foi observado que a mesma compartilhava características semelhantes às das espécies descritas em *Absidia*, como a formação de uma apófise abaixo do esporângio, propondo que a espécie fosse sinônima de *A. butleri* Lendn. (ADAMČÍK *et al.*, 2015). Peyronel & Dal Vesco (1955) e Pici (1955) transferiram *A. butleri* para *Gongronella*, com base na presença de uma apófise semelhante à observada na espécie tipo e a sinonimizaram com *G. butleri*. Alguns anos depois, *G. lacrispora* foi descrita por Hesseltine & Ellis (1961).

Espécies de *Gongronella* exibem grande importância na biotecnologia, por serem boas produtoras de enzimas, como amilases e xilanase, enzimas relacionadas desde a produção de xaropes à produção de etanol e bebidas (STREIT *et al.*, 2009; SANTOS *et al.*, 2016; CAVALHEIRO *et al.*, 2017), além de terem potencial para serem utilizadas em processos de biorremediação de áreas poluídas com metalaxil, um fungicida capaz de contaminar os lençóis freáticos (MARTINS *et al.*, 2013).

São conhecidas 16 espécies para esse gênero: *G. banzhaoae*, *G. brasiliensis*, *G. butleri*, *G. chlamydospora*, *G. eborensis*, *G. guangdongensis*, *G. hydei*, *G. koreana*, *G. lacrispora*, *G. multisporea*, *G. namwonensis*, *G. orasabula*, *G. pamphilae*, *G. pedratalhadensis*, *G. sichuanensis* e *G. zunyiensis* (SPECIES FUNGORUM, 2023; DOILOM *et al.*, 2020). Para o Brasil, apenas foram isoladas *G. brasiliensis* (TIPBPROMMA *et al.*, 2017), *G. butleri* (ALVES, 2016; LIMA, 2018; DE SOUZA, 2019), *G. lacrispora* (UPADHYAY, 1969) e *G. pedratalhadensis* (FREITAS *et al.*, 2020).

2.3.5 *Mucor* Fresen.

Mucor pertence à família Mucoraceae (WIJAYAWARDENE *et al.*, 2022). As espécies de *Mucor* crescem rapidamente em meios de cultura e formam esporangióforos simples ou simpodialmente e/ou monopodialmente ramificados, com esporângios terminais globosos e/ou subglobosos, bem como columelas de formas variadas: globosas, subglobosas, obovóides, elípticas, piriformes e cônicas. Em algumas espécies, clamidosporos e zigospórângios podem estar presentes (SCHIPPER, 1978). Esporangiosporos são lisos ou, menos comumente, de parede levemente rugosa, de formas variadas. Raramente, são observados rizóides, e estolões não são observados (SCHIPPER 1978; BENNY *et al.*, 2014).

Schipper (1973, 1975, 1976, 1978) em trabalhos monográficos de *Mucor*, descreveu 39 espécies, quatro variedades e 11 formas, organizando as espécies nos seguintes grupos: *M. mucedo*, *M. flavus*, *M. racemosus* e *M. amphibiorum*. Posteriormente, o gênero ganhou mais um grupo, *M. hiemalis*, além de ter tido algumas das espécies transferidas para *Backusella*, enquanto espécies de *Zygorhynchus* foram transferidas para *Mucor* (WALTHER *et al.*, 2013). Além da morfologia, estudos filogenéticos e técnicas moleculares têm contribuído para a proposição de novas espécies. Jacobs & Botha (2008) descreveram uma nova espécie, *M. renisporus* K. Jacobs & Botha, enquanto Álvarez *et al.* (2011), descreveram duas novas espécies: *M. velutinosus* E. Álvarez, Stchigel, Cano, Deanna A. Sutton & Guarro e *M. ellipsoideus* E. Álvarez, Cano, Stchigel, Deanna A. Sutton & Guarro, com base em estudos moleculares. Walther *et al.* (2013), após um estudo filogenético abrangente (regiões LSU e ITS rDNA), sinonimizaram essa última espécie com *M. ardhaengiktus* B.S. Mehrotra & B. M. Mehrotra. Também com o uso do sequenciamento de marcadores do rDNA, novas espécies de *Mucor* foram descritas nos últimos anos: *M. Caatinguensis* (A.L. Santiago, C.A.F. de Souza & D.X. Lima 2016), *M. Koreanus* (Hyang B. Lee, S.J. Jeon & T.T. Nguyen), *M. merdicola* (LI *et al.*, 2016), *M. souzae* (DE SOUZA *et al.*, 2018), *M. pernambucoensis* (DE LIMA *et al.*, 2018), *M. septatum* (DE SOUZA *et al.*, 2018), *M. circinatus* (LIMA *et al.*, 2017), *M. aseptatophorus*, *M. chiangraiensis* (HURDEAL *et al.*, 2021), *M. grylli*, *M. hyangburmii* e *M. kunryangriensis* (NGUYEN & LEE, 2022).

Wagner *et al.* (2020) realizaram uma revisão do complexo de espécies *M. circinelloides* e propuseram cinco novas espécies: *M. amethystinus*, *M. atramentarius*, *M. pseudolusitanicus*, *M. pseudocircinelloides* e *M. variicolumellatus*. O complexo *M. circinelloides* abriga espécies causadoras de mucormicose em pacientes imunocomprometidos

(WAGNER *et al.*, 2019; WAGNER *et al.*, 2020). *Mucor circinelloides* produz carotenóides a partir de β -caroteno por dioxigenases (ALCALDE *et al.*, 2019), enquanto *M. indicus* pode produzir etanol (MOLAVERDI *et al.*, 2019) e *M. subtilissimus* foi citada como produtora de derivados da betulina (LI *et al.*, 2019).

As espécies do gênero *Mucor* são comumente encontradas em excrementos de animais, solo, vegetais em decomposição e em plantas. Como o supracitado, algumas causam infecções em humanos, anfíbios, bovinos e suínos, como *M. circinelloides*, *M. indicus*, *M. ramosissimus*, *M. irregularis* e *M. amphibiorum* (LIANG *et al.*, 2018; GARCÍA-SEPÚLVEDA *et al.*, 2017). Para esse gênero, 92 espécies são conhecidas (WIJAYAWARDENE *et al.*, 2022).

Para o Brasil, foram reportadas 38 espécies de *Mucor*, incluindo seis novas: *M. merdicola*, *M. caatinguensis* (LIMA *et al.*, 2016), *M. pernambucoensis* (LIMA *et al.*, 2018), *M. septatum* (DE SOUZA *et al.*, 2018), *M. souzae* (CROUS *et al.*, 2018) e *M. merdophylus* (LIMA *et al.*, 2020).

2.3.6 *Rhizopus* Ehrenb.

Rhizopus pertence à família Rhizopodaceae (WIJAYAWARDENE *et al.*, 2022). As espécies de *Rhizopus* apresentam crescimento rápido, formando colônias brancas, com pontos escuros, ou cinzas, correspondentes aos esporângios, com apófise discreta, formados no ápice do esporangióforos, simples ou ramificados, que surgem do micélio aéreo ou do estolão. Rizoides são frequentes, sendo comumente opostos ao esporângio. Os zigospórangios, estruturas de reprodução sexuada, são geralmente negros e com paredes ornamentadas, e as células suspensoras não possuem apêndices (ZHENG *et al.*, 2007; BENNY, 2009). Os esporangiosporos, a depender da espécie, podem ou não exibir estrias longitudinais (ZHENG *et al.*, 2007).

Esse gênero foi classificado em três grupos: *R. stolonifer*, *R. oryzae* e *R. microsporus*, por SCHIPPER (1984) e SCHIPPER & STALPERS (1984), com base nas características morfológicas e nas temperaturas máximas de crescimento das espécies. Zheng *et al.* (2007), ao revisarem o gênero, com base na morfologia e nas temperaturas de crescimento, descreveram dez espécies e nove variedades de *Rhizopus*. Em seguida, Liu *et al.* (2008) propuseram a sinonimização de *R. arrhizus* var. *rouxii* (Calmette) J.J. Ellis com *R. arrhizus* var. *arrhizus* e de *R. microsporus* var. *oligosporus* (*R. oligosporus*) com *R. arrhizus* var. *arrhizus*. *Rhizopus tonkinensis* Vuill. e *R. azygosporus* G.F. Yuan & S.C. Jong. receberam novas combinações: *R. arrhizus* var. *tonkinensis* (Vuill.) R.Y. Zheng & X.Y. Liu e *R. microsporus*

var. *azygosporus* (G. F. Yuan & S. C. Jong.). Além disso, após a realização de análises morfológicas, fisiológicas e genéticas, além da espectrometria de massa (MALDI-ToF), chegou-se à conclusão que todas as variedades de *R. microsporus* são sinônimas e devem ser citadas como *R. microsporus* (DOLATABADI *et al.*, 2014).

Espécies desse gênero estão associadas a casos de mucormicose, em pessoas com baixa imunidade (WALTHER *et al.*, 2019; WAGNER *et al.*, 2019). Algumas espécies, como *R. microsporus* está relacionada com a fermentação de alimentos (LÜCKE *et al.*, 2019), enquanto *R. stolonifer* é um comum deteriorador de frutos, hortaliças, legumes e produtos estocados (HERNÁNDEZ-LAUZARDO *et al.*, 2006).

Atualmente, 13 espécies de *Rhizopus* são aceitas (ABE *et al.*, 2010; LI *et al.*, 2016; SPECIES FUNGORUM, 2023; WIJAYAWARDENE *et al.*, 2022). No Brasil, foram isolados *R. arrhizus*, *R. homothallicus*, *R. microsporus* e *R. stolonifer*, (LIMA *et al.*, 2018; FLORA E FUNGA DO BRASIL, 2023).

2.4 OS FUNGOS MUCORÁCEOS ISOLADOS DO SOLO DE BREJOS DE ALTITUDE DE PERNAMBUCO

A região nordeste do Brasil exibe frações de florestas úmidas denominadas de brejos de altitude, que são áreas elevadas, isoladas e circundadas pela Caatinga (ARAÚJO FILHO *et al.*, 2000). Essas áreas apresentam condições privilegiadas quanto à umidade do solo e do ar, temperatura e cobertura vegetal, quando comparadas às regiões secas da Caatinga, servindo como refúgios para espécies de mata úmida dentro do semiárido (ANDRADE-LIMA, 1982). Os brejos de altitude, possuem uma diversidade de organismos que podem ser encontrados na amazônia e espécies serranas do sul e sudeste do Brasil (MARQUES *et al.*, 2014).

Alguns trabalhos relacionados à diversidade dos fungos Mucoromycota reportaram 68 espécies, até o momento, em solo de brejos de altitude de Pernambuco, incluindo espécies novas e primeiras ocorrências para esse ecossistema (CORDEIRO *et al.*, 2020; DE SOUZA *et al.*, 2020; LIMA *et al.*, 2020; DE LIMA *et al.*, 2021; ALVES *et al.*, 2021; ALVES, 2021; LEITÃO *et al.*, 2021; CORDEIRO *et al.*, 2022; DE LIMA *et al.*, 2022).

Santiago e Maia (2010) registraram, pela primeira vez para o Brasil, do solo do Município de Triunfo, *Apophysomyces elegans*. Nesta mesma área, Santiago *et al.* (2013) reportaram oito espécies dos gêneros *Absidia*, *Cunninghamella*, *Lichtheimia*, *Mucor* e *Syncephalastrum*. Alves (2016) isolou 23 táxons de Mucorales em três brejos de altitude pernambucanos, sendo 13 na Serra dos Cavalos e 21 no brejo de Jenipapo, pertencentes aos

gêneros *Absidia*, *Cunninghamella*, *Gongronella*, *Mucor* e *Rhizopus*, e 16 em Serra Negra, pertencentes à *Cunninghamella*, *Gongronella*, *Lichtheimia* e *Rhizopus*. *Gongronella brasiliensis* foi descrita pela primeira vez a partir de amostras de solo coletadas em Taquaritinga do Norte (TIBPROMMA *et al.*, 2017).

Alves *et al.* (2017) isolaram de solo da Serra dos Cavalos, *Cunninghamella clavata*, sendo essa a primeira ocorrência dessa espécie para o Brasil. De Souza *et al.* (2018) isolaram, do solo do Brejo da Madre de Deus, e descreveram pela primeira vez, *Mucor septatum*. Souza *et al.* (2018) também descreveram uma nova espécie, *Mucor souzae* (CROUS *et al.*, 2018), isolada do Município de Triunfo. De Lima *et al.* (2018a) isolaram e descreveram uma nova espécie, *Mucor pernambucoensis*, do solo da cidade de Bonito. De Lima (2018b) isolou, de solos do brejo da Serra de Bonito e brejo do Sítio da Palmeira, 39 espécies de Mucorales distribuídas entre *Absidia*, *Actinomucor*, *Backusella*, *Cunninghamella*, *Gongronella*, *Lichtheimia*, *Mucor*, *Rhizopus* e *Syncephalastrum*.

De Souza (2019) isolou, de amostras de solo de três brejos de altitude, 70 táxons de Mucoromyceta, sendo 28 do brejo da Serra do Bituri, pertencentes à *Absidia*, *Backusella*, *Cunninghamella*, *Gongronella*, *Mortierella*, *Mucor*, *Rhizopus* e *Umbelopsis*; 28 táxons do brejo de Taquaritinga do Norte, pertencentes à *Absidia*, *Actinomucor*, *Backusella*, *Cunninghamella*, *Gongronella*, *Mortierella*, *Mucor* e *Rhizopus*; e 19 táxons do brejo do Sítio Carro Quebrado, distribuídos entre *Absidia*, *Actinomucor*, *Cunninghamella*, *Gongronella*, *Lichtheimia*, *Mortierella*, *Mucor*, *Rhizopus* e *Syncephalastrum*.

Crous *et al.* (2019) reportaram uma nova espécie, *Backusella azygospora*, isolada de amostras de solo do município de Saloá. Dessa mesma área, foram isoladas e descritas, pela primeira vez, *Absidia multispora* e *A. saloensis* (CROUS *et al.*, 2019; CORDEIRO *et al.*, 2020). *Mucor variicolumellatus* foi reportado como primeira ocorrência para a região Neotropical, tendo sido isolado de amostras de solo do brejo de altitude de Taquaritinga do Norte (DE SOUZA *et al.*, 2020).

Lima *et al.* (2020) descreveram *Absidia cornuta* de uma área de brejo de altitude em Garanhuns, enquanto de Lima *et al.* (2021) descreveram *A. bonitoensis*, isolada de solo do Brejo de Bonito. *Backusella gigacellularis*, isolada durante um levantamento de fungos mucoráceos no Brejo da Serra do Benedito, foi reportada como primeira ocorrência para o nordeste brasileiro por Alves *et al.* (2021). Ainda nesse mesmo ano, Alves (2021) isolou 29 táxons de Mucorales de solos de brejos de altitude pernambucanos, sendo 19 da Serra do Jardim, distribuídos entre *Absidia*, *Backusella*, *Cunninghamella*, *Gongronella*, *Mucor* e *Rhizopus*; 17 na Serra do Vento, pertencentes à *Cunninghamella*, *Gongronella*, *Lichtheimia*,

Mucor, *Rhizopus* e *Syncephalastrum*; 22 espécies foram obtidas do solo da Serra do Benedito, distribuídas entre *Absidia*, *Backusella*, *Cunninghamella*, *Gongronella*, *Mucor* e *Rhizopus*.

Leitão *et al.* (2021) descreveram *Absidia aguabelensis* J, isolada dos brejos de altitude da Serra do Comunaty e da RPPN do Benedito, de onde foram isoladas outras 44 espécies e três variedades de Mucoromycota (Leitão, 2021). Os gêneros de Mucorales presentes nesse último estudo foram *Absidia*, *Backusella*, *Cunninghamella*, *Gongronella*, *Mucor*, *Rhizopus* e *Syncephalastrum*.

Cordeiro (2023) reportou, no brejo de altitude da RPPN Reserva Natural Brejo, 54 espécies e seis variedades de Mucoromycota, pertencentes à *Absidia*, *Backusella*, *Cunninghamella*, *Gongronella*, *Lichtheimia*, *Mucor*, *Rhizopus* e *Umbelopsis*. Trinta e duas espécies e quatro variedades de Mucoromycota foram isoladas do solo do brejo de Taquaritinga do Norte, pertencentes à *Absidia*, *Backusella*, *Circinella*, *Cunninghamella*, *Gongronella*, *Mucor*, *Rhizopus* e *Umbelopsis*.

De Lima (2023) identificou, no brejo Serra do Comunaty, 24 espécies e quatro variedades de Mucorales, pertencentes aos gêneros *Absidia*, *Backusella*, *Cunninghamella*, *Gongronella*, *Lichtheimia*, *Mucor*, *Rhizopus* e *Syncephalastrum*. Da Serra do Ororubá, foram identificadas 33 espécies e uma variedades de Mucorales, pertencentes aos gêneros *Absidia*, *Backusella*, *Cunninghamella*, *Gongronella*, *Lichtheimia*, *Mucor*, *Rhizopus* e *Thamnostylum*. De Lima *et al.* (2022) descreveram *Backusella brasiliensis* C.L. Lima, Hyang B. Lee & A.L. Santiago e *Backusella obliqua* C.L. Lima, J.D. Leitão, Hyang B. Lee & A.L. Santiago, do solo dos brejos de Mimoso e Águas Belas.

3 OBJETIVOS

3.1 GERAL

Conhecer como as comunidades de fungos mucoráceos estão estruturadas no solo de dois diferentes brejos de altitude de Pernambuco, avaliando as possíveis influências dos atributos químicos do solo, da temperatura (ar e solo) e da pluviosidade na estruturação dessas comunidades.

3.2 ESPECÍFICOS

- I – Conhecer as comunidades fungos mucoráceos no solo de dois brejos de altitude;
- II – Determinar a α -diversidade de espécies de fungos nos brejos, enfatizando as métricas de frequência de ocorrência, abundância relativa e os índices de diversidade;
- III – Avaliar a influência das principais variáveis químicas do solo, da temperatura (ar e solo) e a da pluviosidade sobre a estrutura das comunidades dos fungos mucoráceos dos brejos estudados;
- IV – Comparar os dois brejos de altitude visitados quanto à riqueza de espécies e diversidade de fungos mucoráceos;
- V – Descrever, ilustrar e publicar as espécies novas, raras e primeiras ocorrências para o Brasil e/ou para América do Sul;
- VI – Contribuir com a preservação *ex situ* (no herbário URM, na Micoteca URM e no *GenBank*) da diversidade e do patrimônio genético dos fungos mucoráceos.

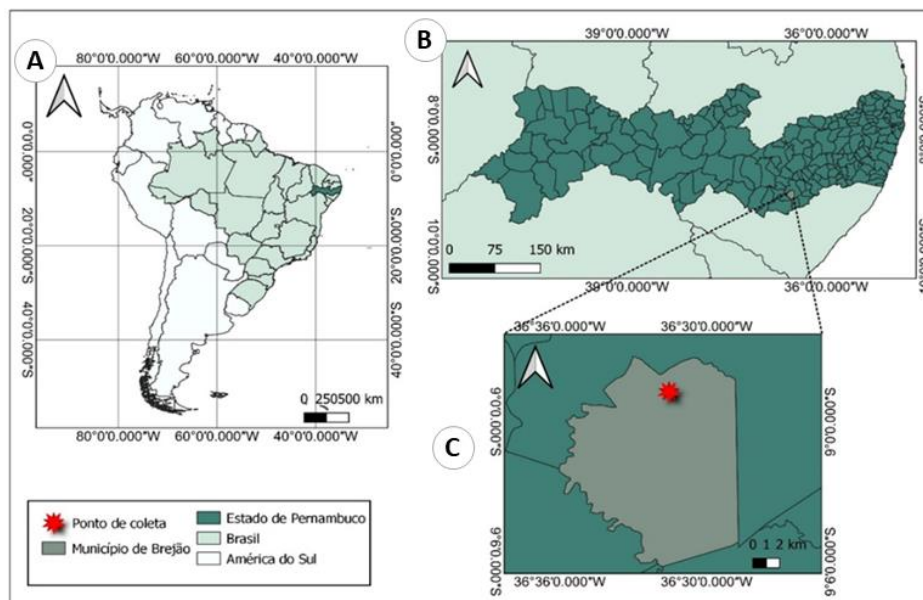
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 ÁREAS DE COLETA

4.1.1 Brejão - PE

O brejo de Brejão localiza-se no Município de Brejão ($9^{\circ}1'44''\text{S}$ $36^{\circ}34'26''\text{W}$), que se estende por 159,8 km² e faz fronteira com os municípios de Terezinha, Garanhuns e Lagoa do Ouro, situando-se a 18 km ao sul-oeste de Garanhuns, a 754 metros de altitude, está situado na mesorregião do agreste pernambucano e microrregião de Garanhuns, com 8.993 habitantes (CIDADE-BRASIL, 2023) (Figura 2). A vegetação local é formada por florestas subcaducifólia e caducifólia (Figura 3). O clima é do tipo tropical chuvoso, com verão seco. A estação chuvosa se inicia em janeiro/fevereiro, com término em setembro/outubro (MME, 2005a), com temperatura média anual é de 19.5 °C, ao longo do ano, e precipitação média anual de 780 mm (Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente de Pernambuco, 2006).

Figura 2. Localização do ponto de coleta no Município de Brejão (Brejão - PE, Brasil). A. Mapa da América do Sul com o estado de Pernambuco em verde escuro. B. Mapa do estado de Pernambuco. C. Mapa do município de Brejão com destaque do local de coleta em vermelho.



Fonte: A autora (2023).

Figura 3. Aspecto da vegetação do Brejo de altitude de Brejão.

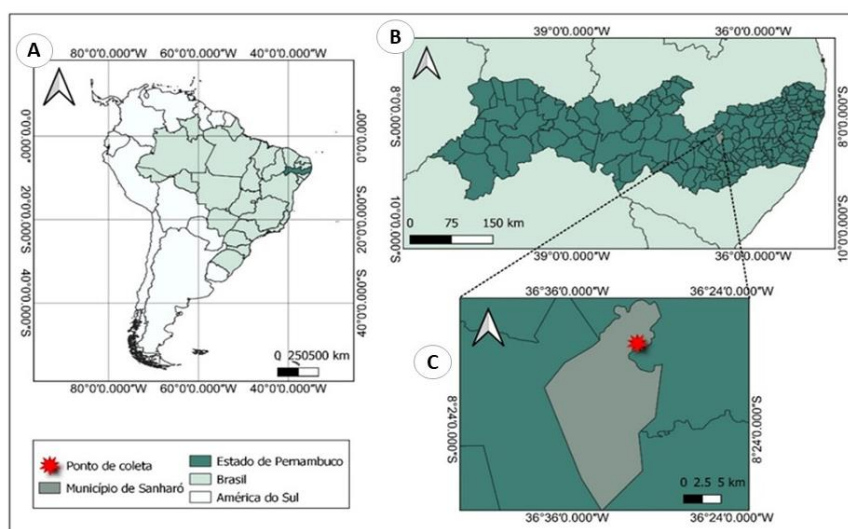


Fonte: A autora (2023).

4.1.2 Sanharó -PE

O brejo de Jenipapo está localizado no município de Sanharó ($8^{\circ}17'08.6''$ S $36^{\circ}30'53.9''$ W), na unidade geoambiental do Planalto da Borborema, formada por maciços e outeiros altos, com altitude variando entre 650 e 1.000 m, localizado a 198,2 km do Recife, situado na mesorregião do agreste pernambucano, microrregião vale do Ipojuca, com mais de 27 mil habitantes (Figura 4). A vegetação local é formada por florestas subcaducifólia e caducifólia (Figura 5). O clima é do tipo tropical chuvoso, com verão seco. A estação chuvosa se inicia em janeiro/fevereiro, com término em setembro, podendo se estender até outubro. A temperatura média anual é de 31°C , com precipitação média anual de 496,23 mm (MME, 2005b).

Figura 4. Localização do ponto de coleta no Município de Sanharó (Sanharó - PE, Brasil). A. Mapa da América do Sul com o estado de Pernambuco em verde escuro. B. Mapa do estado de Pernambuco. C. Mapa do município de Sanharó com destaque do local de coleta em vermelho.



Fonte: A autora (2023).

Figura 5. Aspecto da vegetação do Brejo de altitude de Jenipapo.



Fonte: A autora (2023).

4.2 DADOS PLUVIOMÉTRICOS E DE TEMPERATURAS DO MUNICÍPIO E DO SOLO

Os dados de precipitação pluviométrica e as médias de temperatura de cada município (Tabelas 1 e 2), referentes aos meses de coleta, foram fornecidos pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) (<https://www.apac.pe.gov.br/>). As temperaturas das amostras solo foram aferidas para os cinco quadrantes, em cada coleta (Tabela 1 e 2), em ambos os brejos de altitude visitados, utilizado um termômetro de solo.

Tabela 1. Dados de precipitação pluviométrica e da temperatura no município de Brejão, Pernambuco.

Coleta	Acumulado do mês	10 dias antes da coleta	2 dias antes da coleta	No dia da coleta	Temperatura média mensal do ar	Temperatura média do solo
1 – Ago/2021	164 mm	10,5 mm	0 mm	0 mm	20 °C	22 °C
2 – Out/2021	19.6 mm	0 mm	0 mm	0 mm	27 °C	22 °C
3 – Dez/2021	58 mm	0 mm	0 mm	0 mm	25 °C	24 °C
4 – Fev/2022	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	24 °C	23 °C

Fonte: A autora (2023).

Tabela 2. Dados de precipitação pluviométrica e da temperatura no município de Sanharó, Pernambuco.

Coleta	Acumulad o do mês	10 dias antes da coleta	2 dias antes da coleta	No dia da coleta	Temperatura média mensal do ar	Temperatura média do solo
1 – Set/2021	12.4 mm	0 mm	0 mm	0 mm	27 °C	22 °C
2 – Out/2021	1.5 mm	0 mm	0 mm	0 mm	27 °C	24 °C
3 – Dez/2021	68 mm	0 mm	4.8 mm	0 mm	27 °C	26 °C
4 – Abr/2022	48.2 mm	6.0 mm	0 mm	0 mm	26 °C	22 °C

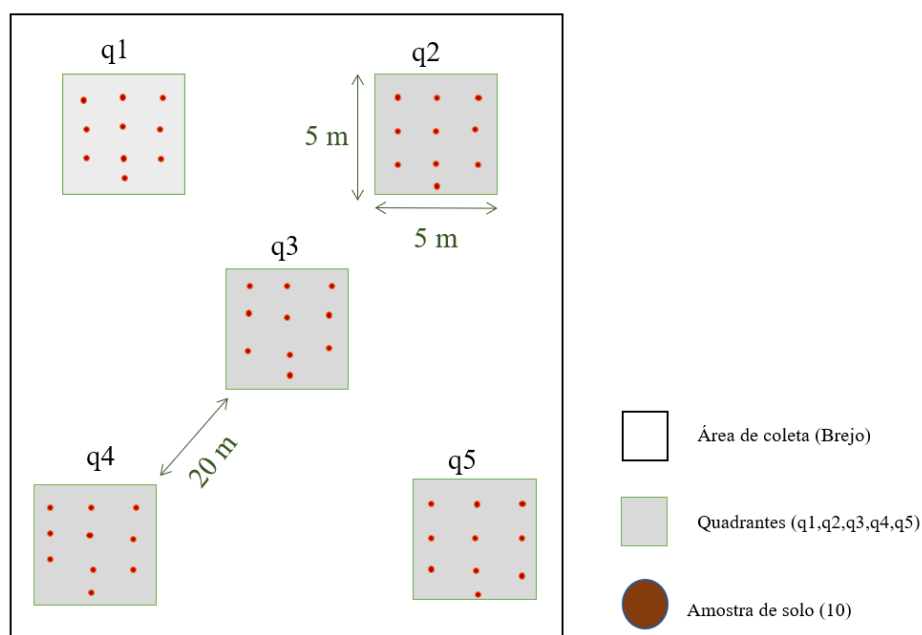
Fonte: A autora (2023).

4.3. COLETAS DAS AMOSTRAS DE SOLO

Foram realizadas quatro expedições para coleta de solo, em cada um dos brejos anteriormente citados, entre 2021 e 2022 (Tabela 3). Em cada área (brejo), cinco quadrantes de 25 m² (5 x 5 m) foram distribuídos aleatoriamente, respeitando-se a distância mínima de 20 m entre eles (Figura 6). Em cada quadrante, dez subamostras de solo foram retiradas com o auxílio de uma espátula, esterilizada, em uma profundidade de 5 cm, que totalizaram 50 subamostras de solo para cada área, por expedição. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos previamente esterilizados, etiquetados, conservados em caixas isotérmicas e encaminhados ao Laboratório de Fungos Zigospóricos, do Departamento de Micologia, da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Chegando ao laboratório, as dez subamostras de cada quadrante foram homogeneizadas em volumes iguais, dando origem a uma amostra composta por quadrante, totalizando cinco amostras compostas, por área de coleta. Ao fim do trabalho, foram analisadas 20 amostras compostas por área, totalizando 40 amostras compostas de solo, considerando os dois brejos supracitados.

Figura 6. Representação do esquema de coletas de solo por quadrantes em cada brejo de altitude visitado.



Fonte: A autora (2023).

Tabela 3. Meses e anos das coletas do solo dos brejos de altitude de Brejão e Jenipapo.

Brejos de altitude	Coletas de solo
Brejão	Agosto, outubro e novembro/2021 e fevereiro/2022
Jenipapo	Setembro, outubro e novembro/2021 e abril/2022

Fonte: A autora (2023).

4.4 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DOS SOLOS

Para as análises físico-químicas, uma amostra composta de solo coletada durante a primeira expedição, em cada brejo, equivalente a 500 g, foi encaminhada, em caixa isotérmica, para o Instituto Agronômico de Pernambuco (IPA), para análise das concentrações de Fósforo (P), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Sódio (Na), Potássio (K), Alumínio (Al), Hidrogênio (H), soma das bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (v%), saturação por alumínio (m%) e do potencial hidrogeniônico (pH) (Tabela 4 e 5).

Tabela 4. Variáveis químicas de amostras compostas de solo do brejo de altitude de Brejão.

Amostra	P	pH	Ca	Mg	Na	K	Al	H	SB	CTC	v	m
	mg/dm ³	(H ₂ O)	cmolc/dm ³								%	
1	2	5,5	2,05	1,35	0,04	0,7	0,2	5,73	3,5	9,4	37	5
2	2	5,1	1	1,2	0,03	0,04	0,4	5,2	2,3	7,9	29	15
3	2	5,3	1,65	1,25	0,04	0,05	0,2	4,91	3	8,1	37	6
4	2	5,3	0,85	1,25	0,04	0,04	0,3	4,73	2,2	7,2	30	12

5	2	4,9	2,4	1,55	0,06	0,12	0,3	9,18	4,1	13,6	30	7
Média	2	5,2	1,5	1,3	0,04	0,19	0,02	5,95	3,0	9,24	32	9

Legenda: P - Fósforo; pH - potencial hidrogeniônico; Ca - Cálcio; Mg - Magnésio; Na - Sódio; K - Potássio; Al - Alumínio; H - Hidrogênio; SB - Soma das bases; CTC - capacidade de troca de cátions; v% - Saturação por bases; m% - saturação por Alumínio.

Fonte: A autora (2023).

Tabela 5. Variáveis químicas de amostras compostas de solo do brejo de altitude de Jenipapo.

Amostra	P	pH	Ca	Mg	Na	K	Al	H	SB	CTC	v	m
	mg/dm ³	(H ₂ O)	cmoloc/dm ³								%	
1	5	5,2	3,85	0,70	0,02	0,41	0,15	4,55	5,0	9,7	51	3
2	10	5,6	6,0	1,50	0,04	0,44	0,05	5,06	8,0	13,1	61	1
3	13	6,0	6,40	1,30	0,04	0,64	0,00	2,72	8,4	11,1	75	0
4	12	5,9	4,80	1,00	0,02	0,52	0,00	2,55	6,3	8,9	71	0
5	10	5,8	6,70	1,20	0,02	0,48	0,00	3,30	8,4	11,7	72	0
Média	10	5,7	5,55	1,14	0,02	0,49	0,04	3,63	7,2	10,9	66	0,8

Legenda: P - Fósforo; pH - potencial hidrogeniônico; Ca - Cálcio; Mg - Magnésio; Na - Sódio; K - Potássio; Al - Alumínio; H - Hidrogênio; SB - Soma das bases; CTC - capacidade de troca de cátions; v% - Saturação por bases; m% - saturação por Alumínio.

Fonte: A autora (2023).

4.5 ISOLAMENTO, PURIFICAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO

Para o isolamento dos fungos mucoráceos, cinco miligramas de solo de cada amostra composta foram espalhadas sobre o meio de cultura ágar germen de trigo (BENNY, 2008), adicionado de cloranfenicol (80 mg. L⁻¹), para evitar o crescimento bacteriano, contido em placas de Petri. Para cada amostra composta de solo foram preparadas placas em quintuplicada. Um total 25 placas por quadrante por coleta, totalizando 100 placas para cada área. O crescimento das colônias foi acompanhado diariamente, por até 72 horas sob temperatura (28 ± 2 °C) e luminosidade ambientes. Para a purificação dos isolados, fragmentos do micélio, geralmente da estrutura reprodutiva, foram transferidos separadamente, com auxílio de um estereomicroscópio Leica EZ4, para o meio batata dextrose ágar (BDA) (LACAZ *et al.*, 2002), adicionado de cloranfenicol (80 mg. L⁻¹), contido em placas de Petri. Após confirmada a pureza, fragmentos do micélio foram transferidos para tubos de ensaio contendo batata dextrose ágar (BDA).

Para a identificação, os espécimes foram analisados morfológicamente pela observação das características macroscópicas (coloração, aspecto e diâmetro das colônias) e microscópicas (microestruturas), com auxílio de microscópio de luz Leica DM500. As microestruturas foram medidas a partir de culturas em lâmina montadas com 2% KOH, glicerol (10%) ou em Azul de Amann e os espécimes foram identificados de acordo com Ellis e Hesseltine (1965 e 1966), Benny (1982), Schipper (1978, 1984), Hesseltine e Fennel (1995),

Zheng e Chen (2001), Zheng *et al.* (2007), Benjamin (1959) Alvarez *et al.* (2011) e Wagner *et al.* (2020).

As espécies novas e primeiras ocorrências para o Brasil foram descritas e ilustradas utilizando os meios de cultura ágar extrato de malte (AEM) (BENNY, 2008) e/ou BDA, em placas de Petri. As novas espécies foram incubadas em diferentes temperaturas, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 °C, no escuro, e o crescimento das colônias foi avaliado a cada 24 horas, determinando-se quantos centímetros as colônias cresceram nesse intervalo e se houve diferença de coloração entre o dia do inóculo e o dia em que a colônia tomou toda a placa de Petri. A coloração das colônias foi determinada de acordo com Kornerup e Wanscher (1978).

4.6 EXTRAÇÃO DO DNA, AMPLIFICAÇÃO E SEQUENCIAMENTO DAS REGIÕES ITS E LSU DO rDNA

A biomassa fúngica foi obtida a partir de culturas inoculadas em MEA incubadas a 28 °C por até 5 dias e foi transferida para microtubos de 2 mL com tampa de rosca. Posteriormente, o material foi transferido para microtubos com tampa de rosca de 2 mL. Em cada tubo contendo 0,5 g de esferas de vidro de dois diâmetros diferentes (150–212 µm e 425–600 µm, 1:1; Esferas de vidro, Sigma-Aldrich, Darmstadt, Alemanha), lavadas com ácido, foram adicionados a cada tubo e a biomassa fúngica foi triturada por agitação em alta velocidade em um homogeneizador FastPrep (FastPrep-24, MP Biomedicals, Califórnia, EUA). O DNA genômico foi extraído de acordo com De Oliveira *et al.* (2016), em que o micélio foi homogeneizado em tampão de lise CTAB [brometo de cetiltrimetilamônio a 2%, EDTA 20 mM, Tris-HCl 0,1 M (pH 8,0), NaCl 1,4 M; Doyle & Doyle, 1987, 1990], lavado com clorofórmio e álcool isoamílico (24:1), e, subsequentemente, o sobrenadante contendo DNA foi separado dos resíduos de hifas. O sobrenadante foi misturado com um volume igual de isopropanol seguido de precipitação de DNA após incubação a -20°C por 30 min. Após centrifugação a 13.000 rpm por 10 min, o pellet de DNA resultante foi lavado com etanol 70% por 1 minuto e posteriormente, foi ressuspenso em 50 µL de água ultrapura. Para amplificar as regiões LSU e ITS do rDNA os primers ITS1 e ITS4 (WHITE *et al.*, 1990), LR1 e LSU2 (SCHMITT *et al.*, 2009; VAN TUINEN *et al.*, 1998; SANTIAGO *et al.*, 2013) foram utilizados, respectivamente. As reações de PCR foram realizadas conforme Oliveira *et al.* (2014). Os produtos amplificados foram purificados com PureLink – PCR Purification Kit (Invitrogen) e transportados para serem sequenciados na Plataforma de Multiusuários de Sequenciamento do

Centro de Biociências da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE (Pernambuco, Brasil). Para as amostras em que o sequenciamento direto das regiões do rDNA obtidas por produtos de PCR não tiveram sucesso, os produtos de PCR foram clonados usando o kit de clonagem pGEM-T Easy Vector System (Promega, Madison, EUA), seguindo as instruções do fabricante. Esses clones foram sequenciados com os primers M13F forward (5'-GTAAAACGACGGCAGT-3') e M13R-pUC reverse (5'-CAGGAAACAGCTATGAC-3') usando o ABI PRISM 3730XL Genetic Analyzer (TermoFisher Scientific, Carlsbad, EUA).

4.7 ALINHAMENTO, ANÁLISES FILOGENÉTICAS E CONFIRMAÇÃO GENÉTICA

As sequências obtidas nessa pesquisa foram comparadas às disponíveis no *GenBank* utilizando-se a ferramenta BLASTn (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov>). Para a construção das árvores filogenéticas, as sequências foram alinhadas com o auxílio MAFFT versão 7 (<https://mafft.cbrc.jp/alignment/server>) (KATO et al., 2013) e editadas no MEGA versão 7 (KUMAR et al., 2016). As caracterizações moleculares de análises de inferência bayesiana (BI) e máxima verossimilhança (ML) foram executadas com MrBayes versão 3.2.2 (RONQUIST et al., 2012) em Xsede e RAxML-HPG BlackBox versão 8.2.8 (STAMATAKIS et al., 2008; SATAMAKIS, 2014) respectivamente, utilizando a plataforma CIPRES Science Gateway (<https://www.phylo.org>) (MILLER et al., 2010). A análise de máxima verossimilhança foi realizada a partir do modelo de substituição de nucleotídeos padrão GTR+I+G e a inferência bayesiana foi realizada utilizando o melhor modelo de substituição de nucleotídeos estimado em MrModeltest versão 2.3. As árvores filogenéticas foram observadas e organizadas usando o Interactive Tree of Life (iTOL) versão 4 (<https://itol.embl.de>) (LETUNIC & BORK, 2019).

4.8 ANÁLISE BIOESTATÍSTICA

A frequência de ocorrência (FO) das espécies foi estimada segundo a equação: $FO = (J_i/k)$, em que: FO = frequência de ocorrência da espécie i; J_i = número de amostras nas quais a espécie i ocorreu; K = número total de amostras de solo. De acordo com essa fórmula, as espécies foram classificadas como: muito frequentes ($> 10\%$), frequentes ($5-10\%$), pouco frequentes, ($\geq 1 < 5\%$) e raras ($< 1\%$) (HYDE & SARMA, 2001).

As análises estatísticas (multivariadas) de diversidade (α), frequência, abundância e escalonamento multidimensional não métrico (NMDS) foram realizadas no software R versão

4.1.1 (R Core Team, 2021), com a ajuda da interface RStudio 2021.09.0-Build 351 (RStudio Team, 2021). A análise de variância (ANOVA) e o teste *post-hoc* LSD (Least Significant Difference) de Fisher foram realizados através da biblioteca R 'agricolae' (v. 1.3.5), adotando o nível de significância de 5% ($p = 0.05$) para os dados da alfa-diversidade. A correção de Boferroni foi aplicada para controlar a taxa de erro do tipo I da família de teste em função das comparações múltiplas entre tratamentos.

Os gráficos de barras foram construídos utilizando as funções do pacote 'ggplot2' (v. 3.3.5). As análises de interpolação e extrapolação da riqueza através do número de Hill foram computadas por meio da biblioteca R 'iNEXT' (v. 3.0.0). Os gráficos de barras e demais figuras da estatística multivariada foram construídos através dos recursos dos pacotes R 'graphics' (v. 4.1.1), 'ggplot2' (biplots), 'cowplot' (v. 1.1.1) e 'gridExtra' (v. 2.3). Os testes de contraste da abundância de isolados de fungos entre os perfis dos brejos foram representados através dos gráficos de erro estendido utilizando o *software* STAMP 2.1.3 (PARKS *et al.*, 2014).

4.9 INCORPORAÇÃO DAS CULTURAS DOS ESPÉCIMES À COLEÇÃO DE CULTURAS MICOTECA URM, DE LÂMINAS NO HERBÁRIO URM E DAS SEQUÊNCIAS ITS E LSU DO rDNA NO GENBANK

Os espécimes foram incorporados à Coleção de Culturas da Micoteca URM da Universidade Federal de Pernambuco, em BDA, óleo mineral e liofilizados (holótipos), e lâminas permanentes (holótipos) das espécies novas foram incorporadas ao Herbário URM da Universidade Federal de Pernambuco (Tabela 6 e 7). As sequências das regiões ITS e LSU do rDNA geradas foram depositadas no Genbank, de acordo com o protocolo de depósito estabelecido por esse banco genômico (Tabela 8).

Tabela 6. Espécimes depositados na Micoteca e Herbário URM da Universidade Federal de Pernambuco.

Espécie	Código Micoteca URM	Método/meio de preservação	Data da incorporação
<i>Absidia</i> sp. 1	URM8648	Óleo Mineral/BDA	21/12/2022
<i>A. aguabelensis</i> J.D. Leitão, T.R.L. Cordeiro, Hyang B. Lee & A.L. Santiago	URM8652	Óleo Mineral/BDA	21/12/2022
<i>A. cornuta</i> D.X. Lima, C.A.de Souza, H.B. Lee & A.L. Santiago	URM8651	Óleo Mineral/BDA	21/12/2022
<i>A. pernambucoensis</i> D.X. Lima, Souza-Motta & A.L. Santiago	URM8654	Óleo Mineral/BDA	21/12/2022

<i>A. saloensis</i> T.R.L. Cordeiro, D.X. Lima, Hyang B. Lee & A.L. Santiago	URM8559	Óleo Mineral/BDA	24/08/2022
<i>Backusella paraconstricta</i> F.R.S. Santos, T.R.L. Cordeiro, Hyang B. Lee & A.L. Santiago	URM8637	Óleo Mineral/BDA	22/11/2022
<i>B. constricta</i> D.X. Lima, C.A.F. de Souza & A.L. Santiago	URM8701	Óleo Mineral/BDA	23/02/2023
<i>B. constricta</i> D.X. Lima, C.A.F. de Souza & A.L. Santiago	URM8603	Óleo Mineral/BDA	17/10/2022
<i>B. lamprospora</i> (Lendn.) Benny & R.K. Benj.	URM8638	Óleo Mineral/BDA	22/11/2022
<i>B. locustae</i> Hyang B. Lee, S.H. Lee & T.T.T. Nguyen	URM8608	Óleo Mineral/BDA	17/10/2022
<i>Cunninghamella</i> sp. 1	URM8557	Óleo Mineral/BDA	24/08/2022
<i>C. bertholletiae</i> Stadel	URM8554	Óleo Mineral/BDA	24/08/2022
<i>C. elegans</i> Lendn.	URM8556	Óleo Mineral/BDA	24/08/2022
<i>C. echinulata</i> var. <i>echinulata</i> (Thaxt.) ex Blakeslee	URM8558	Óleo Mineral/BDA	24/08/2022
<i>Gongronella butleri</i> (Lendn.) Peyronel & Dal Vesco	URM8562	Óleo Mineral/BDA	24/08/2022
<i>G. brasiliensis</i> C.A.F. de Souza, D.X. Lima & A.L. Santiago	URM8555	Óleo Mineral/BDA	24/08/2022
<i>Mucor ardhlaengiktus</i> B.S. Mehrotra & B.M. Mehrotra	URM8592	Óleo Mineral/BDA	28/09/2022
<i>M. circinatus</i> D.X. Lima, G. Walther & A.L. Santiago	URM8587	Óleo Mineral/BDA	28/09/2022
<i>Mucor circinelloides</i> Tiegh.	URM8606	Óleo Mineral/BDA	17/10/2022
<i>M. fragilis</i> Bainier	URM8650	Óleo Mineral/BDA	21/12/2022
<i>M. griseocyanus</i> Hagem	URM8589	Óleo Mineral/BDA	28/09/2022
<i>M. hiemalis</i> Wehmer	URM8605	Óleo Mineral/BDA	17/10/2022
<i>M. lusitanicus</i> Bruderl.	URM8607	Óleo Mineral/BDA	17/10/2022
<i>M. merdicola</i> C.A.F. de Souza & A.L. Santiago	URM8588	Óleo Mineral/BDA	28/09/2022
<i>M. minutus</i> (Bajjal & B.S. Mahrotra) Schipper	URM8636	Óleo Mineral/BDA	22/11/2022
<i>M. pseudocircinelloides</i> L. Wagner & G. Walther	URM8609	Óleo Mineral/BDA	17/10/2022
<i>M. irregulares</i> Stchigel, Cano, Guarro & E. Álvarez	URM8649	Óleo Mineral/BDA	21/12/2022
<i>M. pernambucoensis</i> C.L. Lima, D.X. Lima & A.L. Santiago	URM8653	Óleo Mineral/BDA	21/12/2022
<i>M. pseudolusitanicus</i> L. Wagner & G. Walther	URM8604	Óleo Mineral/BDA	17/10/2022
<i>Mucor racemosus</i> f. <i>racemosus</i> Fresen.	URM8590	Óleo Mineral/BDA	28/09/2022
<i>M. souzae</i> C.A. de Souza, D.X. Lima A.L. Santiago	URM8584	Óleo Mineral/BDA	28/09/2022
<i>M. subtilissimus</i> Berk.	URM8585	Óleo Mineral/BDA	28/09/2022
<i>M. variicolumellatus</i> L. Wagner & G. Walther	URM8591	Óleo Mineral/BDA	28/09/2022
<i>Rhizopus arrhizus</i> var. <i>arrhizus</i> A. Fisch.	URM8560	Óleo Mineral/BDA	24/08/2022
<i>R. stolonifer</i> (Ehrenb.) Vuill.	URM8561	Óleo Mineral/BDA	24/08/2022

Fonte: A autora (2023).

Tabela 7. Números (holótipos) das espécies novas.

Espécie	Nº URM	Modo da preservação do holótipo e local	Data da incorporação
<i>Backusella paraconstricta</i>	95258	Lâmina montada em PVLG/ Herbário URM	02/03/2023
<i>Cunninghamella</i> sp. 1	8557h	Liofilização/Micoteca URM	02/08/2023

Fonte: A autora (2023).

Tabela 8. Sequências das as regiões ITS e/ou LSU do rDNA depositadas no Genbank.

Espécie	ITS	LSU	Motivo
<i>Backusella paraconstricta</i>	OQ625517	OQ625516	Espécie nova
<i>Backusella constricta</i>	OQ354764	-	Utilização da sequência em artigo
<i>Cunninghamella</i> sp. 1	Ainda não depositada	Ainda não depositada	Espécie nova
<i>Mucor ardhaengiktus</i>	OQ034611	OQ034577	Primeira ocorrência

Fonte: A autora (2023).

5 RESULTADOS

5.1 FUNGOS MUCORÁCEOS NO SOLO DOS BREJOS DE JENIPAPO E BREJÃO

Dos dois brejos visitados, foram isolados 312 espécimes de fungos mucoráceos, pertencentes a 35 espécies e duas variedades, distribuídas entre *Absidia*, *Backusella*, *Cunninghamella*, *Gongronella*, *Mucor* e *Rhizopus*. Do brejo altitude de Brejão, 25 espécies e uma variedade foram registradas ($1,9 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ de solo), distribuídas entre *Absidia*, *Backusella*, *Cunninghamella*, *Gongronella*, *Mucor* e *Rhizopus*. *Mucor* exibiu maior riqueza, com 12 espécies isoladas, seguido por *Absidia* (6), *Cunninghamella* (3), *Backusella* (2), *Gongronella* (2) e *Rhizopus* (1). *Cunninghamella bertholletiae* foi a espécie com maior abundância absoluta ($3,0 \times 10^3$ UFC.g⁻¹ de solo), seguida por *Absidia saloaensis* ($2,0 \times 10^3$) e *A. pernambucoensis* ($1,8 \times 10^3$) (Tabela 10).

No brejo de Jenipapo, foram identificadas 29 espécies e duas variedades de fungos mucoráceos ($1,34 \times 10^4$ UFC.g⁻¹ de solo) distribuídas entre *Absidia*, *Backusella*, *Cunninghamella*, *Gongronella*, *Mucor* e *Rhizopus*. A maior riqueza de espécies foi observada para o gênero *Mucor*, com 13 espécies, seguido por *Absidia* (5), *Backusella* (4), *Cunninghamella* (4), *Rhizopus* (2) e *Gongronella* (1). A maior abundância absoluta foi observada para *C. bertholletiae* ($3,6 \times 10^3$ UFC.g⁻¹), seguida por *A. saloaensis* ($2,2 \times 10^3$), *A. pernambucoensis* ($2,2 \times 10^3$) e *M. circinelloides* ($1,4 \times 10^3$) (Tabela 9).

Tabela 9. Unidades formadoras de colônia por grama de solo (UFC.g⁻¹) de fungos mucoráceos nos brejos de altitude de Jenipapo e Brejão, Pernambuco.

Espécies	Brejão	Jenipapo	Total
<i>Absidia</i> sp. 1	2×10^2	-	2×10^2
<i>A. aguabelensis</i>	6×10^2	1×10^3	$1,6 \times 10^3$
<i>A. cornuta</i>	1×10^3	$1,2 \times 10^3$	$2,2 \times 10^3$
<i>A. saloaensis</i>	2×10^3	$2,2 \times 10^3$	$4,2 \times 10^3$
<i>A. pernambucoensis</i>	$1,8 \times 10^3$	$2,2 \times 10^3$	4×10^3
<i>A. variicolumellata</i>	1×10^3	4×10^2	$1,4 \times 10^3$
<i>Backusella paraconstricta</i>	-	2×10^2	2×10^2
<i>B. constricta</i>	1×10^3	8×10^2	$1,8 \times 10^3$
<i>B. locustae</i>	-	2×10^2	2×10^2
<i>B. lamprospora</i>	8×10^2	1×10^3	$1,8 \times 10^3$

<i>Cunninghamella</i> sp. 1	-	2×10^2	2×10^2
<i>C. bertholletiae</i>	3×10^3	$3,6 \times 10^3$	$6,6 \times 10^3$
<i>C. elegans</i>	$1,4 \times 10^3$	8×10^2	$2,2 \times 10^3$
<i>C. echinulata</i> var. <i>echinulata</i>	6×10^2	1×10^3	$1,6 \times 10^3$
<i>Gongronella butleri</i>	2×10^2	$1,4 \times 10^3$	$1,6 \times 10^3$
<i>G. brasiliensis</i>	2×10^2	-	2×10^2
<i>Mucor</i> sp.1	4×10^2	-	4×10^2
<i>M. ardhlaengiktus</i>	-	4×10^2	4×10^2
<i>M. circinatus</i>	6×10^2	-	6×10^2
<i>M. circinelloides</i>	-	$1,4 \times 10^3$	$1,4 \times 10^3$
<i>M. fragilis</i>	-	2×10^2	2×10^2
<i>M. griseocyanus</i>	-	2×10^2	2×10^2
<i>M. hiemalis</i>	4×10^2	-	4×10^2
<i>M. lusitanicus</i>	6×10^2	4×10^2	1×10^3
<i>M. merdicola</i>	4×10^2	1×10^3	$1,4 \times 10^3$
<i>M. minutus</i>	-	4×10^2	$4,0 \times 10^2$
<i>M. pernambucoensis</i>	2×10^2	-	2×10^2
<i>M. pseudocircinelloides</i>	6×10^2	1×10^3	$1,6 \times 10^3$
<i>M. pseudolusitanicus</i>	6×10^2	1×10^3	$1,6 \times 10^3$
<i>M. racemosus</i>	-	2×10^2	2×10^2
<i>M. souzae</i>	2×10^2	8×10^2	1×10^3
<i>M. subtilissimus</i>	4×10^2	$1,2 \times 10^3$	$1,6 \times 10^3$
<i>M. variicolumellatus</i>	4×10^2	1×10^3	$1,4 \times 10^3$
<i>Rhizopus stolonifer</i>	2×10^2	6×10^2	8×10^2
<i>R. arrhizus</i> var. <i>arrhizus</i>	-	4×10^2	4×10^2
Total (UFC.g⁻¹)	$1,90 \times 10^4$	$1,34 \times 10^4$	$3,24 \times 10^4$
Riqueza de espécies e variedades	25	29	

Legenda: (-) ausente.

Fonte: A autora (2023).

No brejo de altitude Brejão, *C. bertholletiae* (F.O = 15%) foi a espécie mais frequente, seguida por *A. saloensis* (10%), *A. pernambucoensis* (9%) e *C. elegans* (7%), sendo essas muito frequentes. No Brejo de altitude de Jenipapo, *C. bertholletiae* (18%), *A. saloensis* (11%) e *A. pernambucoensis* (11%) foram muito frequentes (Tabela 10).

Tabela 10. Frequência de ocorrência (%) dos fungos mucoráceos no solo dos brejos de altitude de Jenipapo e Brejão, Pernambuco.

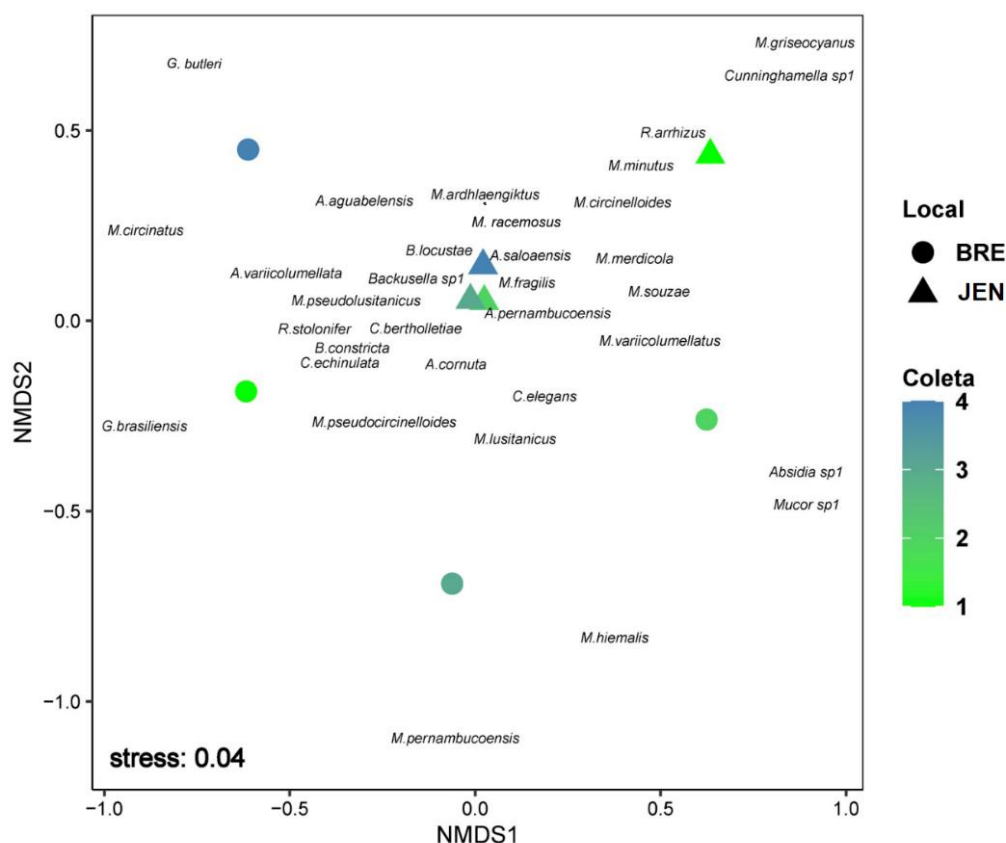
Espécies de Mucorales	Brejão	Classificação	Jenipapo	Classificação
<i>Absidia</i> sp.1	1%	Pouco frequente	-	-
<i>A. aguabelensis</i>	3%	Pouco frequente	5%	Pouco frequente
<i>A. cornuta</i>	5%	Pouco frequente	6%	Frequente
<i>A. saloaensis</i>	10%	Frequente	11%	Muito frequente
<i>A. pernambucoensis</i>	9%	Frequente	11%	Muito frequente
<i>A. varicolumellata</i>	5%	Pouco frequente	2%	Pouco frequente
<i>Backusella</i> sp. 1	-	-	1%	Pouco frequente
<i>B. constricta</i>	5%	Pouco frequente	4%	Pouco frequente
<i>B. locustae</i>	-	-	1%	Pouco frequente
<i>B. lamprospora</i>	4%	Pouco frequente	5%	Pouco frequente
<i>Cunninghamella</i> sp. 1	-	-	1%	Pouco frequente
<i>C. bertholletiae</i>	15%	Muito frequente	18%	Muito frequente
<i>C. elegans</i>	7%	Frequente	4%	Pouco frequente
<i>C. echinullata</i> var. <i>echinullata</i>	3%	Pouco frequente	5%	Pouco frequente
<i>Gongronella butleri</i>	1%	Pouco frequente	7%	Frequente
<i>G. brasiliensis</i>	1%	Pouco frequente	-	-
<i>Mucor</i> sp.1	2%	Pouco frequente	-	-
<i>M. ardhlaengiktus</i>	-	-	2%	Pouco frequente
<i>M. circinatus</i>	3%	Pouco frequente	-	-
<i>M. circinelloides</i>	-	-	7%	Frequente
<i>M. fragilis</i>	-	-	1%	Pouco frequente
<i>M. griseocyanus</i>	-	-	1%	Pouco frequente
<i>M. hiemalis</i>	2%	Pouco frequente	-	-
<i>M. lusitanicus</i>	3%	Pouco frequente	2%	Pouco frequente
<i>M. merdicola</i>	2%	Pouco frequente	5%	Pouco frequente
<i>M. minutus</i>	-	-	2%	Pouco frequente
<i>M. pernambucoensis</i>	1%	Pouco frequente	-	-
<i>M. pseudocircinelloides</i>	3%	Pouco frequente	5%	Pouco frequente
<i>M. pseudolusitanicus</i>	3%	Pouco frequente	5%	Pouco frequente
<i>M. racemosus</i>	-	-	1%	Pouco frequente
<i>M. souzae</i>	2%	Pouco frequente	4%	Pouco frequente
<i>M. subtilissimus</i>	2%	Pouco frequente	6%	Frequente
<i>M. variicolumellatus</i>	2%	Pouco frequente	5%	Pouco frequente
<i>Rhizopus stolonifer</i>	1%	Pouco frequente	2%	Pouco frequente
<i>R. arrhizus</i> var. <i>arrhizus</i>	-	-	3%	Pouco frequente

Legenda: (-) não ocorreu a espécie no respectivo brejo de altitude; Muito frequente (>10 %), frequente (5-10 %), pouco frequente, ($\geq 1 < 5$ %) e rara (<1 %) (HYDE & SARMA, 2001).

Fonte: A autora (2023).

No que se refere à análise do escalonamento multidimensional não-métrico (NMDs), observou-se diferenças na estrutura das comunidades de fungos mucoráceos identificados entre os dois brejos de altitude, bem como entre os períodos de coleta. As 33 espécies mais contrastantes foram plotadas (Figura 7). No brejo de Jenipapo, os solos das coletas 2, 3 e 4 exibiram certa semelhança, quanto às comunidades de fungos mucoráceos, sendo a coleta 1 a que mais se diferenciou. No brejo de Brejão, as comunidades de fungos de todas coletas foram diferentes (Figura 7).

Figura 7. Análise da estrutura das comunidades de fungos mucoráceos no solo dos brejos de altitude das Brejão e Jenipapo, Pernambuco, em quatro épocas diferentes. A ordenação multivariada utilizada foi o escalonamento multidimensional não-métrico (NMDs) utilizando a distância de Jaccard sobre a matriz de presença e ausência de fungos contabilizados em placas de Petri.

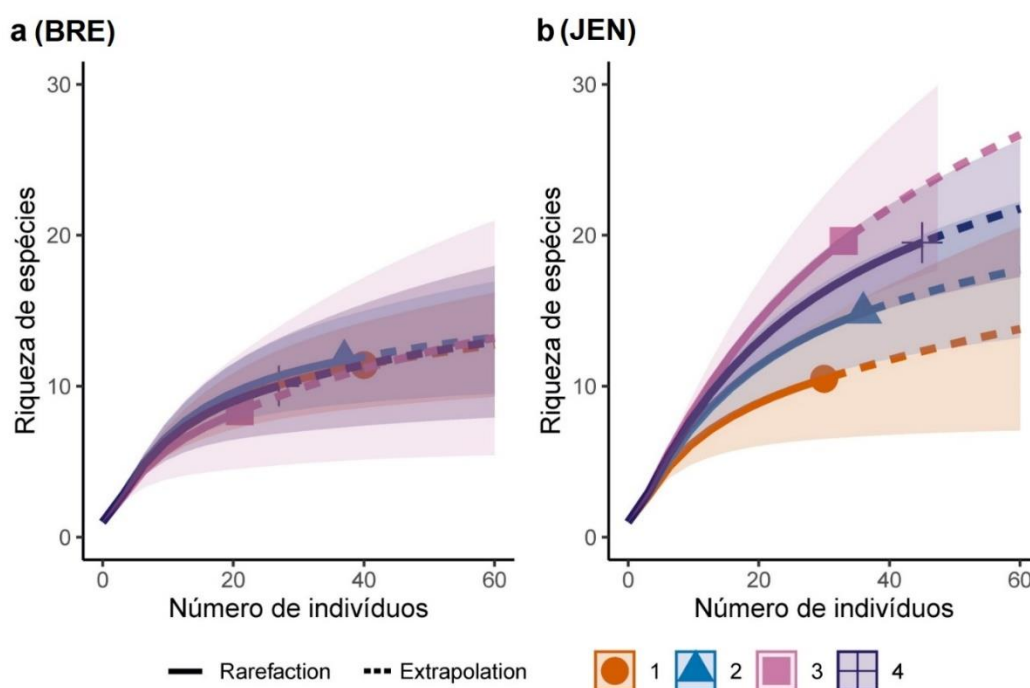


Legenda: BRE=Brejão; JEN=Jenipapo.

Fonte: A autora (2023).

A figura 8, quanto à extrapolação, mostrou que a riqueza observada foi menor do que a esperada, em todas as expedições realizadas, em ambos os brejos, o que foi mais perceptível no brejo do Jenipapo (figura 8b).

Figura 8. Riquezas observadas e extrapolações para espécies de fungos mucoráceos encontrados em diferentes expedições (coletas), nos brejos de altitude de Brejão (a) e Jenipapo (b). Linhas contínuas representam a curva ajustada e a pontilhada indica a extrapolação da riqueza para o caso em que o número de indivíduos coletados supera o observado.

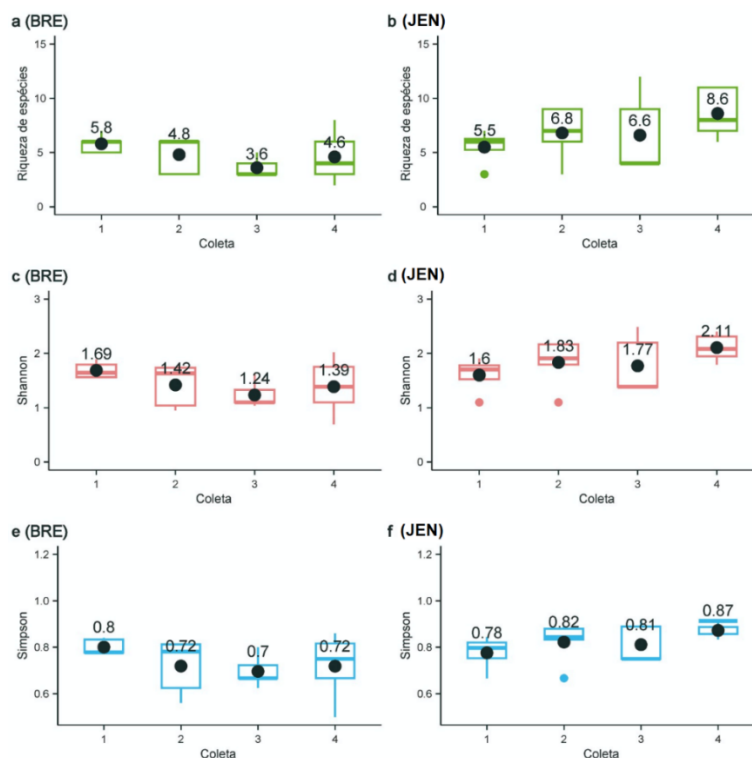


Legenda: BRE=Brejão; JEN=Jenipapo.

Fonte: A autora (2023).

Quanto aos índices de diversidade de Shannon-Wiener, de Simpson e a riqueza de espécies, não houve diferenças significativas, nem entre as coletas dentro de um mesmo brejo, nem entre os brejos (Figura 9).

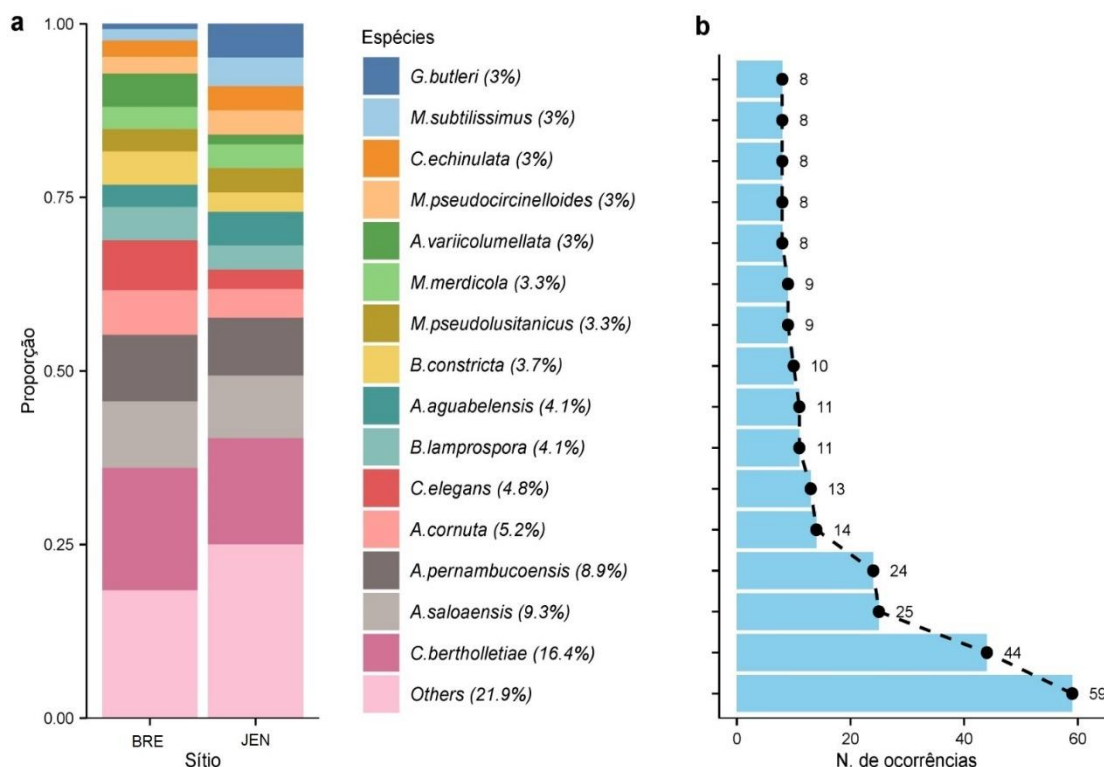
Figura 9. Dispersões dos índices de diversidade para a composição de fungos mucoráceos no solo de dois brejos de altitude inventariados. a-b) Riqueza de espécies dos fungos mucoráceos em cada coleta, por brejo de altitude. c-d) índice de diversidade de Shannon-Wiener; e-f) índice de diversidade de Simpson.



Legenda: BRE=Brejão; JEN=Jenipapo.
Fonte: A autora (2023).

De acordo com a figura 10a, *C. bertholletiae* é a espécie mais abundante no solo dos dois brejos de altitude, seguida por *Absidia saloaensis* e *A. pernambucoensis*. As espécies menos abundantes foram *G. butleri* (3%), *M. subtilissimus* (3%), *C. echinulata* (3%), *M. pseudocircinelloides* (3%) e *A. variicolumelatta* (3%). Com relação à figura 10b, as maiores ocorrências também foram verificadas para *C. bertholletiae*, *Absidia saloaensis* e *A. pernambucoensis*.

Figura 10. a) Composição relativa das espécies dos fungos mucoráceos mais contrastantes no solo dos brejos de altitude Brejão e Jenipapo, Pernambuco. b) Número de ocorrência das espécies mais contrastantes no total das placas das amostras.



Legenda: BRE = Brejão; JEN = Jenipapo. a. Através de paleta de cores foram identificadas as 15 espécies mais abundantes apresentadas em ordem crescente (de cima para baixo). As espécies remanescentes foram contabilizadas no cluster denominado “Others”. b. O gráfico de barras apresenta as espécies mais ocorrentes em ordem crescente (de cima para baixo).

Fonte: A autora (2023).

A análise de associação monotônica (Figura 11) exhibe o nível de correlação entre as variáveis químicas presentes no solo dos brejos de Brejão e Jenipapo e as espécies dos fungos mucoráceos inventariadas. Foi observado que todas as variáveis químicas analisadas apresentaram alguma correlação, seja positiva ou negativa, com uma ou mais espécies de fungos mucoráceos identificadas nos brejos.

No que refere à correlação positiva, o fósforo (P), seguido da saturação por bases (v%), foram os atributos do solo que apresentaram maior número de correlações com os fungos mucoráceos, tendo sido mais fortemente positivamente correlacionados (quadrados marrons com os percentuais indicados) com *M. ardhlaengiktus*, *M. subtilissimus*, *Gongronella butleri*, *Backusella locustae* e *Rhizopus arrhizus*. *Gongronella butleri* é a espécie que parece ser fortemente influenciada positivamente por um maior número de variáveis químicas, já que foi correlacionada com v%, P, Ca e com a soma das bases (SB), entretanto *M. racemosus* foi a espécie que mais se correlacionou positivamente leve com as variáveis, chegando a se correlacionar com P, Ca, SB, CTC e Mg (Figura 11).

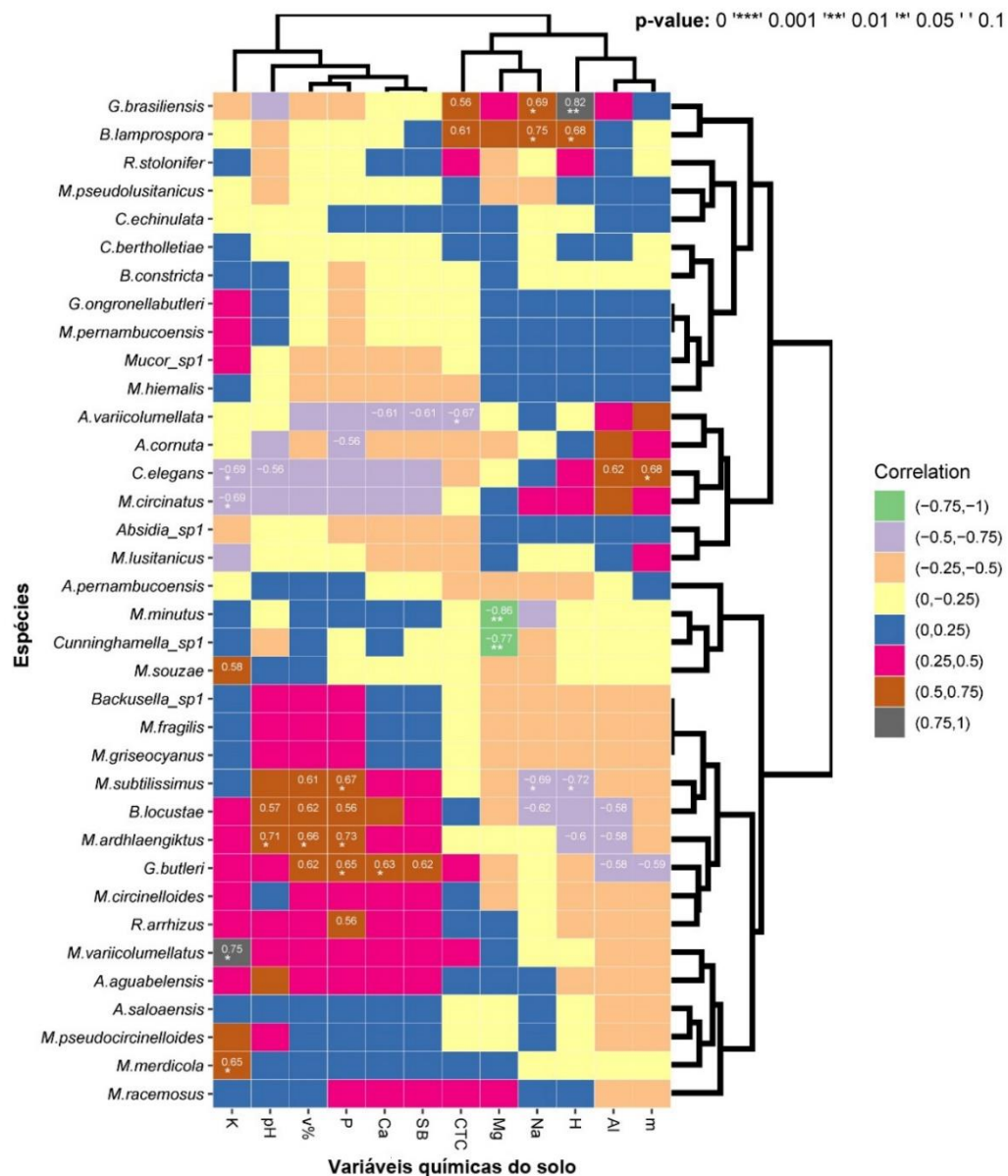
No que se refere às correlações negativas, o Al e m% foram os atributos do solo que mais negativamente se correlacionaram (quadrados lilases, cremes e amarelos com os percentuais indicados) o Al com o maior número de espécies de fungos mucoráceos mais fortemente negativamente (*G. butleri*, *B. locustae* e *M. ardhlaengiktus*), seguido do K (*M. circinatus* e *Cunninghamella elegans*), Mg (*M. minutus* e *Cunninghamella* sp.1), Na (*M. subtilissimus* e *B. locustae*) e H (*M. subtilissimus* e *M. ardhlaengiktus*). A espécie que se correlacionou negativamente (com mais força) com o maior número de variáveis químicas foi *Absidia variicolumellata* (Ca, SB e CTC) (Figura 11).

O potássio (K) parece influenciar positivamente o maior número de espécies (25), sendo mais fortemente correlacionado com *M. variicolumellatus*, *M. merdicola* e *M. souzae*, e negativamente com *M. circinatus* e *C. elegans*. O pH se correlacionou positivamente, com mais intensidade, com *Backusella locustae* e *M. ardhlaengiktus* e negativamente, com maior intensidade, com *C. elegans*. A saturação por bases (v%) se correlacionou positivamente com 19 espécies, sendo essa correlação mais intensa com *G. butleri*, *B. locustae*, *M. subtilissimus* e *M. ardhlaengiktus* (Figura 11).

O cálcio (Ca) e soma das bases (SB) influenciaram positivamente com *G. butleri* e negativamente com *A. variicolumellata*. A capacidade de troca catiônica (CTC) se correlacionou positivamente com *G. brasiliensis* e *B. lamprospora*, e negativamente com *A. variicolumellata*. O magnésio (Mg) exerce influência negativa sobre *M. minutus* e *Cunninghamella* sp1, enquanto o sódio (Na) influencia negativamente com *M. minutus* e *M. subtilissimus* e positivamente *G. brasiliensis* e *B. lamprospora*.

As espécies que mais apresentaram correlação com as variáveis químicas foram *G. butleri* (6 variáveis), *M. ardhlaengiktus* (5) e *B. locustae* (5) e 21 espécies não apresentaram correlações fortemente com nenhuma variável química do solo analisadas.

Figura 11. Associações monotônicas entre a ocorrência de espécies de fungos mucoráceos e as variáveis químicas do solo dos brejos de altitude de Brejão e Jenipapo, Pernambuco.



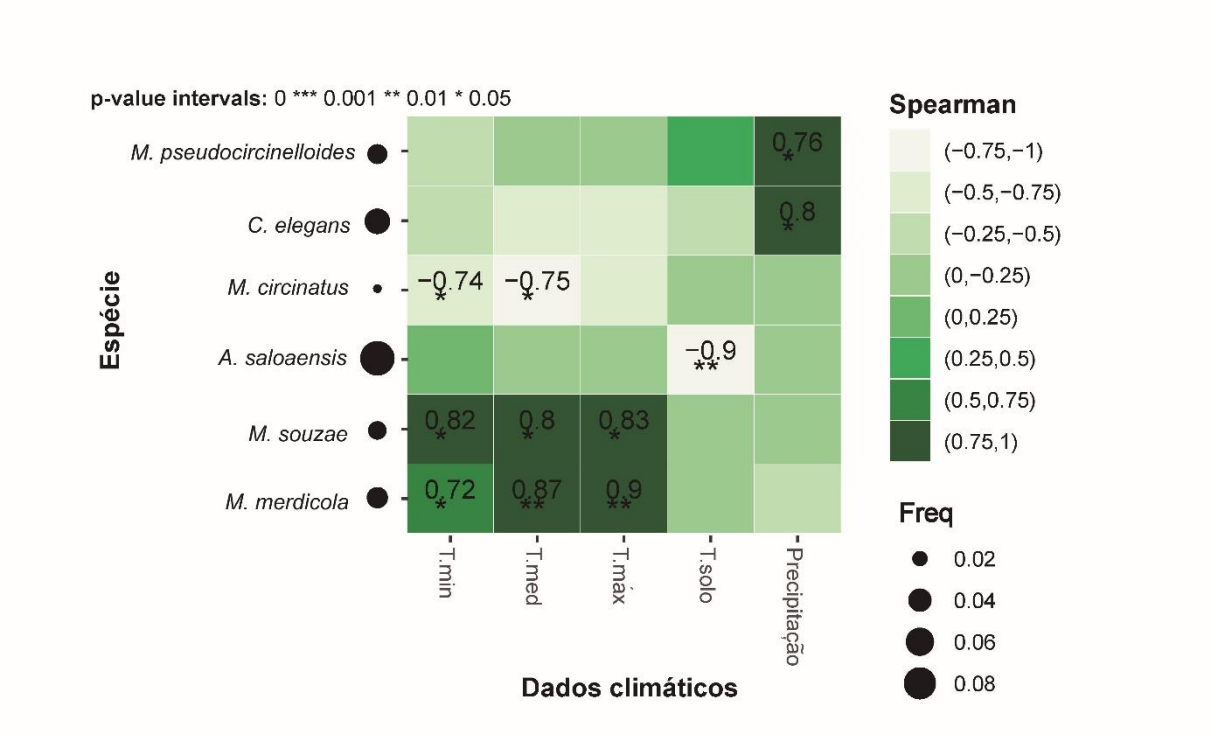
Legenda: As correlações entre variáveis foram representadas por retângulos numa escala de coloração (oito níveis), analisados de acordo com o coeficiente ρ (rho) de Spearman. Foram demonstradas todas as espécies que apresentaram correlação significativa com ao menos uma variável do solo. Os dendrogramas representam a disparidade entre variáveis, usando uma função "find_dend" do pacote "heatmaply" para encontrar a "ótima" ordenação para os dados.

Fonte: A autora (2023).

Nas análises das associações monotônicas os dados gerais de ambos os brejos, *M. souzae* e *M. merdicola* foram influenciados positivamente pela temperatura (temperaturas mínima, média e máxima). *Mucor pseudocircinelloides* e *C. elegans* foram influenciadas positivamente pela precipitação. *Mucor circinatus* foi influenciado negativamente pelas

temperaturas mínima e média e *A. saloaensis* foi influenciada negativamente pela temperatura do solo (Figura 12).

Figura 12. Associações monotônicas entre a ocorrência de espécies de fungos mucoráceos e variáveis climáticas dos brejos de altitude analisados. Correlações das espécies de fungos dos dois brejos analisados com as variáveis climáticas.



Legenda: As correlações entre variáveis foram representadas por retângulos numa escala de coloração discreta (oito níveis), analisados de acordo com o coeficiente ρ (rhô) de Spearman. Apenas foram demonstradas as espécies que apresentaram correlação significativa com ao menos uma variável analisada. Os dendrogramas representam a disparidade entre variáveis, usando uma função "find_dend" do pacote "heatmaply" para encontrar a "ótima" ordenação para os dados. Os círculos fazem referência à frequência relativa das espécies, proporcional ao diâmetro. Freq = Frequência relativa das espécies; T. solo = Temperatura do solo; T. max = Temperatura máxima; T. med = Temperatura média; T. min = Temperatura mínima.
Fonte: A autora (2023).

5.2 TAXONOMIA

Duas espécies novas, *Backusella paraconstricta* (Figuras 13, 14) e *Cunninghamella* sp.1 (Figuras 15, 16), além duas potenciais espécies novas, *Absidia* sp.1 e *Mucor* sp. 1 (cujas análises moleculares ainda estão em andamento), e *Mucor ardhlaengiktus*, que nunca havia sido reportado para a América do Sul, foram isoladas nesse estudo.

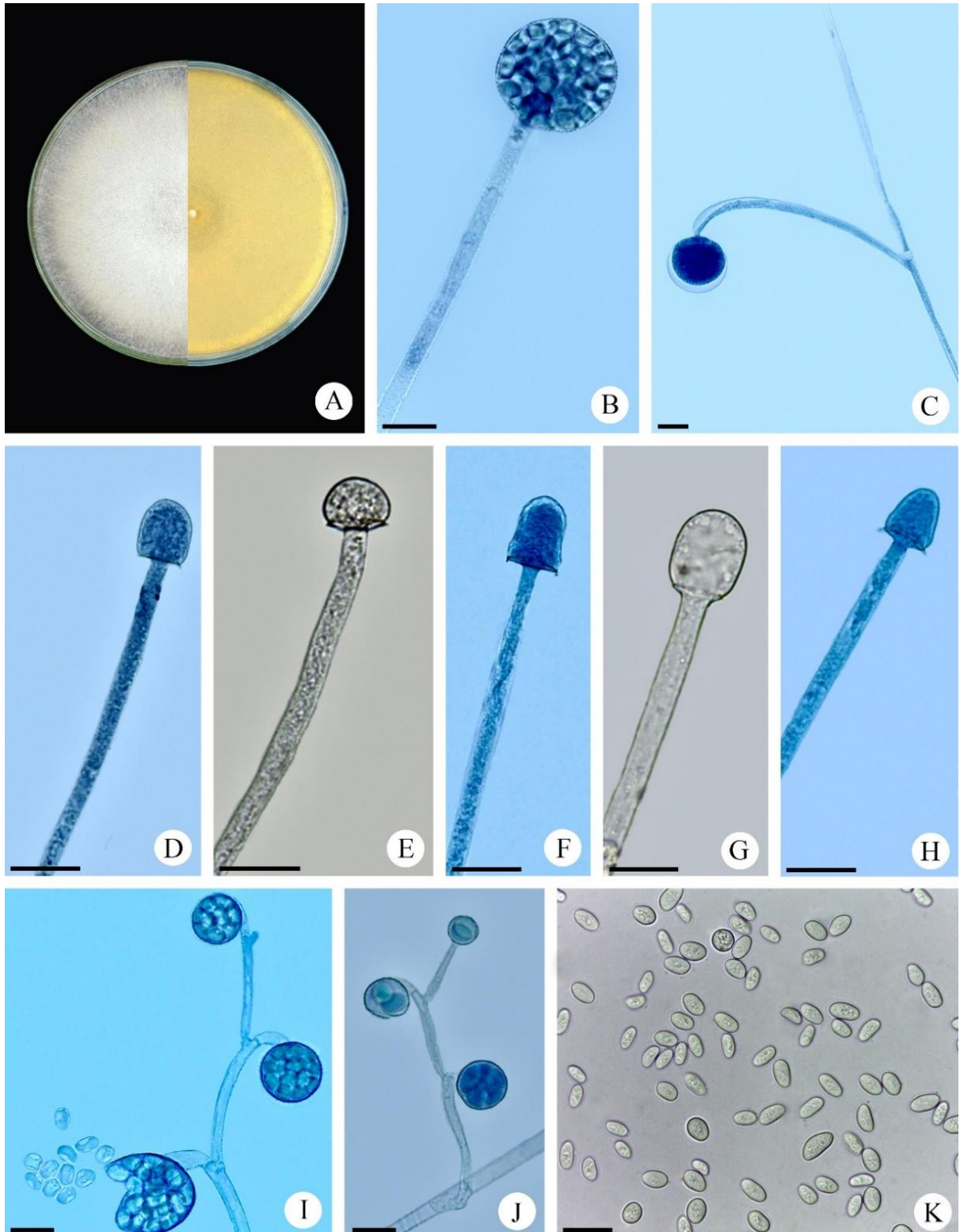
5.2.1 Backusella paraconstricta sp. nov. F.R.S. Santos, T.R.L. Cordeiro, Hyang B. Lee & A.L. Santiago (Figura 13)

Etimologia: referência à proximidade filogenética dessa espécie com *B. constricta*

Descrição: Colônias de crescimento rápido (9 cm de diâm. e 1,5 cm de altura), após 4 dias a 25 °C, em MEA, inicialmente brancas, tornando-se pálidas a cinzas (1-1 B); reverso amarelo (2–8A). Rizoides bem ramificados. Esporóforos longos hialinos, curvos quando jovens e eretos na maturidade, frequentemente simples, raramente simpodialmente ramificados, até três vezes (raramente quatro vezes), com ramos raramente recurvados, até 12 µm em diâm. Esporângios pedicelados laterais não formados nos esporóforos. Esporângios dos esporóforos longos amarelo-acastanhados, globosos, de paredes lisa, com aspecto vítreo, 30–70 µm de diâm. Columelas dos esporângios, cinzas claras, cônicas, subglobosas, raramente aplanadas e muito raramente alongadas à elipsoides ou cilíndricas, 20–35 × 15–35 µm, parede lisa. Algumas das columelas podem apresentar uma leve constrição na base. Esporóforos curtos, não ramificados, ou menos comumente simpodialmente ramificados (até três vezes), portando apenas esporangiólos multiesporados (frequentes) e/ou unisporados (raros), formados próximos ao substrato. Esporangiólos acastanhados, globoso, 15–40 µm de diâmetro, contendo 3–15 esporangiosporos cada, parede persistente e espinhosa. Esporangiólos unisporados globosos, até 20 µm em diâm., minuciosamente espinulosos. Columelas de esporangiólos cônicas a achatadas, subglobosas, alongadas, raramente globosas, hialinas ou acinzentadas, 15–20 × 12–40 µm, parede lisa. Colar evidente. Esporangiosporos hialinos, com conteúdo esverdeado, elipsoides (principalmente), subglobosos, alguns globosos e irregulares, 7–16 (–20) × 4,5–9,5 (–12) µm, de parede lisa. Não foram observados clamidosporos e zigospórangios.

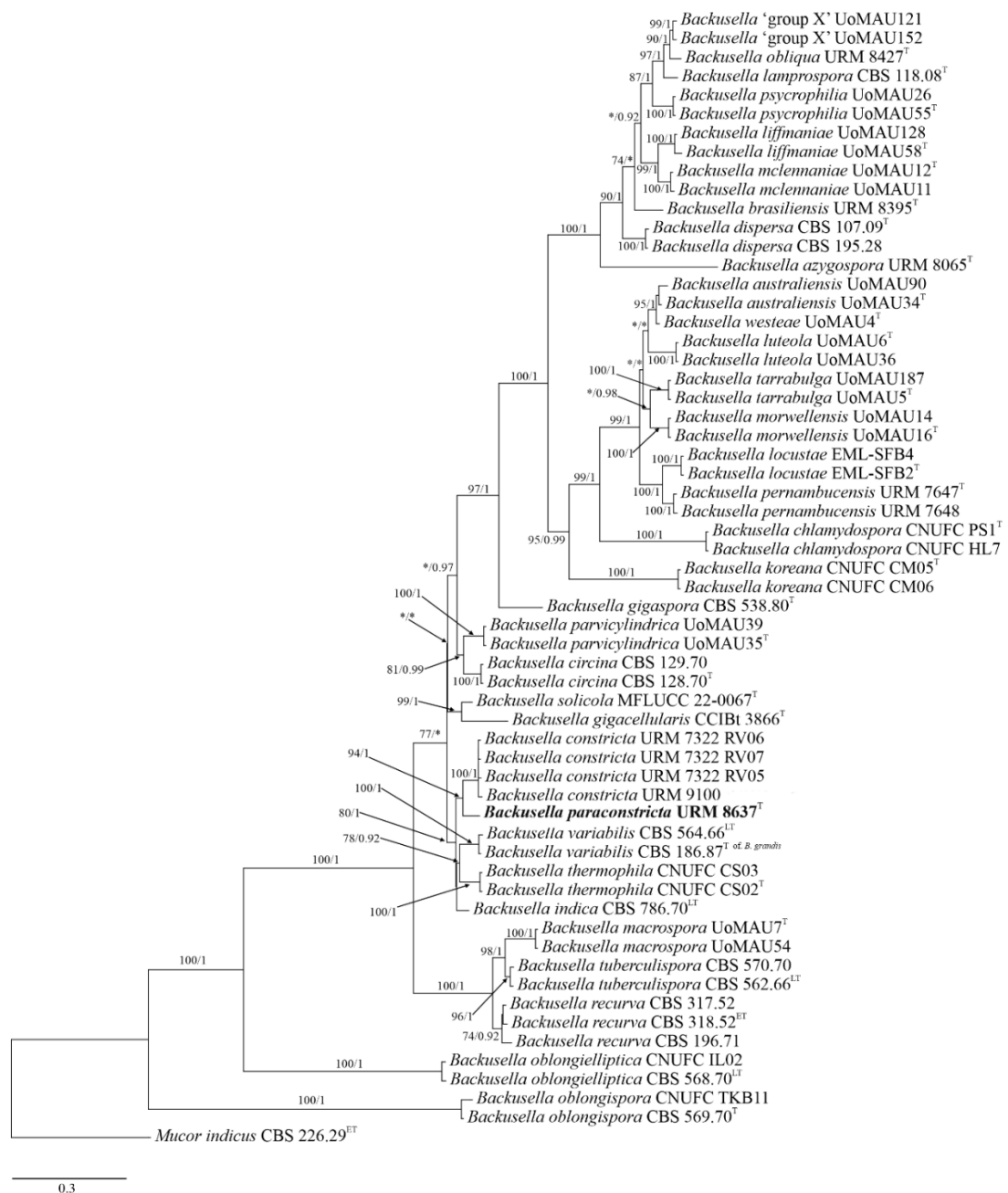
Material examinado: Brasil, Pernambuco; distrito de Jenipapo, município de Sanharó (8°17'08.6" S 36°30'53.9" W), do solo, 12 de abril de 2022, F.R.S. Santos (Holótipo URM 95258; ex-tipo URM 8637). Acessos ao GenBank: OQ625517 (ITS) e OQ625516 (LSU).

Figura 13. *Backusella paraconstricta* (URM 8637) A. Verso da colônia (esquerda) e reverso (direita), em (MEA), a 25 °C. B. Esporangióforo com esporângio. C. Ramificação do esporangióforo com esporângio. D–H. Esporangióforo com columela. I, J. esporangióforo curto com esporângios. K. Esporangiosporos. Barras de escala = 20 µm.



Fonte: A autora (2023).

Figura 14. Árvore filogenética de *Backusella paraconstricta* (URM 8637) e espécies relacionadas inferidas a partir das análises concatenadas das regiões ITS e LSU do rDNA. Os valores de suporte nos ramos representam o suporte bootstrap de máxima verossimilhança e as probabilidades posteriores de inferência bayesiana. Valores de bootstrap inferiores a 70% ou 0,95 são marcados com “*”. A nova espécie está em negrito. *Mucor indicus* CBS 226.29 foi usado como grupo externo. As cepas ex-tipo, ex-epítipo, ex-lectótipo estão marcadas com T, ET e LT, respectivamente.



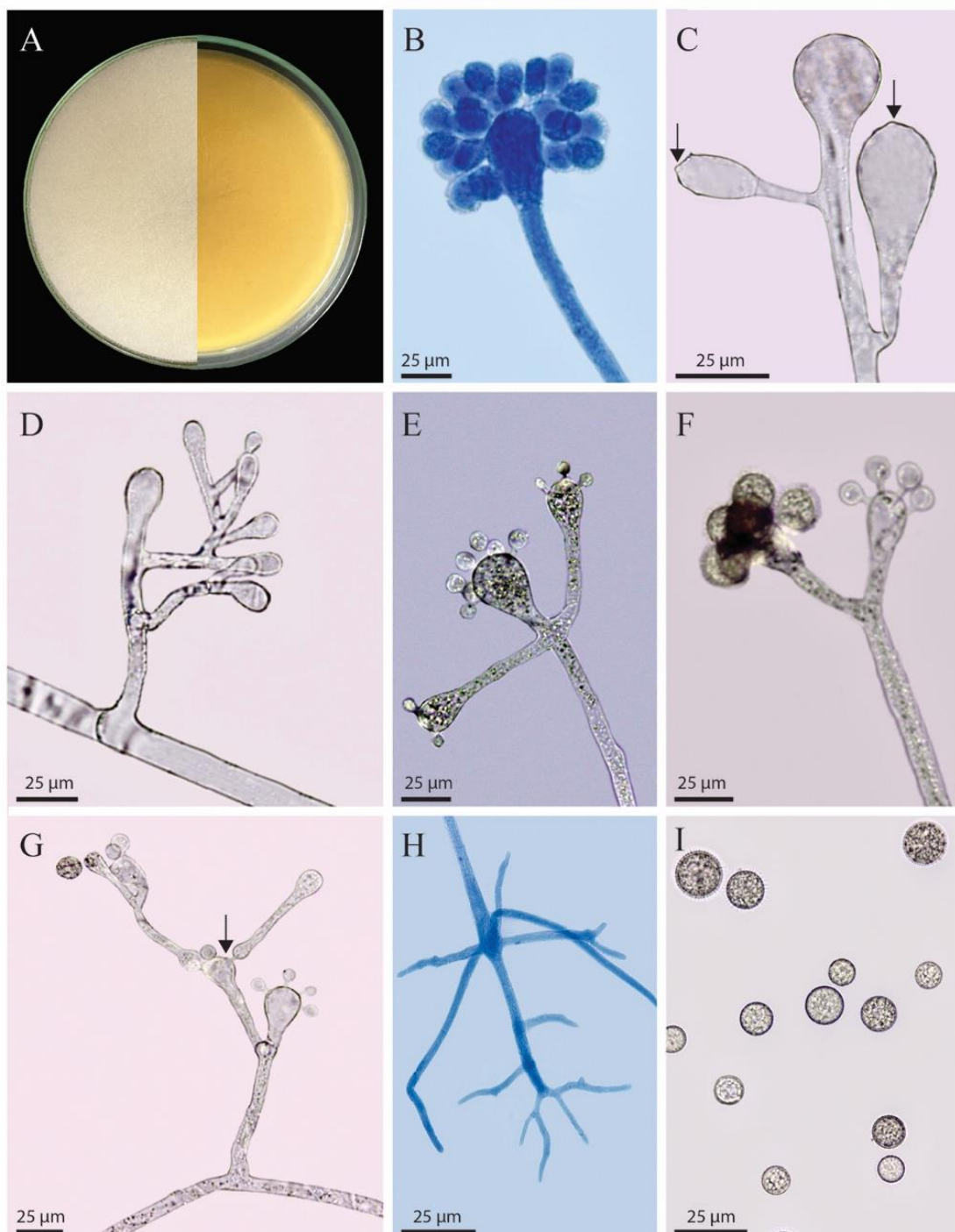
Fonte: A autora (2023).

5.2.2 *Cunninghamella* sp. 1 nov. (Figura 15)

Descrição: Colônia flocosa, branca (3–1A), amarelo reverso (3–8A), com rápido crescimento, tomando toda placa de Petri (9 cm de diâmetro e 1,5 cm de altura) 3 dias, em MEA, a 25°C. Rizoides hialinos, longos e curtos, em forma de raiz ou dedo. Estolões hialinos, até 12 µm em diâm. Esporóforos hialinos, eretos, raramente recurvados, 7–480 (–600) × 2–10 (–12) µm, surgindo de estolões e de hifas aéreas, não ramificadas, ramificados monopodialmente e verticalmente, com parede lisa. Ramificações laterais podem se ramificar sucessivamente até 4 vezes. Ramificações verticiladas são raras com até 3 ramos em um verticilo. O esporóforo principal pode ser bifurcado. Ramificações longas e curtas podem ser observadas em um mesmo esporóforo, e comumente ramificações laterais surgem próximas à vesícula apical. Às vezes, duas ramificações podem surgir do mesmo ponto, nos esporóforos. Alguns esporóforos podem surgir diretamente das vesículas. Vesículas axiais principalmente globosas 15–35 (–40) µm em diâm., algumas subglobosas 24–29 (–36) × 17–29 µm; vesículas laterais em maioria clavadas, levemente anguladas na superfície, algumas subglobose, 12–35 (–50) × 9,5–25 (–30) µm. Pedicelos 2,5–5 µm de comprimento. Vesículas com um a vários pedicelos quebrados ou verrugas em sua superfície, e muitas com pedicelos portando esporângios imaturos são comuns. Esporangíolos hialinos, com conteúdo interno esverdeado, predominantemente globosos, (5–) 7,2–21,5 (–24) µm de diâm., alguns subglobosos 12–14,5 × 14,5–19 µm, unisporados, equinulados. Clamidosporos globosos 12–14,5 (–20) µm. Zigósporos não observados.

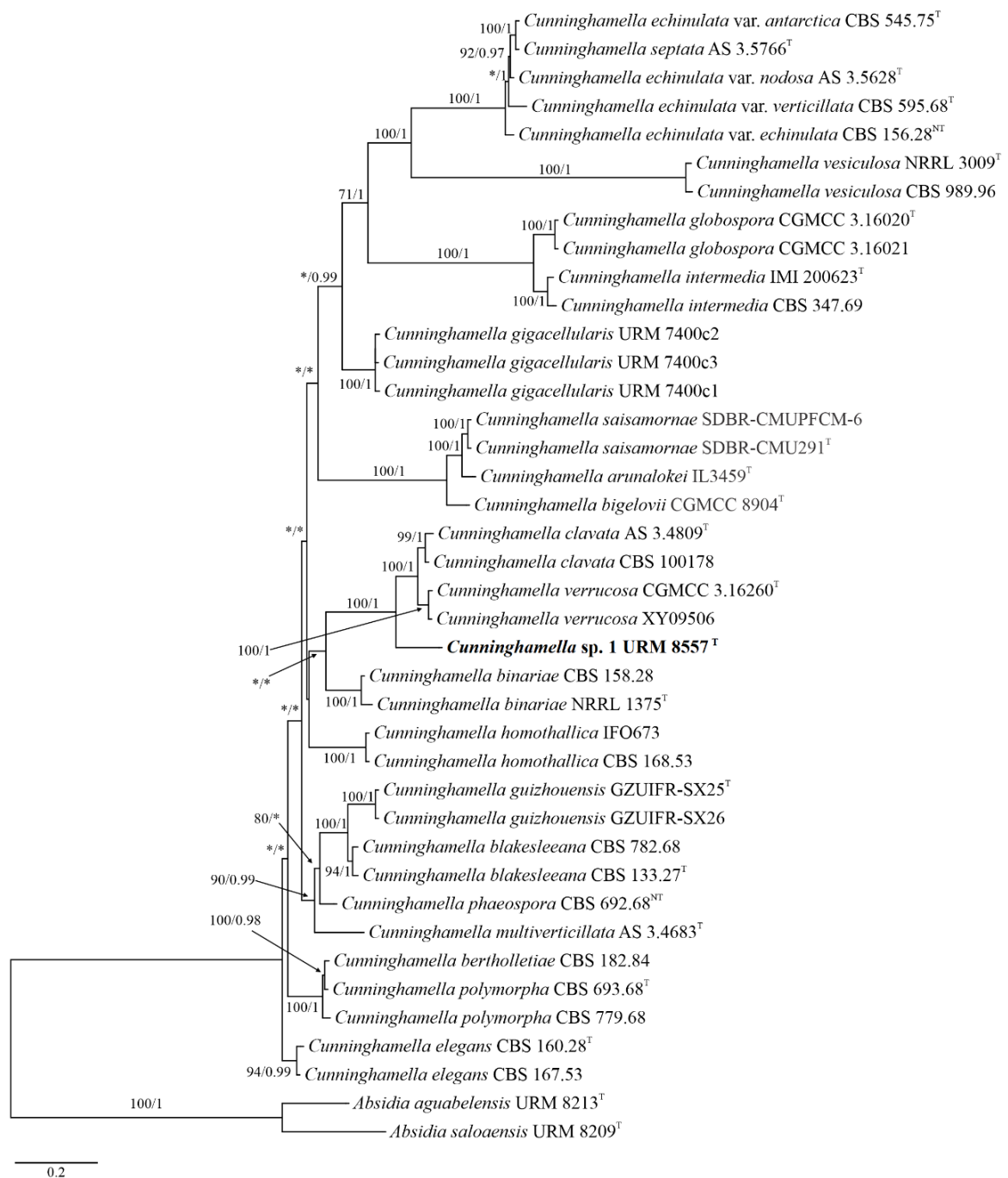
Material examinado: Brasil, Pernambuco; distrito de Jenipapo, município de Sanharó (8°17'08.6" S 36°30'53.9" W), do solo, 12 de setembro de 2021, F.R.S. Santos (Holótipo URM 8557h; ex-tipo URM 8557). GenBank: OR502876 (ITS) e OR502877 (LSU).

Figura 15. *Cunninghamella* sp.1 nov. (URM 8557) A. Verso da colônia (esquerda) e reverso (direita), em MEA a 25 °C, B. Esporóforo não ramificado com esporângios. C. Esporóforo ramificado com vesículas e verrugas (setas) em sua superfície. D. Esporóforo repetidamente ramificado com vesículas. E. Esporóforo ramificado com vesículas e esporângios pedicelados imaturos. F. Esporóforo bifurcado com vesículas e esporângios. G. Esporóforo ramificado com dois esporóforos surgindo diretamente da mesma vesícula (seta). H. Rizoides. I. Esporangíolos. Barras de escala = 25 µm.



Fonte: A autora (2023).

Figura 16. Árvore filogenética de *Cunninghamella* sp. 1. nov. (URM 8557) e espécies relacionadas com base nas sequências combinadas de ITS e LSU rDNA. Valores de suporte são de análises de máxima verossimilhança e inferência bayesiana. Valores de bootstrap inferiores a 70% e 0,95 ou ausentes marcados com “-”. Nova espécie está em negrito *Absidia aguabelensis* URM 8213^T e *Absidia saloensis* URM 8209^T usado como grupo externo. As cepas ex-tipo, ex-epítipo, ex-lectótipo e ex-neótipo são marcadas com T, ET, LT e NT, respectivamente.



5.3 CHAVES DE IDENTIFICAÇÃO

Foram construídas uma chave de identificação para as espécies de *Cunninghamella* conhecidas até agosto de 2023 e uma para as espécies de *Backusella* registradas para as Américas, até essa mesma data.

5.3.1 Chave de identificação de *Cunninghamella* [adaptada de Zheng & Chen (2001)].

1. Homotática, esporóforos simples ou ramificados de um lado, zigósporos com tubérculos.....*C. homothallica*
1. Heterotática, esporóforos geralmente mais ramificados, zigósporos ausentes.....2
2. Colônias canela, rosadas, esporóforos ramificados em ziguezague, com muitos septos.....*C. septata*
2. Colônias não rosadas, esporóforos não ramificados em zigue-zague, sem septos ou com apenas alguns septos.....3
3. Colônias persistentemente brancas.....4
3. Colônias primeiro brancas, depois pigmentadas.....6
4. Vesículas tipicamente infladas na parte inferior (4/5) e estreitas na parte superior (1/5)*C. vesiculosa*
4. Vesículas não infladas.....5
5. Células gigantes não formadas; vesículas geralmente com um a vários pedicelos quebrados ou verrugas sua superfície.....*Cunninghamella* sp. nov.
5. Células gigantes formadas, vesículas sem pedicelos quebrados ou verrugas em sua superfície.....*C. gigacellularis*
6. Esporangiosporos exclusivamente globosos.....7
6. Esporangiosporos não exclusivamente globosos.....11
7. Vesículas clavadas comumente formadas.....8
7. Vesículas clavadas não formadas.....9
8. ramificações dos esporóforos 1–4, em pares, ou 3–4 dispostas pseudoverticiladamente; vesículas sem pedicelos quebrados em sua superfície; esporangiólos 9,5–20 (–27) µm diam.....*C. clavata*
8. Esporóforos geralmente não ramificados, ocasionalmente ramificados de forma simples ou monopodial; vesículas comumente com um a vários pedicelos quebrados em sua superfície; esporangiólos até 15,5 µm diam.....*C. verrucosa*
9. Vesículas globosas a subglobosas, comumente angulares.....*C. intermedia*

9. Vesículas globosas e/ou subglobosas, nunca angulares.....10
10. Colônias acinzentadas; vesículas globosas, esporângios 7,5–9,5 µm diam....*C. arunalokei*
10. Colônias cinza-acastanhadas; vesículas globosas e subglobosas, esporângios 9–15 µm diam.....*C. globospora*
11. Colônias cremes a marrons-cremes ou branco-amareladas.....12
11. Colônias não-cremes a marrons-cremes ou branco-amareladas.....17
12. Colônias com dois tipos de esporóforos (longos e curtos); esporângios escuros gigantes presente em culturas velhas.....13
12. Colônias com apenas um tipo de esporóforo; esporângios escuros gigantes ausente nas culturas velhas.....16
13. Esporóforos tipicamente nodulares; esporângios globosos e ovoides; esporângios gigantes escuros presente após 16 dias; vesículas levemente angulares; pedicelos 4,5–7,5 (–10) µm de comprimento.....*C. echinulata* var. *nodosa*
13. Esporóforos não nodulares; esporângios globoso, ovoides e lacrimoides; esporângios gigantes escuros presente após 5 dias; vesículas não angulares; pedicelos 2–4 (–7,5) µm de comprimento.....14
14. Esporóforos com ou sem vesículas terminais no eixo principal; ramificações tipicamente longas e curtas no mesmo esporóforo e ramificadas repetidamente; esporângios gigantes escuros e relativamente raros a poucos.....*C. echinulata* var. *antarctica*
14. Esporóforos geralmente com uma vesícula terminal no eixo principal; ramificações semelhantes em comprimento, raramente longas e curtas em alguns esporóforos e geralmente não ramificadas repetidamente; esporângios gigantes escuros abundantes.....15
15. Dois tipos de esporóforos comuns; nenhuma ramificação verticilada encontrada nos esporóforos, ramificações primárias dos esporóforos 0–4 (–10) em número, não curtas e compactas; vesículas terminais dos eixos principais globosas a subglobosas, 13–30 (–40) µm diam.....*C. echinulata* var. *echinulata*
15. Dois tipos de esporóforos às vezes encontrados; esporóforos geralmente com muitos verticilos de ramificações verticiladas ou pseudoverticiladas, ramificações primárias dos esporóforos (0)4–15(–25) em número, curtas e compactas; vesículas terminais do eixo principal globosas um tanto depressas, 22–50(–70) µm de diâmetro.....*C. echinulata* var. *verticillata*
16. Temperatura máxima de crescimento a 40°C; clamidosporos formados.....*C. saisamornae*
16. Temperatura máxima de crescimento a 36–38°C; clamidosporos não formados.....*C. blakesleeana*

17. Eixos principais dos esporóforos tipicamente com ramificações longas e curtas no mesmo esporóforo e ramificações repetidas.....18
17. Eixos principais dos esporóforos com ramificações subiguais em comprimento no mesmo esporóforo e não ramificadas repetidamente; algumas ramificações podem apresentar ramificações secundárias.....19
18. Ramificações de esporóforos tipicamente binárias; ramificações estéreis às vezes presentes; vesículas axiais presentes e às vezes com forma irregular; esporangiólos lacrimoides atingindo 32 µm de comprimento.....*C. binariae*
18. Ramificações de esporóforos não binárias; ausência de ramos estéreis; vesículas axiais presentes ou ausentes, geralmente não de forma irregular, quando presentes; esporangiólos lacrimoides até 16 µm de comprimento.....*C. bertholletiae*
19. Colônias cinzas escuros; esporóforos relativamente escassos em comparação com outras espécies, predominantemente simples ou monopodialmente ramificados; ramificações solitárias ou aos pares, muito raramente verticiladas ou pseudo-verticiladas.....*C. phaeospora*
19. Colônias cinzas pálidas, esporóforos não escassos, monopodialmente e comumente verticiladamente ramificados.....20
20. Temperatura máxima de crescimento de 34–36°C; esporangiólos elipsoides, ovoides ou globosos, com ou sem extremidades pontiagudas.....*C. elegans*
20. Temperatura máxima de crescimento igual ou superior a 40°C; esporangiólos globosos, globosos a elipsoides ou globosos a subglobosos, raramente ovoides ou pontiagudos em uma das extremidades.....21
21. Vesículas ovoides, subglobosas, clavadas, irregulares e angulares.....*C. multiverticillata*
21. Vesículas subglobosas a piriformes ou globosas a subglobosas, nunca clavadas, irregulares ou angulares.....22
22. Vesículas subglobosas a piriformes; esporangiólos globosos a elipsoides.....*C. bigelovii*
22. Vesículas globosas a subglobosas; esporangiólos globosos a subglobosos.....*C. guizhouensis*

5.3.2 Chave de identificação para as espécies de *Backusella* encontradas nas Américas

1. Esporangiólos formados.....2
1. Esporangiólos não formados..... *B. oblongielliptica*
2. Esporângios unisporados abundantes.....*B. circina*
2. Esporângios unisporados raros ou não formados.....3
3. Células gigantes formadas.....4
3. Células gigantes não formadas.....6

4. Columelas dos esporângios principalmente hemisféricas, algumas aplanadas ou subglobosas; alguns rizoides emaranhados surgindo de esporóforos e circundando os esporângios.....*B. pernambucensis*
4. Columelas dos esporângios não hemisféricas; rizoides nunca emaranhados circundando o esporângio.....5
5. Columelas dos esporângios elipsoides, cilíndricas, raramente piriformes; clamidosporos ausentes.....*B. gigacellularis*
5. Columelas dos esporângios cônicas (maioria), elipsoides com base truncada, globosas a subglobosas, subglobosas a cônicas, ou raramente, cônicas ou cilíndricas com leve constrição no centro; clamidosporos abundantes.....*B. brasiliensis*
6. Azigosporos formados.....*B. azygospora*
6. Azigosporos não formados.....7
7. Esporangiosporos elipsoides8
7. Esporangiosporos não elipsoides.....10
8. Esporângios nunca maiores do que 70 µm de diâmetro.....*B. paraconstricta*
8. Esporângios comumente maiores do que 70 µm de diâmetro.....9
9. Esporângios com até 150 (–200) µm de diâmetro; esporangiosporos 20–26 × 10–12 µm.....*B. recurva*
9. Esporângios com até 100–125 µm de diâmetro; esporangiosporos 11–15 × 7–9 µm.....*B. variabilis*
10. Esporangiosporos poliédricos irregulares, com protuberâncias.....*B. tuberculispora*
10. Esporangiósporos nunca poliédricos irregulares sem protuberâncias11
11. Esporangióforos formando um esporângio terminal e poucos esporangiólos pedicelados laterais.....*B. lamprospora*
11. Esporangióforos formando um esporângio terminal sem esporangiólos pedicelados laterais.....12
12. Columelas de esporângios com formas variadas, algumas dispostas obliquamente sobre esporangióforos, alguns com um lado mais inchado que o outro; esporangiosporos globosos a subglobosos.....*B. obliqua*
12. Columelas de esporângios cônicas e cilíndricas, às vezes constritas no centro, nunca dispostas obliquamente nos esporangióforos ou com um lado mais inchado que o outro; esporangiosporos subglobosos a amplamente elipsoides, alguns ligeiramente irregulares.....*B. constricta*

6 DISCUSSÃO

6.1 ECOLOGIA DAS COMUNIDADES DE FUNGOS MUCORÁCEOS DOS BREJOS DE ALTITUDE BREJÃO E JENIPAPO

Atualmente, Mucorales abriga o maior número de espécies dentre as três ordens pertencentes ao filo Mucoromycota, com mais de 320 espécies descritas (WIJAYAWARDENE *et al.*, 2022). Os fungos mucoráceos encontram-se globalmente distribuídos, sendo encontrados em diferentes substratos, como no solo, em excrementos de animais (herbívoros e roedores) e alimentos estocados (HOFFMANN *et al.*, 2013; SANTIAGO *et al.*, 2013). Embora sejam conhecidas cerca de 150.000 espécies de fungos, de acordo com HAWKSWORTH & LÜCKING (2017), apenas entre 5 a 10% das espécies desses microrganismos foram catalogadas. Considerando que elevadas diversidade e riqueza de espécies são esperadas para áreas tropicais, parece plausível que a riqueza de fungos conhecida para o Brasil esteja subestimada.

O presente estudo, realizado nos brejos de Brejão e Jenipapo, vem contribuir com informações acerca da ecologia e composição dos fungos mucoráceos nos brejos pernambucanos. Foram estudados, até o presente, 17 brejos de altitude nordestinos, quanto às comunidades de fungos mucoráceos (SANTIAGO *et al.*, 2013; ALVES, 2016; DE LIMA, 2018; DE SOUZA, 2019; ALVES, 2021; LUNDGREN, 2021; CORDEIRO, 2023; DE LIMA, 2023), sendo que alguns brejos foram inventariados mais de uma vez. No entanto, apenas Lundgren (2021), Cordeiro (2023) e de Lima (2023) forneceram dados sobre a influência dos diferentes atributos do solo na estruturação das comunidades de fungos mucoráceos, nos brejos de altitude de Pernambuco.

Nesse estudo, foram isoladas 35 espécies e duas variedades de fungos mucoráceos, riqueza essa maior do que a registrada por Alves (2016, 2021), mas inferior à reportada por Cordeiro (2023) e de Lima (2023). Dentre as espécies identificadas nesse trabalho, *Mucor ardhlaengiktus* está sendo reportada pela primeira vez para a América do Sul (SANTOS *et al.*, 2023). *Mucor minutus* está sendo registrado pela terceira vez em brejo de altitude pernambucano, tendo sido reportado por Alves *et al.* (2021) e Cordeiro (2023), mostrando que, mesmo sendo essa uma espécie rara, a mesma faz parte da comunidade de fungos mucoráceos dos brejos nordestinos.

No presente trabalho, foram isoladas espécies de *Absidia*, *Backusella*, *Cunninghamella*, *Gongronella*, *Mucor* e *Rhizopus*, gêneros esses comumente registrados, não apenas em estudos prévios nos brejos de altitude de Pernambuco (LUNDGREN, 2021;

CORDEIRO, 2023; DE LIMA, 2023), mas em amostras de solo de outros biomas brasileiros (Flora e Funga do Brasil, 2023) e de outros países (VOIGT *et al.*, 2021). Assim como verificado por de Lima (2023), a maior riqueza de espécies observada no presente trabalho foi para o gênero *Mucor*, com 17 espécies, o que pode ser atribuído ao fato desse gênero abrigar o maior número de espécies dentro da ordem Mucorales, com cerca de 92 espécies conhecidas (WIJAYAWARDENE *et al.*, 2022). Esse dado corrobora os achados por de Souza (2019), Alves (2021), Lundgren (2021), Cordeiro (2023) e de Lima (2023) em trabalhos também realizados em brejos de altitude.

Das 35 espécies isoladas nesse estudo, mais da metade foram comuns aos dois brejos de altitude. Esses dados corroboram os de Cordeiro (2023), que também identificou que a maioria das espécies isoladas não foram restritas a um único brejo. A ocorrência em comum de espécies entre os dois brejos indica que muitas espécies de fungos mucoráceos estão bem adaptadas a esse ecossistema, estando presentes em brejos distintos e geograficamente afastados. Tal semelhança pode ser consequência de algumas das características presentes em ambos os brejos de altitude estudados, que são comuns aos brejos de altitude nordestinos em geral, como a vegetação, as baixas temperaturas, altitude superior a 500 m e a uma umidade elevada (RODRIGUES *et al.*, 2008; TENÓRIO *et al.*, 2020).

A análise do escalonamento multidimensional não-métrico (NMDs) mostrou que as comunidades de fungos mucoráceos diferem entre os dois brejos de altitude. Ainda de acordo com essa análise, fica claro que as comunidades de fungos nas amostras de solo das coletas 2, 3 e 4 se organizaram mais próximas ao centro, no brejo de Jenipapo, enquanto as do brejo de Brejão ficaram mais distantes, quase que nas extremidades. Tal resultado indica que a sazonalidade e as propriedades químicas do solo podem influenciar a composição das comunidades de fungos mucoráceos nos brejos estudados, e mesmo dentro de um determinado brejo, como o evidenciado para o brejo de Brejão. Para o brejo de Jenipapo, apenas a comunidade da coleta 1 se diferenciou das demais, o que pode indicar que algum evento sazonal esporádico pode ter ocorrido para o distanciamento da comunidade dessa coleta com relação ao observado para as outras coletas. Com relação às temperaturas aferidas no solo, no momento das coletas, observou-se que elas variaram pouco entre os brejos e entre as coletas. Para o brejo de Jenipapo, a variação máxima entre as coletas foi de 4 °C, e para o de Brejão foi de 2 °C. Considerando que as comunidades praticamente não diferiram dentro do brejo de Jenipapo, parece plausível pensar que essa variável não seja determinante para a composição das comunidades de fungos mucoráceos nas áreas de estudo. No entanto, quando avaliadas as temperaturas médias do ar, percebe-se que elas variaram 7 °C para as coletas realizadas em

Brejão e apenas 1°C em para as realizadas Jenipapo. É, portanto, possível que essa maior variação observada no brejo de Brejão seja um dos fatores responsáveis pelas diferenças nas comunidades observadas nesse brejo.

Cunninghamella bertholletiae, *Absidia saloensis* e *A. pernambucoensis* foram as espécies que apresentaram as maiores abundância absoluta (número de UFC.g⁻¹ de solo), relativa e frequência de ocorrência, em ambos os brejos deste estudo, sendo essas espécies possivelmente as mais bem adaptadas aos brejos aqui estudados. Resultado semelhante foi reportado por de Lima (2023), para os brejos das Serras do Comunaty, Ororubá, Mimoso e de Poção. *Cunninghamella bertholletiae* também foi uma das espécies mais abundantes no estudo de Cordeiro (2023), no brejo da RPPN Reserva Natural Brejo, além de ter sido reportada como a mais abundante por de Souza (2019), nos solos dos brejos da Serra do Bituri e Taquaritinga do Norte, e por de Lima (2018), nos solos dos brejos da Serra do Bonito e no Sítio das Palmeiras.

A riqueza de fungos mucoráceos em cada brejo analisado desse estudo pode ser considerada elevada, em comparação com outros trabalhos em brejos pernambucanos (ALVES, 2016, 2021). Embora tenha sido demonstrado que expedições adicionais poderiam revelar uma riqueza ainda maior do que a encontrada no brejo de Jenipapo, no brejo de Brejão a adição de expedições não faria tanta diferença. Esses resultados corroboram os de Lima (2023), que estudou as comunidades de fungos mucoráceos nos brejos de Serras do Comunaty, Ororubá, Mimoso, e Poção, bem como os de Cordeiro (2023), que estudou esses fungos nos brejos da Serra de Taquaritinga do Norte e da RPPN Reserva Natural Brejo. É importante citar que nem mesmo as diferenças observadas nas médias de concentração em algumas variáveis do solo, como P, Ca, H, SB, v% e m%, contribuíram para que houvesse diferenças de riqueza e diversidade de fungos mucoráceos entre os brejos. A saturação por bases (v%) foi uma das variáveis que se diferenciaram bastante entre os brejos, sendo 32% no brejo de Brejão e 66% no brejo de Jenipapo. Ronquim (2010) cita que a saturação por bases se apresenta como um excelente indicativo das condições gerais de fertilidade do solo. Assim, o solo pode ser categorizado de acordo com a porcentagem da saturação por bases em: solos eutróficos (férteis) = v% ≥ 50% e solos distróficos (pouco férteis) = v% < 50%. Dessa forma, o solo do brejo de Jenipapo se mostrou eutrófico (fértil). Tal resultado indica que os fungos mucoráceos se adaptam bem em solos férteis ou pobres em nutrientes.

Embora o brejo de Jenipapo tenha exibido, em números absolutos, maiores riqueza e diversidade de fungos mucoráceos, com relação ao brejo de Brejão, estatisticamente, ambos os brejos não diferiram quanto a esses parâmetros, dados que corroboram com estudos de de Lima (2023), que também constatou que não houve diferença significativa na diversidade e o número

de espécies entre os brejos que analisou. Curiosamente, existem algumas diferenças mais notáveis entre os dois brejos visitados nesse estudo que merecem destaque: 1- o brejo de Jenipapo apresenta-se preservado e com relevo mais acentuado (maior declive), em comparação com o brejo de Brejão; 2 – algumas propriedades do solo (Ex: P, Ca, H, SB, v% e m%) e as temperaturas do solo e do ar variam entre os dois brejos. Mesmo assim, essas diferenças (antropização, relevo, variáveis do solo e temperaturas) não influenciaram na riqueza e diversidade dos fungos mucoráceos nos dois brejos. Esse resultado reforça os dados demonstrados em outros trabalhos (LIMA, 2018; De SOUZA, 2019; LUNDGREN, 2021; CORDEIRO, 2023), pelo menos no que se refere ao fato de que o tipo de solo não influencia na riqueza e diversidade dos fungos zigospóricos em brejos de altitude pernambucanos.

Gongronella butleri, *M. ardhlaengiktus* e *B. locustae* foram as espécies que apresentaram mais correlações com as propriedades químicas do solo, o que pode indicar uma predileção nutricional de algumas espécies por determinados atributos. Por exemplo, fósforo (P) foi o elemento que apresentou fortes correlações positivas com mais espécies, como *Mucor ardhlaengiktus*, *M. subtilissimus*, *Gongronella butleri*, *Backusella locustae* e *Rhizopus arrhizus*. Lundgren (2021) inferiu em seu trabalho que o P foi uma das variáveis do solo que influenciaram a comunidade de Mucoromycota no solo da RPPN do Benedito e da Serra do Comunaty. Entretanto, assim como o verificado por Cordeiro (2023), os resultados expostos nessa dissertação mostram que as diferentes variáveis químicas do solo parecem influenciar de formas diferentes cada espécie de fungos mucoráceos. Além disso essa autora, bem como de Lima (2023), mostraram que as mesmas espécies podem ser influenciadas de formas diferentes, a depender do ecossistema em que se encontram. Comparando os nossos resultados com os das autoras supracitadas, fica claro que encontrar padrões para entender as influências dessas variáveis nas comunidades de fungos mucoráceos do solo pode ser uma tarefa complicada, senão impossível, muito provavelmente porque essas variáveis atuam de forma conjunta nas comunidades desses fungos. Quando avaliamos as variáveis de forma isolada, parece óbvio que cada uma das variáveis consideradas nesse estudo exibiu alguma correlação com algumas das espécies isoladas, mas, talvez, se as variáveis fossem analisadas em conjunto, teria-se uma melhor visão da influência desses atributos nas comunidades dos fungos mucoráceos com um todo, como foi realizado por Lima *et al.* (2020), para as comunidades de Mucorales em ecossistemas da Mata Atlântica de Pernambuco.

Alguns fatores abióticos como pH, salinidade, temperatura e matéria orgânica podem influenciar a distribuição de microrganismos do solo, como espécies de fungos em um determinado solo (CRUZ *et al.*, 2017). Esse atributo foi positivamente correlacionado com *M.*

ardhlaengiktus, *B. locustae* e *M. subtilissimus*, mostrando que essas espécies provavelmente possuem afinidade com solos levemente ácidos, diferente de *C. elegans*, *A. cornuta* e *M. circinatus* que parecem não exibirem afinidade com solos levemente ácidos. Ambos os brejos apresentaram um pH levemente ácido, sendo o brejo de Jenipapo (pH médio = 5,7) e em Brejão (pH médio = 5,2). Segundo Lima *et al.* (2020), o pH foi o principal atributo edáfico que influenciou a composição, riqueza e abundância das comunidades de fungos mucoráceos em solos da Mata Atlântica, o que não foi observado no presente estudo, já que esse atributo aparentou influenciar apenas algumas espécies.

A correlação de Spearman, mostrou que a precipitação pluviométrica influenciou positivamente a ocorrência de *M. pseudocircinelloides*, enquanto a temperatura influenciou positivamente *M. merdicola* e *M. souzae* e influenciou negativamente *M. circinatus*, demonstrando que *Mucor* parece ser o gênero mais sensível a essa variável, em comparação com outros gêneros de Mucorales. Foi verificado que a temperatura do solo se correlacionou negativamente com *A. saloanesis*, o que também foi observado por Cordeiro (2023), para o brejo de altitude da Reserva Natural Brejo. É importante ressaltar que no presente trabalho não foi possível confirmar a influência da pluviosidade sobre a diversidade e riqueza de espécies de fungos mucoráceos, muito menos sobre a composição das comunidades, uma vez que os níveis de precipitação antes das coletas foram baixos/inexistentes. Entretanto, foi possível detectar a influência pontual da pluviosidade e das temperaturas do solo e do ar em poucas espécies, como observado na Figura 12. No entanto, como as taxas de precipitação foram baixas antes das expedições de coleta, novos estudos são necessários, em ambos os brejos, para que se possa entender a influência dessa variável nas comunidades desses fungos, nessas áreas.

Backusella paraconstricta e *Cunninghamella* sp.1 são espécies novas, com base em características morfológicas e genéticas (regiões ITS e LSU do rDNA). Com relação à *Backusella paraconstricta* URM 8637, nossas análises filogenéticas demonstraram que esta espécie é geneticamente distinta de todas as outras espécies de *Backusella* e está no mesmo clado de *B. constricta*. Essa espécie pertence a um clado maior contendo também *B. variabilis*, *B. thermophila* e *B. indica*. Cordeiro *et al.* (2023) propuseram que a temperatura máxima de crescimento representa uma característica taxonômica válida para diferenciar espécies de *Backusella*. Esses autores identificaram sete espécies de *Backusella* capazes de crescer em temperaturas ≥ 36 °C, quatro das quais (*B. constricta*, *B. variabilis*, *B. thermophila* e *B. indica*.) foram colocados no mesmo clado nas árvores filogenéticas apresentadas por esses autores. Aqui, está sendo descrita uma nova espécie, que cresce a 36 °C, e também pertence a este clado. Isso confirma que a temperatura máxima de crescimento é uma característica filogeneticamente

informativa e relevante para identificação de espécies de *Backusella*. Morfologicamente, *B. paraconstricta* difere de *B. constricta* por formar esporângios menores (até 70 µm de diâmetro), do que os da última espécie (100 µm de diâmetro). *Backusella constricta* forma columelas cônicas (maioria) ou cilíndricas, que podem ser ligeiramente ou fortemente constrictas no centro (LIMA *et al.* 2016), enquanto as columelas de *B. paraconstricta* são principalmente cônicas, subglobosas, raramente aplanadas, e muito raramente alongadas para elipsoides, cilíndricas e com uma ligeira constrição na base. A nova espécie forma predominantemente esporangiosporos elipsoides, embora alguns sejam subglobosos, globosos e irregulares, enquanto *B. constricta* forma apenas esporangiosporos subglobosos a elipsoides e ligeiramente irregulares. Finalmente, *B. paraconstricta* pode crescer em temperaturas de até 36 °C, enquanto *B. constricta* pode crescer até 39 °C.

Cunninghamella sp.1 está sendo proposta como uma nova espécie, com base em características morfológicas e análises filogenéticas. Nossa árvore concatenada ITS e LSU rDNA demonstrou que essa espécie forma um clado irmão ao clado contendo *C. verrucosa* e *C. clavata*. Assim como *C. verrucosa* e *C. clavata*, a nova espécie também forma esporóforos com vesículas clavadas e esporângios globosos. No entanto, algumas diferenças morfológicas são observadas entre essas três espécies.

À primeira vista, *Cunninghamella* sp. 1 parece morfolologicamente semelhante à *C. verrucosa*, pois ambas as espécies formam esporóforos com vesículas com um a vários pedicelos quebrados ou verrugas em sua superfície. No entanto, depois de analisar as duas espécies com mais detalhes, algumas diferenças morfológicas foram bastante evidentes. Em primeiro lugar, a colônia de *Cunninghamella* sp. 1 é persistentemente branca, diferindo de *C. verrucosa*, que se torna cinza com a idade. Em segundo lugar, os esporóforos de *C. verrucosa* e *C. clavata* são não ramificados ou apenas contêm ramificações monopodiais simples, diferindo dos da nova espécie que são simples, monopodialmente, mas também ramificados simpodialmente (até 4 vezes). Em terceiro lugar, as vesículas de *Cunninghamella* sp. 1 são globosas (maioria) ou subglobosas, enquanto *C. verrucosa* forma vesículas geralmente clavadas e ovais, às vezes, subglobosas. Finalmente, *C. verrucosa* forma esporangiólos de até 17,6 µm de diâmetro (WANG *et al.* 2022), menores que os da nova espécie.

Cunninghamella sp. 1 difere de *C. clavata* por formar principalmente vesículas axiais globosas, muitas das quais têm vários pedicelos quebrados ou verrugas em sua superfície, enquanto as vesículas axiais de *C. clavata* são tipicamente clavadas e sem pedicelos quebrados ou verrugas em sua superfície. Além disso, os esporóforos podem se ramificar repetidamente, até sete vezes em *C. clavata*, mas apenas até quatro vezes em *Cunninghamella* sp. 1. Os

esporângios de *C. clavata* são consistentemente globosos e os pedicelos têm até 11 µm de comprimento, enquanto os esporângios da nova espécie são globosos e subglobosos e os pedicelos são mais curtos. Além disso, clamidosporos não são formados em *C. clavata* (ZHENG & CHEN, 2001). Até onde sabemos, essas estruturas de resistência só foram relatadas em *C. saiamornae* (SUWANNARACH *et al.*, 2021).

Nossos dados demonstram que *Cunninghamella* sp. 1 e *B. paraconstricta* são morfolologicamente e geneticamente diferentes das outras espécies, sendo, portanto, novas. Este estudo contribui para o conhecimento da taxonomia e diversidade fungos mucoráceos no Brasil.

7 CONCLUSÕES

- A diversidade e a riqueza de fungos mucoráceos são elevadas no solo dos brejos de altitude de Brejão e de Jenipapo.
- As variáveis químicas do solo, a sazonalidade e as temperaturas do solo e do ar não influenciam a riqueza e diversidade dos fungos mucoráceos, entre os brejos inventariados, mas parecem influenciar a composição de espécies desses fungos, entre os brejos.
- A sazonalidade influencia a composição de espécies de fungos mucoráceos no brejo de altitude de Brejão, enquanto, para o brejo de Jenipapo, essa influência é limitada.
- Poucas espécies de fungos mucoráceos são influenciadas diretamente pelas temperaturas do solo, do ar e pela pluviosidade nos brejos estudados.
- O solo do brejo de altitude de Jenipapo do agreste pernambucano é reservatório para espécies novas de fungos mucoráceos, assim como primeiras ocorrências.
- Os atributos do solo influenciam de formas diferentes cada espécie de fungo mucoráceo.
- *Cunninghamella bertholletiae*, *Absidia saloensis* e *Absidia pernambucoensis* são as espécies com mais frequentes e abundantes nos solos dos brejos de Brejão e brejo de Jenipapo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMČÍK, S.; CAI, L.; CHAKRABORTY, D.; CHEN, X. H.; COTTER, H. V. T.; DAI, D. Q.; HYDE, K. D. Fungal biodiversity profiles 1–10. *Cryptogamie, Mycology*, v. 36, n. 2, p.121-167, 2015.
- ALASMARY, F. A., AWAAD, A. S., ALQAHTANI, S. M., EL-MELIGY, R. M., ABDULLAH, D. A., & ALQASOUMI, S. I. Evaluation of the chemical constituents and potential biological activities of *Cunninghamella blakesleeana*. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 28(10), 1197–1202, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2020.08.009>
- ALASTRUEY-IZQUIERDO, A., HOFFMANN, K., HOOG, G.S.D., RODRIGUEZ-TUDELA, J.L., VOIGT, K., BIBASHI, E., WALTHER, G. Species recognition and clinical relevance of the zygomycetes genus *Lichtheimia* (syn. *Absidia pro part, Mycocladus*). *J Clin Microbiol* 48:2154–2170, 2010.
- ALBERT, Q.; LELEYTER, L.; LEMOINE, M.; HEUTTE, N.; RIOULT, J.; SAGE, L.; BARAUD, F.; GARON, D. Comparison of tolerance and biosorption of three trace metals (Cd, Cu, Pb) by the soil fungus *Absidia cylindrospora*. *Chemosphere*, v. 196, p. 386–392, 2018.
- ALBERT, S.; CAI, L.; CHAKRABORTY, D.; CHEN, X. H.; COTTER, H. V. T.; DAI, D. Q.; HYDE, K. D. Fungal biodiversity profiles 1–10. *Cryptogamie, Mycologie*, v. 36, n. 2, p.121-167, 2015.
- ALCALDE, E.; CERDÁ-OLMEDO, E.; AL-BABILI, S. Apocarotenoids produced from β -carotene by dioxygenases from *Mucor circinelloides*. *Microbiology*, v. 165, n. 4, p. 433-438, 2019.
- ALEXOPOULOS, C. J.; MIMS, C. W.; BLACKWELL, M. *Introductory Mycology*. 4oEdição. New York: John Wiley & Sons, p. 870, 1996.
- ÁLVAREZ, E., CANO, J., STCHIGEL, A.M., SUTTON, D.A., FOTHERGILL, A.W., SALAS, V., RINALDI, M.G., GUARRO, J. Two new species of *Mucor* from clinical samples. *Medical Mycology* 49: 62-72, 2011. <https://doi.org/10.3109/13693786.2010.499521>
- ALVES, A.L.S. M., FREITAS, L.W.S., GURGEL, L.M.S., LEITÃO, J.D.A., CORDEIRO, T.R.L., SANTIAGO, A.L.C.M.A. First occurrence of *Backusella gigacellularis* (Mucorales, Mucoromycota) in a fragment of an Upland Forest within the semi-arid region of northeastern Brazil. *Rodriguésia*, 72, 2021.
- ALVES, A.L.S., DE SOUZA, C.A.F., OLIVEIRA, R.J.V., CORDEIRO, T.R.L., SANTIAGO, A.L.C.M.A. *Cunninghamella clavata* from Brazil: a new record for the western hemisphere. *Mycotaxon* 132: 381–389, 2017.
- ALVES, A.L.S.D.M. Diversidade de Mucorales (Mucoromycotina) em Brejos de Altitude de Pernambuco. Tese de doutorado – Universidade Federal de Pernambuco, Recife. p. 51, 2021.

- ALVES, A.L.S.M. Diversidade de mucorales em solos de brejo de altitude do semiárido de Pernambuco / Ana Lúcia Sabino de Melo Alves. – Recife, 2016. 77 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Biociências. Programa de Pós-graduação em Biologia de Fungos, 2016.
- ANDRADE-LIMA, D. Esboço fitoecológico de alguns “brejos” de Pernambuco. Boletim Técnico. Instituto de Pesquisas Agronômicas de Pernambuco, 8:3-9, 1966.
- ANDRADE-LIMA, D. Estudos fitogeográficos de Pernambuco. Arquivo do Instituto de Pesquisas Agronômicas de Pernambuco 5:305-341, 1960.
- ANDRADE-LIMA, D. Present day forest refuges in Northeastern Brazil. pp. 245-254, in: PRANCE, G.T. (ed.). Biological Diversification in the Tropics. Columbia University Press, New York. 1982.
- ANDRADE-LIMA, D. Tipos de floresta de Pernambuco. Anais da Associação dos Geógrafos Brasileiros 2:69-85, 1961.
- ANGELINI, P.; RUBINI, A.; GIGANTE, D.; REALE, L.; PAGIOTTI, R.; VENANZONI, R. The endophytic fungal communities associated with the leaves and roots of the common reed (*Phragmites australis*) in Lake Trasimeno (Perugia, Italy) in declining and healthy stands. Fungal Ecology, v. 5, p. 683–693, 2012.
- ARAÚJO FILHO, J.C. *et al.* Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco. Recife: Embrapa Solos – UEP Recife; Rio de Janeiro: Embrapa Solos. pp. 252, 2000.
- ARAÚJO, S.M.S. A região semiárida do nordeste do Brasil: Questões Ambientais e Possibilidades de uso Sustentável dos Recursos. Rios Eletrônica – Revista Científica da FASETE, n. 5, p. 89-98, 2011.
- ASHKEZARI, S.J.; FOTOUHIFAR, K. Diversity of endophytic fungi of common yew (*Taxus baccata* L.) in Iran. Mycological Progress, v. 16, p. 247–256, 2017.
- BABU, A. G.; REJA, S. I.; AKHTAR, N.; SULTANA, M.; DEORE, P. S.; ALI, F. I. Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): Current Practices and Outlook. In: Microbial Metabolism of Xenobiotic Compounds. Springer, Singapore, p. 189-216, 2019.
- BAINIER G. Etude sur les Mucorinees. These, Paris, 1882.
- BARBOSA, M.R.V., AGRA, M.F.E., SAMPAIO, V.S.B., CUNHA, J.P., ANDRADE, L.A. Diversidade florística na Mata do Pau-Ferro, Areia, Paraíba. Brejos de Altitude em Pernambuco e Paraíba: história natural, ecologia e conservação. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2004.

- BENJAMIN, R. K. Zygomycetes and their spores. In: Kendrick B (ed.) The Whole Fungus: the Sexual-Asexual Synthesis. National Museums of Canada, Ottawa, Canada, Vol. 2., 1979.
- BENJAMIN, R.K. The merosporangiferous Mucorales. *Aliso*, v. 4 (2), p. 321-433, 1959.
- BENNY G. L., BENJAMIN, R. K. Observations on Thamniaceae (Mucorales). New taxa, new combination, and notes on selected species. *Aliso* 8: 301– 351, 1975.
- BENNY, G. L., BENJAMIN, R. K. Observations on Thamniaceae (Mucorales). II. Chaetocladium, Cokeromyces, Mycotypha, and Phascolomyces. *Aliso* 8: 391–424, 1976.
- BENNY, G.L. Methods used by Dr. R. K. Benjamin, and other mycologists, to isolate Zygomycetes. *Aliso* 26:37-61, 2008.
- BENNY, G.L. Zygomycetes. 2005 Disponível em: <<http://zygomycetes.org/index.php?id=27>>. Acesso em: 07 novembro 2020.
- BENNY, G.L. Zygomycetes. in Benny GL (ed.). Synopsis and Classification of Living Organisms. McGraw - Hill Book Co. Inc., New York. pp 184-195. 1982.
- BENNY, G.L. Zygomycetes. Publicado na Internet em <http://www.zygomycetes.org>. 2009.
- BENNY, G.L., HUMBER, R.A., VOIGT, K. Zygomycetous fungi: phylum Entomophthoromycota and subphyla Kickxellomycotina, Mortierellomycotina, Mucoromycotina, and Zoopagomycotina. In: McLaughlin, D.J., Spatafora, J.W. (eds). *Systematics and Evolution*. The Mycota, Vol. 7A. New York, Springer-Verlag, pp. 209 250, 2014.
- BENNY, G.L., SMITH, M.E., KIRK, P.M., TRETTER, E.D., WHITE, M.M. Challenges and Future Perspectives in the Systematics of Kickxellomycotina, Mortierellomycotina, Mucoromycotina, and Zoopagomycotina. *Fungal Biology*, 65–126, 2016. doi:10.1007/978-3-319-29137-6_5
- BHATTACHARYYA, L.H.; BORAH, G.; PARKASH, V.; BHATTACHARYYA, P.N. Fungal endophytes associated with the ethnomedicinal plant *Meyna spinosa* Roxb. *Current Life Sciences*, v. 3, p. 1–5, 2017.
- BONFANTE, P., & VENICE, F. Mucoromycota: going to the roots of plant-interacting fungi. *Fungal Biology Reviews*, 2020. doi:10.1016/j.fbr.2019.12.003
- CARCELLER, F.; OÑORO, G.; BUITRAGO, M. J.; HERRERO, B.; LASSALETTE, Á., PÉREZ-MARTÍNEZ, A.; MADERO, L. *Cunninghamella bertholletiae* infection in children: review and report of 2 cases with disseminated infection. *Journal of pediatric hematology/oncology*, v. 36, n. 2, p. e109-e114, 2014.
- CARDOSO, K.B.B.; DE SOUZA, B.K.P.A.; BRANDÃO-COSTA, R.M.P.; ALBUQUERQUE, W.W.C.; PORTO, A.L.F. Waste Coffee as an Excellent Substrate for Collagenase Production by Filamentous Fungi *Cunninghamella Phaeospora* and *Absidia Cyindrospora*”. *Acta Scientific Nutritional Health*, v. 14, p. 03–06, 2017.

- CAVALHEIRO, G. F., SANGUINE, I. S., SANTOS, F. R. DA S., COSTA, A. C. DA, FERNANDES, M., PAZ, M. F. DA, ... LEITE, R. S. R. Catalytic Properties of Amylolytic Enzymes Produced by *Gongronella butleri* Using Agroindustrial Residues on Solid-State Fermentation. *BioMed Research International*. 1–8, 2017. doi:10.1155/2017/7507523
- CHA, C.J., DOERGE, D.R., CERNIGLIA, C.E. Biotransformation of malachite green by the fungus *Cunninghamella elegans*. *Applied and Environmental Microbiology*, 67, 4358–60, 2001.
- CIDADE-BRASIL. 2023. Município de Brejão. Disponível em: <https://www.cidade-brasil.com.br/municipio-brejao.html>. Acesso em: 08 de maio de 2023.
- CORDEIRO, T.R.L. Diversidade de Mucoromycota no solo de gradientes de altitude em brejos do semiárido de Pernambuco/ Thalline Raffaella Leite Cordeiro. – Recife, 2023. 127f. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Biociências. Programa de Pós-graduação em Biologia de Fungos, 2023.
- CORDEIRO, T.R.L., DA SILVA, S. B. G., DA CRUZ, M. O., DE LIMA, C. L. F., *et al.* 2022. *Absidia pararepens* Jurjević, M. Kolařík & Hubka (Mucorales, Mucoromycota) was isolated for the first time in South America. *Nova Hedwigia*, 375-387. https://doi.org/10.1127/nova_hedwigia/2022/0682
- CORDEIRO, T.R.L., NGUYEN T.T., LIMA, D.X., SILVA, S.B., LIMA, C.F., LEITÃO, DAR’C, J.D.A., MELO, GURGEL, L.M.S., LEE, H.B., SANTIAGO, A.L.C.M.A. Two new species of the industrially relevant genus *Absidia* (Mucorales) from soil of the Brazilian Atlantic Forest. *Acta Botanica Brasilica* 34(3): 549–558, 2020.
- CORDEIRO, T.R.L., WALTHER G., SOUZA, C.A.F. *et al.* A polyphasic approach to the taxonomy of *Backusella* reveals two new species. *Mycological Progress* 22:16, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11557-023-01864-x>
- CORDEIRO, T.R.L.; WALTHER, G.; LEE, H.B.; NGUYEN, T.T.T.; DE SOUZA, C.A.F.; *et al.* A polyphasic approach to the taxonomy of *Backusella* reveals two new species. *Mycological Progress*, v. 22, n. 16, p. 1–19, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11557-023-01864-x>
- CROUS, P.W., CARNEGIE, A.J., WINGFIELD, M.J., SHARMA, R., MUGHINI, G., NOORDELOOS, M.E., *et al.* Fungal Planet description sheets: 868–950. *Persoonia - Molecular Phylogeny and Evolution of Fungi* 42(1): 291–473, 2019.
- CROUS, P.W., LUANGSA-ARD, J.J., WINGFIELD, M.J., CARNEGIE, A.J., HERNÁNDEZ-RESTREPO, M., *et al.* Fungal Planet description sheets: 785–867. *Persoonia: Molecular Phylogeny and Evolution of Fungi* 41: 238–417, 2018.

- CRUZ, M.O. Aspectos taxonômicos e ecológicos de fungos zigospóricos coprófilos do Recife, PE, Brasil. 2022. Dissertação (Mestrado em Biologia de Fungos) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.
- CRUZ, R.; RAMOS, S.M.S.; FONSECA, J.C.; MOTTA, C.M.S.; MOREIRA, K.A. Anthropization effects on the filamentous fungal Community of the Catimbau National Park. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 41, p. e0160373, 2017.
- DE LIMA, C. L. F. *et al.* *Absidia bonitoensis* (Mucorales, Mucoromycota), a new species isolated from the soil of an upland Atlantic forest in Northeastern Brazil. *Nova Hedwigia*, v. 112, n. 1-2, p. 241-251, 2021.
- DE LIMA, C. L. F., LUNDGREN, J. D. A. A. L., NGUYEN, T. T. T., CORDEIRO, T. R. L., LIMA, D. X., *et al.* Two New Species of *Backusella* (Mucorales, Mucoromycota) from Soil in an Upland Forest in Northeastern Brazil with an Identification Key of *Backusella* from the Americas. *Journal of Fungi*, 8(10): 1038, 2022. <https://doi.org/10.3390/jof8101038>
- DE LIMA, C.L.F. Diversidade de fungos mucoráceos em brejos de altitude de Pernambuco/ Catarina Letícia Ferreira de Lima. – Recife, 2023. 105f. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Biociências. Programa de Pós-graduação em Biologia de Fungos, 2023.
- DE LIMA, C.L.F. Diversidade de Mucorales em duas áreas de brejo de altitude de Pernambuco/ Catarina Letícia Ferreira de Lima. – Recife, 2018. 58 f. Dissertação de (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, PE, Brasil, 2018.
- DE LIMA, C.L.F. Diversidade de Mucorales em duas áreas de brejo de altitude de Pernambuco. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Pernambuco, PE, Brasil. p. 58, 2018.
- DE LIMA, C.L.F., LIMA, D.X., DE SOUZA, C.A.F., DE OLIVEIRA, R.J.V., CAVALCANTI, I.B., GURGEL, L.M.S., SANTIAGO, A.L.C.M. DE A. Description of *Mucor pernambucoensis* (Mucorales, Mucoromycota), a new species isolated from the brazilian upland rainforest. *Phytotaxa*, 350(3), 274, 2018. doi:10.11646/phytotaxa.350.3.6
- DE OLIVEIRA CARVALHO, P. H.; ARRUDA, E. L.; JAPIASSUL, K. B.; DE MELO SOUZA, P. L. II-442-biorremediação do propofol catalisada por *Cunninghamella elegans* ATCC 26169 para tratamento de efluentes. 2019.
- DE OLIVEIRA, R.J.V., BEZERRA, J.L., LIMA, T.E.F., SILVA, G.A., CAVALCANTI, M.A.Q. *Phaeosphaeria nodulispora*, a new endophytic coelomycete isolated from tropical palm (*Cocos nucifera*) in Brazil. *Nova Hedwigia*, 103 (1–2), 185–192, 2016. https://doi.org/10.1127/NOVA_HEDWIGIA/2016/0343

- DE SOUZA, C. A. F. Diversidade de Mucoromyceta em Brejos de altitude de Pernambuco, Brasil, e avaliação de espécimes produtores de proteases coagulantes do leite. Tese de doutorado – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil. p. 153, 2019.
- DE SOUZA, C. A.; VOIGT, K.; GURGEL, L. S.; CORDEIRO, T. R.; OLIVEIRA, R. J.; LIMA, D. X.; SANTIAGO, A. L. D. A. A new species of *Mucor* (Mucoromycotina, Mucorales) isolated from an enclave of Upland Atlantic Forest in the semi-arid region of Brazil. *Phytotaxa*, v. 351, n. 1, p. 53, 2018.
- DE SOUZA, C.A.F., LIMA, D.X., COSTA, D.P., LIMA, C.L.F., MEDEIROS, E.V., SANTIAGO, A.L.C.M.A. *Mucor variicolumellatus* L. Wagner & G. Walther (Mucorales, Mucoromycota): a first record for the Neotropics. *Check List* 16(3): 743–747, 2020.
- DE SOUZA, J.I., MARANO, A.V., PIRES-ZOTTARELLI, C.L.A., CHAMBERGO, F.S., HARAKAVA, R. A new species of *Backusella* (Mucorales) from a Cerrado reserve in Southeast Brazil. *Mycological Progress* 13: 975–980, 2014.
- DE SOUZA, J.I., PIRES-ZOTTARELLI, C.L.A., SANTOS, J.F., COSTA, J.P. Zygomycetes from “Reserva Biológica de Mogi Guaçu”, São Paulo State, Brazil. *Mycotaxon* 116: 303–312, 2011.
- DESIRÒ, A., RIMINGTON, W.R., JACOB, A., POL, N.V., SMITH, M.E., TRAPPE, J.M., BIDARTONDO, M.I., BONITO, G. Multigene phylogeny of Endogonales, an early diverging lineage of fungi associated with plants. *IMA Fungus* 8: 245–257, 2017.
- DOILOM *et al.* Screening of Phosphate-Solubilizing Fungi From Air and Soil in Yunnan, China: Four Novel Species in *Aspergillus*, *Gongronella*, *Penicillium*, and *Talaromyces*. *Frontiers in Microbiology*, v. 11, p. 1–24, 2020.
- DOLATABADI, S., WALTHER, G., VAN DEN ENDE, A.H.G.G., DE HOOG, G.S. 2013. Diversity and delimitation of *Rhizopus microsporus*. *Fungal Diversity* 64: 145–163.
- DOYLE, J.J., DOYLE, J.L. A rapid DNA isolation procedure for small quantities of fresh leaf tissue. *Phytochem Bull*, 19, 11–15, 1987.
- DOYLE, J.J., DOYLE, J.L. Isolation of plant DNA from fresh tissue. *Focus*, 12,13–15, 1990.
- ELKHATEEB, W.A., KOLAIBE, A.G.AL., DABA, G.M. Bioactive metabolites of *Cunninghamella*, Biodiversity to Biotechnology J. Pharmaceutics and Pharmacology Research, 4(3), 2021. doi:10.31579/2693-7247/036
- ELLIS, J. J.; HESSELTINE, C. W. The genus *Absidia*: globose-spored species. *Mycologia*, v. 57, n. 2, p. 222-235, 1965.
- ELLIS, J.J.; HESSELTINE, L.W. A new member of the Mucorales. *Mycologia*, v. 61. p. 863–872, 1969.

- FERREIRA, J.A.; LENNARTSSON, P.R.; EDEBO, L.; TAHERZADEH, M.J. Zygomycetes-based biorefinery: Present status and future prospects. *Bioresource Technology* 135: 523-532, 2013.
- FERIGATTO, J.L., GONÇALVES, I.Z., CASTRO, N.S., LEMOS, L.O., NETO, V.T., LIMA, E.M., VARANDA, R.F., CORACIN, F.L. Mucormicose em região de cabeça e pescoço em uma paciente portadora de leucemia mielóide aguda: um relato e caso. *Hematology, Transfusion and Cell Therapy*, v.43. Issue S1, São Paulo, 2021. doi: 10.1016/j.htct.2021.10.778
- FLORA DO BRASIL. Fungos Mucorales. Domínios fitogeográficos: Cerrado. in: *Flora e Funga do Brasil*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2023. Disponível em: < <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/> >. Acesso em: 06 jun. 2023
- FLORA E FUNGA DO BRASIL. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2023. Recovered of <http://floradobrasil.jbrj.gov.br> (Accessed: 30 May 2023).
- FREITAS, L.W.S., OLIVEIRA, M.O., NGUYEN, T.T., LEE, H.B., DOS SANTOS, F.R.S., SANTIAGO, A.L.C.M.A. *Absidia variicolumellata*, sp. nov., a new mucoralean fungus isolated from Atlantic Forest in Bahia state (Brazil). *Sydowia* 75: 75–89, 2022.
- FREITAS, L.W.S., OLIVEIRA, R.J.V., CORDEIRO, T.R.L., NGUYEN, T.T.T., LIM, H.J., LEE, H.B., SANTIAGO, A.L.C.M.A. *Gongronella pedratalhadensis*, a new species of Mucorales (Mucoromycota) isolated from the Brazilian Atlantic Forest, with an identification key for the genus. *Sydowia* 73: 61–68, 2020.
- FREITAS, M.A., ABEGG, A.D., ARAÚJO, D.S., COELHO, H.E.A., AZEVEDO, W., S., CHAVES, M.F., MOURA, G.J.B. Herpetofauna of five "Brejos de Altitude" of the interior of the state of Pernambuco, Northeastern Brazil. *Herpetology Notes*, v.12, p.591-602, 2019.
- GARCÍA-SEPÚLVEDA, R.; NAVARRETE-SOLÍS, J.; VILLANUEVA-LOZANO, H.; TREVIÑO-RANGEL, R. D. J.; GONZÁLEZ, G. M.; ENRÍQUEZ-ROJAS, J.; ARENAS-GUZMÁN, R. Photoletter to the editor: Atypical primary cutaneous mucormycosis of the scalp. *Journal of dermatological case reports*, v. 11, n. 2, p. 32, 2017.
- GONZÁLEZ-ABAD, M. J.; ALONSO SANZ, M. Zigomicosis en niños: infección diseminada por *Cunninghamella bertholletiae*. *Archivos de bronconeumología: Organo oficial de la Sociedad Española de Neumología y Cirugía Torácica SEPAR y la Asociación Latinoamericana de Tórax (ALAT)*, v. 49, n. 1, p. 35, 2013.
- GUO, J., WANG, H., LIU, D., ZHANG, J.N., ZHAO, Y., LIU, T., XIN, Z. Isolation of *Cunninghamella bigelovii* sp. nov. CGMCC 8094 as a new endophytic oleaginous fungus from *Salicornia bigelovii*. *Mycological Progress* 14: 1–8, 2015.
- HALLUR, V., PRAKASH, H., SABLE, M., PREETAM, C., PURUSHOTHAM, P., SENAPATI, R., SHANKARNARAYAN, S.A., BAG, N.D., RUDRAMURTHY, S.M. *Cunninghamella*

- arunalokei* a New Species of *Cunninghamella* from India Causing Disease in an Immunocompetent Individual. *Journal Fungi*, 7, 670, 2021. <https://doi.org/10.3390/jof7080670>
- HAWKSWORTH DL, LÜKING R. Fungal diversity revisited: 2.2 to 3.8 million species. *Microbiology Spectrum* 5(4): FUNK-0052-2016, 2017.
- HERNÁNDEZ-LAUZARDO, A. N.; BAUTISTA-BAÑOS, S.; VELÁZQUEZ-DEL VALLE, M. G.; TREJO-ESPINO, J. L. Identification of *Rhizopus stolonifer* (Ehrenb.: Fr.) Vuill., causal agent of *Rhizopus* rot disease of fruits and vegetables. *Revista Mexicana de Fitopatología*, v. 24, n. 1, p. 65-69, 2006.
- HESSELTINE, C. W. Zygomycetes in food fermentation. *Mycologist*, v. 5, p. 162-169, 1986.
- HESSELTINE, C. W.; ELLIS, J. J. Species of *Absidia* with ovoid sporangiospores. I. *Mycologia*, v. 58, n. 5, p. 761-785, 1966.
- HESSELTINE, C. W.; ELLIS, J. J. The genus *Absidia*: *Gongronella* and cylindrical-spored species of *Absidia*. *Mycologia*, v. 56, n. 4, p. 568-601, 1964.
- HESSELTINE, C. W.; FENNEL, D. I. The genus *Circinella*. *Mycologia* 7, p. 193-211, 1995.
- HESSELTINE, C. W.; FENNELL, D. I. The genus *Circinella*. *Mycologia*, v. 47, p.193 212, 1955.
- HESSELTINE, C.W., ELLIS, J.J. An interesting species of *Mucor*, *M. ramosissimus*. *Sabouraudia* 3: 151–154, 1964.
- HESSELTINE, C.W., ELLIS, J.J. Notes on Mucorales, especially *Absidia*. *Mycologia* 53: 406–426, 1961.
- HESSELTINE, C.W.; ELLIS, J.J. Mucorales. In.: AINSWORTH, G.C.; SPARROW, F.K. (orgs.) *The Fungi: An Advanced Treatise*, vol 5B. A Taxonomic Review with Keys: Basidiomycetes and Lower Fungi. NewYork, Academic Press. v. 1 (1), p. 187–217, 1973.
- HIBBETT, D.S. *et al.* A higher-level phylogenetic classification of the Fungi. *Mycological Research*, v. 3, p. 509–547, 2007.
- HOFF, J. A. *et al.* Fungal endophytes in woody roots of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) and ponderosa pine (*Pinus ponderosa*). *Forest Pathology*, v. 34, n. 4, p. 255 271, 2004.
- HOFFMANN, K., PAWŁOWSKA, J., WALTHER, G., WRZOSEK, M., DE HOOG, G. S., BENNY, G. L., KIRK, P.M., VOIGT, K. The family structure of the Mucorales: a synoptic revision based on comprehensive multigene-genealogies. *Persoonia - Molecular Phylogeny and Evolution of Fungi*, 30(1), 57–76, 2013. doi:10.3767/003158513x666259
- HOFFMANN, K.; VOIGT, K. *Absidia parvicida* plays a dominant role in biotrophic fusion parasitism among mucoralean fungi (Zygomycetes): *Lentamyces*, a new genus for *A. parvicida* and *A. zychae*. *Plant Biology*, v. 11, p. 537–54, 2009.

- HURDEAL, V.G, JONES, E.B.G., SANTIAGO, A.L.C.M.A., HYDE, K.D., GENTEKAKI, E. Expanding the diversity of mucoralean fungi from northern Thailand: novel *Backusella* species from soil. *Phytotaxa*, 559(3), 275-284, 2022.
- HURDEAL, V.G., GENTEKAKI, E., HYDE, K.D., NGUYEN, T.T.T., LEE, H.B. Novel *Mucor* species (Mucoromycetes, Mucoraceae) from northern Thailand. *MycKeys* 84: 57-78, 2021. doi: <https://doi.org/10.3897/mycokeys.84.71530>
- HYDE, K., HONGSANAN, S., JEEWON, R., BHAT, D.J., MCKENZIE, E., *et al.* Fungal diversity notes 367–490: taxonomic and phylogenetic contributions to fungal taxa. *Fungal Diversity*: 80: 1–270, 2016.
- HYDE, K.D; SARMA, V.V. *Vismaya chaturbeeja* gen et sp. nov. from a dicotyledonous twig in Hong Kong. *Nova Hedwigia*, v. 73, n. 1-2, p. 247-252, 2001.
- IBGE. Atlas nacional do Brasil: região Nordeste. IBGE, Rio de Janeiro. 1985.
- JACOBS, K.; BOTHA, A. *Mucor renisporus* sp. nov., a new coprophilous species from Southern Africa. *Fungal Diversity*, v. 29, n. 1, p. 27–35, 2008.
- JAMES, T.Y. *et al.* Reconstructing the early evolution of the fungi using a six gene phylogeny. *Nature*, v. 443, p. 818–822, 2006.
- KAMEI, K. Animal models of Zygomycosis – *Absidia*, *Rhizopus*, *Rhizomucor*, and *Cunninghamella*. *Mycopathologia*, v. 152, p. 5–13, 2000.
- KATOH, K., STANDLEY, D.M. MAFFT multiple sequence alignment software version 7: improvements in performance and usability. *Molecular Biology and Evolution*, 30, 772–780, 2013. <https://doi.org/10.1093/molbev/mst010>
- KHUNA, S., SUWANNARACH, N., KUMLA, J., MEERAK, J., NUANGMEK, W., KIATSIRIROAT, T., LUMYONG, S. *Apophysomyces thailandensis* (Mucorales, Mucoromycota), a new species isolated from soil in northern Thailand and its solubilization of non-soluble minerals. *MycKeys* 45: 75–92. 2019 <https://doi.org/10.3897/mycokeys.45.30813>
- KIRCHMAIR, M., NEUHAUSER, S., HUBER, L., STRASSER, H. The impact of soil treatment on soil mycobiota. *Insect Pathogens and Insect Parasitic Nematodes*. IOBC/WPRS Bulletin, vol 31: pp 239-244, 2008.
- KIRK, P.M. Nomenclatural novelties. *Index Fungorum* no. 11. Effectively published 17/08/2012 (ISSN 2049-2375), 2012.
- KIRK, P.M., P.F. CANNON., D.W. MINTER., J.A. STALPERS. *Dictionary of the Fungi*, 10th ed. CABI, Wallingford, UK, 2008.
- KORNERUP, A., WANSCHER, J.H. *Methuen Handbook of Colours*. 3rd edn. Eyre Methuen, London, 1978.

- KUMAR, S., STECHER, G., TAMURA, K. MEGA7: molecular evolutionary genetics analysis version 7.0 for bigger datasets. *Molecular Biology and Evolution*, 33, 1870–1874, 2016. <https://doi.org/10.1093/molbev/msw054>
- LACAZ, C. S.; PORTO, E.; MARTINS, J. E. C. M.; HEIS-VACCARI, E. M.; MELO, N. T. Tratado de micologia médica. 9o Edição. São Paulo: Sarvier, 2002.
- LEITÃO, J.D.A.; CORDEIRO, T.R.L.; NGUYEN, T.T.T.; LEE, H.B.; GURGEL, L.M.S.; SANTIAGO, A.L.C.M.A. *Absidia aguabelensis* sp. nov.: A new mucoralean fungi isolated from a semiarid region in Brazil. *Phytotaxa*, v. 516, n. 1, p. 083–091, 2021. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.516.1.6>
- LETUNIC, I., BORK, P. Interactive Tree of Life (iTOL) v4: recent updates and new developments. *Nucleic Acids Research*, 47, W256–W259. 1, 2019. doi: <https://doi.org/10.1093/nar/gkz239>
- LI, G.J., HYDE, K.D., ZHAO, R.L., HONGSANAN, S., ABDEL-AZIZ, F.A., ABDEL-WAHAB, M.A. *et al.* Fungal diversity notes 253–366: taxonomic and phylogenetic contributions to fungal taxa. *Fungal Diversity*, v. 78, n. 1, p. 1-237, 2016. doi:10.1007/s13225-016-0366-9
- LI, J., JIANG, B., CHEN, C., FAN, B., HUANG, H., CHEN, G. Biotransformation of botulin by *Mucor subtilissimus* to discover anti-inflammatory derivatives. *Phytochemistry*, v. 166, p.112076, 2019.
- LIANG, G.Z., XU, W.Q., ZHENG, X.L. *et al.* Tratamento bem-sucedido por cirurgia de uma mucormicose cutânea primária causada por *Mucor irregularis*. *Mycopathologia* 183, 445–449, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11046-017-0219-4>
- LIMA, D.X., VOIGT, K., DE SOUZA, C.A.F., OLIVEIRA, R.J.V., SOUZA-MOTTA, C.M., SANTIAGO, A.L.C.M.A. Description of *Backusella constricta* sp. nov. (Mucorales, ex Zygomycota) from the Brazilian Atlantic Rainforest, including a key to species of Backusella. *Phytotaxa* 289: 59–68, 2016. doi: 10.11646/phytotaxa.289.1.4
- LIMA, C.L.F. *et al.* Description of *Mucor pernambucoensis* (Mucorales, Mucoromycota), a new species isolated from the Brazilian upland rainforest. *Phytotaxa*, v. 350, p. 274–282, 2018.
- LIMA, D.X. Aspectos ecológicos e caracterização enzimática de Mucorales de solos de Mata Atlântica do litoral de Pernambuco, Brasil. Tese de doutorado – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil. p. 112, 2018a.
- LIMA, D.X. *et al.* *Circinella simplex* – a misapplied name of *Mucor circinatus* sp. nov. *Phytotaxa*, v. 329, p. 269–276, 2017.
- LIMA, D.X., CORDEIRO, T.R.L., DE SOUZA, C.A.F., SANTIAGO, A.L.C.M.A., SOUZA-MOTTA, C.M. 2018. Diversity of basal fungal order Mucorales (Mucoromycota) in a remaining area of the Brazilian Atlantic rainforest. *Nova Hedwigia* 107:459–471.

- LIMA, D.X., SANTIAGO, A.L.C.M.A., SOUZA-MOTTA, C.M. Diversity of Mucorales in natural and degraded semi-arid soils. *Brazilian Journal of Botany* 39: 1127–1133, 2016. <https://doi.org/10.1007/s40415-015-0156-8>
- LIMA, D.X.; CORDEIRO, T.R.L.; DE SOUZA, C.A.F.; OLIVEIRA, R.J.V.; LEE, H.B.; SOUZA-MOTTA, C.M.; SANTIAGO, A.L.C.M.A. Morphological and molecular evidence for two new species of *Absidia* from Neotropic soil. *Phytotaxa*, v. 446, p. 061–071, 2020b.
- LIMA, D.X., SOUZA-MOTTA, C.M., LIMA, C.L.F., DE SOUZA, C.A., RIBEIRO, J.R., SANTIAGO, A.L.C.M.A. Communities of Mucorales (phylum Mucoromycota) in different ecosystems of the Atlantic Forest. *Acta Botanica Brasilica*, v. 34, n. 4, p. 796 806, 2020a.
- LIMA, D. X. *et al.* Morphological and molecular evidence for two new species of *Absidia* from Neotropic soil. *Phytotaxa*, v. 446, n. 1, p. 61-71, 2020b.
- LINS, R.C. As áreas de exceção do agreste de Pernambuco. SUDENE/PSU/SER. Série Estudos Regionais. Recife. 402p, 1989.
- LIU, X.Y., HUANG, H., ZHENG, R.Y. Delimitation of *Rhizopus* varieties based on IGS rDNA sequences. *Sydowia* 60:93–112, 2008.
- LÜCKE, F., TANNHÄUSER, K., SHARMA, A., FRITZ, V. "Development of food products with addition of rapeseed presscake fermented by *Rhizopus*". *British Food Journal*, v. 121, n. 10, p. 2351-2364, 2019.
- LUNDGREN, J.D.A.L. Influência do Gradiente Altitudinal na Diversidade de Mucoromycota em Brejos de Altitude de Pernambuco. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Pernambuco, PE, Brasil. p. 91, 2021.
- MACÊDO, A.J.S., SILVA, D.F., SILVA, T.I.S. Particularidades da região Nordeste do Brasil: revisão de Literatura. *Nutritime Revista Eletrônica*, on-line, Viçosa, v.14, n.5, p.7015-7018, set/out, 2017.
- MARAK, M.C.N.; KAYANG, H. Isolation and Identification of Endophytic Fungi Associated with *Solanum tuberosum* L. of South-West Garo Hills, Meghalaya. *International Journal of Advances in Agricultural Science and Technology*, v. 5, p. 58–65, 2018.
- MARQUES, A.L., SILVA, J.B., SILVA, D.G. Refúgios úmidos do semiárido: um estudo sobre o brejo de altitude de Areia-PB. *Geotemas* 4(2):17–31, 2014.
- MARTINS, M.R., PEREIRA, P., LIMA, N., CRUZ-MORAIS, J. Degradation of Metalaxyl and Folpet by Filamentous Fungi Isolated From Portuguese (Alentejo) Vineyard Soils. *Arch Environ Contam Toxicol*, v. 65, p. 67–77, 2013.
- MEDEIROS, J.F. Da análise sistêmica à Serra de Martins: contribuição teórico-metodológica aos brejos de altitude. 2016.

- MEDEIROS, R.L.S., SOUZA, V.C., ARBOSA NETO, M.A., ARAÚJO, L. Estrutura da regeneração natural de *Anadenanthera colubrina* em fragmento de brejo de altitude em Bananeiras, PB. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v.36, n.86, p.95-101, 2016.
- MELO SANTOS, A. M. *et al.* Biogeographical relationships among tropical forests in north-eastern Brazil. *Journal of biogeography*, v. 34, n. 3, p. 437-446, 2007.
- MILLER, M.A., PFEIFFER, W., SCHWARTZ, T. Creating the CIPRES science gateway for inference of large phylogenetic trees. In: 2010 Gateway Computing Environments Workshop (GCE). New Orleans, 1–8, 2010. <https://doi.org/10.1109/GCE.2010.5676129>
- MME. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do Município de Brejão, Pernambuco. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/ Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005a.
- MME. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do Município de Sanharó, Pernambuco. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/ Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005b.
- MOLAVERDI, M., KARIMI, K., MIRMOHAMADSADEGHI, S., GALBE, M. High titer ethanol production from rice straw via solid-state simultaneous saccharification and fermentation by *Mucor indicus* at low enzyme loading. *Energy conversion and management*, v. 182, p. 520-529, 2019.
- NGUYEN, T.T.T., LEE, H.B. Isolation and Characterization of Three Zygomycetous Fungi in Korea: *Backusella circina*, *Circinella muscae*, and *Mucor ramosissimus*. *Mycobiology*. Dec 21;46(4):317-327, 2018. doi: 10.1080/12298093.2018.1538071. PMID: 30637140; PMCID: PMC6319469.
- NGUYEN, T.T.T., LEE, H.B. Discovery of Three New *Mucor* Species Associated with Cricket Insects in Korea. *J. Fungi*, 8, 601, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/jof8060601>
- NGUYEN, T.T.T. *et al.* Discovery of Novel *Backusella* (Backusellaceae, Mucorales) Isolated from Invertebrates and Toads in Cheongyang, Korea. *Journal of Fungi*, v. 7, n. 7, p. 513, 2021. <https://doi.org/10.3390/jof7070513>
- O'DONNELL *et al.* Evolutionary relationships among mucoralean fungi (Zygomycota): evidence for family polyphyly on a large scale. *Mycologia*, v.93, n. 1, p.286–297, 2001.
- OLIVEIRA *et al.* *Corniculariella brasiliensis*, a new species of coelomycetes in the rhizosphere of *Caesalpinia echinata* (Fabaceae, Caesalpinioideae). Brazil. – *Phytotaxa*, v. 178, p. 197–204, 2014.

- OLIVEIRA, L.G. *et al.* Diversity of filamentous fungi isolated from the soil in the semiarid area, Pernambuco, Brazil. *Journal of Arid Environments*, v. 95, p. 49–54, 2013.
- PAIVA, J.B.D.P. Produção de tanase por *Cunninghamella echinulata* UCP 1305 através de fermentação submersa utilizando meios alternativos contendo resíduos agroindustriais. 2019.
- PANCHER, M., CEOL, M., CORNEO, P. E., LONGA, C. M., YOUSAF, S., PERTOT, I., & CAMPISANO, A. Fungal endophytic communities in grapevines (*Vitis vinifera* L.) respond to crop management. *Applied and environmental microbiology*, 78(12), 4308–4317, 2012. <https://doi.org/10.1128/AEM.07655-11>
- PANDEY, C., PRABHA, D., NEGI, Y.K. Mycoremediation of Common Agricultural Pesticides. In: PRASAD, R. (eds) *Mycoremediation and Environmental Sustainability*. Springer, p. 155–179, 2018.
- PARKS, D.H., TYSON, G.W., HUGENHOLTZ, P., BEIKO, R.G. STAMP: statistical analysis of taxonomic and functional profiles. *Bioinformatics* 30(21): 3123–3124, 2014. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btu494>
- PEYRONEL, B., DAL VESCO, G. Ricerche sulla microflora di un terreno agrario presso Torino. *Allionia*, v. 2, p. 357-417, 1955.
- PICI, G. Qualche osservazione sopra due Mucoraceae. *Atti Inst Bot Univ Pavia*, v. 13, p. 38-44, 1955.
- PIDOPLICHKO, N. M., AND A. A. MILKA . Atlas of mucoralean fungi. *Acad. Sci. Ukranian S.S.R.* Kiev. 188 p., 1971 (In Russian.)
- PORTO, K.C., CABRAL, J.J.P., TABARELLI, M. Brejos de altitude em Pernambuco e Paraíba: história natural, ecologia e conservação / Organizadores,.Brasília : Ministério do Meio Ambiente, 324p, 2004.
- QUIROZ, N., DEL PILAR VILLANUEVA, J., LOZANO, E.A. Mucormicosis. *Revista de la Asociación Colombiana de Dermatología y Cirugía Dermatológica*, v. 25, n. 4, p. 284-293, 2017.
- RICHARDSON, M. The Ecology of the Zygomycetes and its impact on environmental exposure. *Clinical Microbiology and Infection* 15: 2-9, 2009.
- RIBALDI, M.S. Sopra un interessante Zigomicete terri-cola: *Gongronella urceolifera* n. gen. et n. sp. *Rivista di Biologia* 44: 157–166, 1952.
- RIBES, J. A., VANOVER-SAMS, C. L., BAKER, D. J. Zygomycetes in human disease. *Clinical Microbiology Reviews*, v. 13, p. 236–301, 2000.
- RICHARDSON, M. The ecology of the Zygomycetes and its impact on environmental exposure. *Clinical Microbiology and Infection*, 15, 2–9, 2009. doi:10.1111/j.1469 0691.2009.02972.x

- RODRIGUES, P.C.G.; CHAGAS, M.G.C.; SILVA, F.B.R.; PIMENTEL, R.M.M. Ecologia dos brejos de altitude do agreste pernambucano. *Revista de Geografia*, v. 25, n. 3, p. 20–34, 2008.
- RONQUIM., C.C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010.
- RONQUIST, F., TESLENKO, M., VAN DER MARK, P., AYRES, D.L., DARLING, A., HÖHNA, S., LARGET, B., LIU, L., SUCHARD, M.A., HUELSENBECK, J.P. MrBayes 3.2: efficient bayesian phylogenetic inference and model choice across a large model space. *Systematic Biology*, 61, 539–542, 2012. doi:<https://doi.org/10.1093/sysbio/sys029>
- RSTUDIO TEAM. RStudio: Integrated Development Environment for R. RStudio, PBC, Boston, MA, 2021. Disponível em: < <http://www.rstudio.com/>. >. Acesso em: 06 jun. 2023.
- SANTIAGO, A.L.C.M.A., SOUZA-MOTTA, C.M. Mucorales isolados do solo de mineração de cobre e produção de amilase e inulinase. *Acta Botanica Brasilica*, v. 20, n. 3, p. 641–647, 2006.
- SANTIAGO, A.L.C.M.A., HOFFMANN, K., LIMA, D.X., OLIVEIRA, R.J.V., H.E.E., MALOSSO, E., MAIA, L.C. A new species of *Lichtheimia* (Mucoromycotina, Mucorales) isolated from Brazilian soil. *Mycological Progress*, 13: 343–352, 2014.
- SANTIAGO, A.L.C.M.A., MAIA, L.C. Two new records of Mucorales from the Brazilian semi-arid region. *Mycotaxon* 114: 171–177, 2010.
- SANTIAGO, A.L.C.M.A., RODRIGUES, A., CANEDO E.M., FILHO, E.R. Taxonomic studies on *Mucor inaequisporus*, isolated for the first time in South America. *Mycotaxon* 124: 219–229, 2013b.
- SANTIAGO, A.L.C.M.A., SANTOS, P.J.P., MAIA, L.C. Mucorales from the semiarid of Pernambuco, Brazil. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 44, n. 1, p. 299–305, 2013a. doi:<https://doi.org/10.1590/S1517-83822013005000027>.
- SANTOS, A.M.M., CAVALCANTI, D.R., SILVA, J.M.C., TABARELLI, M. Biogeographical relationships among tropical forests in north-eastern Brazil. *Journal of Biogeography* 34: 437–446, 2007.
- SANTOS, F.R.S., CRUZ, M.O., LIMA, C.L.F., CORDEIRO, T.R.L., SANTOS, M.A.B., FREITAS, L.W., COSTA, D.P., GURGEL, L.M.S., SANTIAGO, A.L.C.M.A. Discovery of the rare *Mucor ardhlaengiktus* (Mucorales, Mucoromycota) in South America. *Nova Hedwigia Band* 116 Heft 1-2, 2023, p. 77 – 88. doi: [10.1127/nova_hedwigia/2023/0734](https://doi.org/10.1127/nova_hedwigia/2023/0734)
- SANTOS, F.R.S., GARCIA, N.F.L., PAZ, M.F., GUSTAVO GRACIANO FONSECA, G.G., LEITE, R.S.R. Production and characterization of α -glucosidase from *Gongronella butleri* by solid-state fermentation. *African Journal of Biotechnology*, 15(16), 633–641, 2016. doi:[10.5897/ajb2015.15025](https://doi.org/10.5897/ajb2015.15025)

- SANTOS, V. B.; WELLBAUM, C.; SCHOENLEIN-CRUSIUS, I. H. Fungos filamentosos do solo da Ilha dos Eucaliptos na represa do Guarapiranga em São Paulo, SP. *Acta Botanica Brasilica*, v. 12, n. 1, p. 101-110, 1998.
- SCHIPPER, M. A. A. A revision of the genus *Rhizopus* I. The *Rhizopus stolonifer* group and *Rhizopus oryzae*. *Studies in Mycology*, v.25, p.1-34, 1984.
- SCHIPPER, M. A. A. A study on variability in *Mucor hiemalis* and related species. Centraalbureau voor Schimmelcultures, 1973.
- SCHIPPER, M. A. A. On certain species of *Mucor* with a key to all accepted species. *Studies in Mycology*, v. 25, p.1-53, 1990.
- SCHIPPER, M. A. A. On *Mucor circinelloides*, *Mucor racemosus* and related species. Baarn, The Netherlands: Centraalbureau voor Schimmelcultures, 1976.
- SCHIPPER, M. A. A. On *Mucor mucedo*, *Mucor flavus* and related species. Centraalbureau voor Schimmelcultures, 1975.
- SCHIPPER, M. A. A. On the genera *Rhizomucor* and *Parasitella*. *Stud Mycol* 17:53– 71, 1978b.
- SCHIPPER, M.A.A. On certain species of *Mucor* with a key to all accepted species. *Studies in Mycology* 17:1-69, 1978a.
- SCHIPPER, M.A.A. The *Rhizopus stolonifer*-group and *Rhizopus oryzae*. *Studies in Mycology* 25:1– 19, 1984.
- SCHIPPER, M.A.A.; STALPERS, J.A. A revision of the genus *Rhizopus*. II. The *Rhizopus microsporus*-group. *Studies in Mycology*, v. 25, p. 20–34, 1984.
- SCHMITT, I.; *et al.* New primers for promising single-copy genes in fungal phylogenetics and systematics. *Persoonia*, v. 23, p. 35, 2009.
- SCHRÖTER J.VIII. Ordn. Zygomycetes. Brefeld, 111. Gatt. Endogone Link 1809. In: Kryptogamen-Flora von Schleisen III Band, 1 Hälfte. Cohn F (ed) Pilze. J. U. Kern's Verlag (Max Müller), Breslau, Germany, pp. 197–225, 1889.
- SECRETARIA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE DE PERNAMBUCO. Atlas de bacias hidrográficas de Pernambuco. Recife, 104p, 2006.
- SILVA, I.S., VASCONCELLOS, A., MOURA, F.M.S. Termite assemblages (Blattaria, Isoptera) in two montane forest (Brejo de Altitude) areas in northeastern Brazil. *Biota Neotropica*, v.19, n.1, 2019.
- SILVA, N. R. A. Potencial biotecnológico de *Cunninghamella echinulata* UCP 1297 na produção de biossurfactante por fermentação submersa. 2014.
- SPATAFORA, J.W. *et al.* A phylum-level phylogenetic classification of zygomycete fungi based on genome-scale data. *Mycologia*, v. 108, p. 1028–1046, 2016.

- SPECIES FUNGORUM. Index Fungorum. An international project to index all formal names in the Fungi kingdom, 2023. Disponível em: <http://www.indexfungorum.org/Names/Names.asp>. (Acesso em: 18 March 2023).
- SPEHN, E.M., KÖRNER, C. Mountain Biodiversity and Global Change. Global Mountain Biodiversity Assessment (GMBA), Institute of Botany, University of Basel, Switzerland, Schönbeinstr, pp.7–15, 2009.
- STAMATAKIS, A. RAxML version 8: a tool for phylogenetic analysis and post-analysis of large phylogenies. *Bioinformatics*, 30, 1312–1313, 2014. doi:<https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btu033>
- STAMATAKIS, A., HOOVER, P., ROUGEMONT, J. A rapid bootstrap algorithm for RAxML web-servers. *Systematic Biology*, 57, 758–771, 2008. doi:<https://doi.org/10.1080/10635150802429642>
- STREIT, F., KOCH, F., LARANJEIRA, M., NINOW, J.L. Production of fungal chitosan in liquid cultivation using apple pomace as substrate. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 40, n. 1, p. 20-25, 2009.
- SU, Y.Y., CHANG, T.Y., WANG, C.J., JAING, T.H., HSUEH, C., CHIU, C.H., CHEN, S.H. Disseminated *Cunninghamella bertholletiae* infection during induction chemotherapy in a girl with high-risk acute lymphoblastic leukemia. *Pediatrics & Neonatology*, v. 57, n. 6, p. 531-534, 2016.
- SUWANNARACH, N., KUMLA, J., SUPO, C., HONDA, Y., NAKAZAWA, T., KHANONGNUCH, C., WONGPUTTISIN, P. *Cunninghamella saisamornae* (Cunninghamellaceae, Mucorales), a new soil fungus from northern Thailand. *Phytotaxa*, 509 (3), 291–300, 2021. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.509.3.4>
- TABARELLI, M. & SANTOS, A.M.M. Uma breve descrição sobre a história natural dos brejos nordestinos. *Brejos de Altitude em Pernambuco e Paraíba, História Natural, Ecologia e Conservação*, v. 9, p. 17-24, 2004.
- TEDERSOO, L., SÁNCHEZ-RAMÍREZ, S., KÖLJALG, U., BAHRAM, M., DORING, M., SCHIGEL, D., MAY, T., RYBERG, M., ABARENKOV, K. High-level classification of the Fungi and a tool for evolutionary ecological analyses. *Fungal Diversity*, v. 90, p. 135–159, 2018.
- TENÓRIO, J.C.S., PIMENTEL, A.K.N., ALEXANDRE, F.S., ANDRADE, H.M.L.S., ANDRADE, L.P. Ação antrópica na produção de alimentos em áreas de Brejos de Altitude no semiárido do Nordeste, Brasil. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.11, n.5, p.578-593, 2020. doi: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-06858.2020.005.0052>

- TIBPROMMA, S., HYDE, K.D., JEEWON, R. *et al.* Fungal diversity notes 491–602: taxonomic and phylogenetic contributions to fungal taxa. *Fungal Diversity* 83, 1–261, 2017. doi:<https://doi.org/10.1007/s13225-017-0378-0>
- TRUFEM, S.F.B. Mucorales do Estado de São Paulo 1: gênero *Mucor* Micheli. *Rickia* 9: 81–91, 1981a.
- TRUFEM, S.F.B. Mucorales do Estado de São Paulo 2: gêneros *Absidia* van Tieghem, *Gongronella* Ribaldi e *Rhizopus* Ehrenberg. *Rickia* 9: 99–106, 1981c.
- TRUFEM, S.F.B. Mucorales do Estado de São Paulo 3. Gêneros *Circinella* van Tieghem & Le Monnier e *Cunninghamella* Matruchot. *Rickia* 9: 113–120, 1981b.
- UPADHYAY, H.P. Soil fungi from north-east and north Brazil-VII. The genus *Gongronella*. *Nova Hedwigia* 17: 65–73, 1969.
- URQUHART AS, DOUCH JK, HEAFIELD TA, BUDDIE AG, IDNURM A. Diversity of *Backusella* (Mucoromycotina) in south-eastern Australia revealed through polyphasic taxonomy. *Persoonia*. Jun;46:1-25, 2021. doi: 10.3767/persoonia.2021.46.01. Epub 2020 Sep 21. PMID: 35935894; PMCID: PMC9311390.
- VAN TIEGHEM P. Nouvelles recherches sur les Mucorinées. *Ann Sci Nat Bot Sér VI*, 1:5 175. 1875.
- VAN TIEGHEM P., LE MONNIER G. Recherches sur les Mucorinées. *Ann Sci Nat Bot Sér V*, 17:261–399, 1873.
- VAN TIEGHEM, P. Troisième mémoire sur les Mucorinées. *Annales des Sciences Naturelles Botanique et Biologie Vegetale*, v. 4, n. 4, p. 312-399., 1878.
- VAN TUINEN, D., ZHAO, B., GIANINAZZI-PEARSON, V. PCR in studies of AM fungi: from primers to application. In: Varma, A.K. (Ed.) *Mycorrhizal manual*. Springer, Berlin, 387–399, 1998.
- VELOSO, H. P., RANGEL-FILHO, A. L. R., LIMA, J. C. A. Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal. Rio de Janeiro: IBGE, 124 p, 1991.
- VOIGT K, JAMES TY, KIRK PM, SANTIAGO ALCMA, WALDMAN B, GRIFFITH GW, FU, M, RADEK R, STRASSET JFH, WURZBACHER C, JERÔNIMO GH, SIMMONS DR, SETO K, GENTEKAKI E, HURDEAL VG, HYDE KD, NGUYEN TTT, LEE HB. Early-diverging fungal phyla: taxonomy, species concept, ecology, distribution, anthropogenic impact, and novel phylogenetic proposals. *Fungal Diversity* 109: 59–98, 2021.
- VOIGT, K., KIRK, P. M. FUNGI | Classification of Zygomycetes: Reappraisal as Coherent Class Based on a Comparison between Traditional versus Molecular Systematics. In: Batt, C.A., Tortorello, M.L. (eds) *Encyclopedia of Food Microbiology* 2nd. London, Academic Press, pp. 54–67, 2014.

- VOIGT, K., WOLF, T., OCHSENREITER, K., NAGY, G., KAERGER, K., SHELEST, E., PAPP, T. Genetic and Metabolic Aspects of Primary and Secondary Metabolism of the Zygomycetes. In: Hoffmeister D. (ed.) Biochemistry and Molecular Biology. The Mycota (A Comprehensive Treatise on Fungi as Experimental Systems for Basic and Applied Research), vol III. Switzerland, Springer, Cham, pp. 361–385, 2016.
- VON ARX, J. A. 1970. The genera of fungi sporulating in pure culture. J. Cramer. Lehre. 288 p.
- WAGNER, L., DE HOOG, S., ALASTRUEY-IZQUIERDO, A., VOIGT, K., KURZAI, O., WALTHER, G. A revised species concept for opportunistic *Mucor* species reveals species specific antifungal susceptibility profiles. Antimicrobial Agents and Chemotherapy 63: 1–8, 2019.
- WALTHER, G. A revised species concept for opportunistic *Mucor* species reveals species specific antifungal susceptibility profiles. Antimicrobial Agents and Chemotherapy 63: 1–8, 2019.
- WAGNER, L., *et al.* A new species concept for the clinically relevant *Mucor circinelloides* complex. Persoonia: Molecular Phylogeny and Evolution of Fungi, 44, 67, 2020.
- WAGNER, L., STIELOW, J.B., DE HOOG, S., BENSCH, K., SCHWARTZE, V., VOIGT, K., ALASTRUEY-IZQUIERDO, A., KURZAI, O., WALTHER, G. A new species concept for the clinically relevant *Mucor circinelloides* complex. Persoonia Molecular Phylogeny and Evolution of Fungi 44: 67–97, 2020.
- WALTHER, G., PAWŁOWSKA, J., ALASTRUEY-IZQUIERDO, A., WRZOSEK, M., RODRIGUEZ-TUDELA, J.L., DOLATABADI, S., CHAKRABARTI, A., DE HOOG, G.S. DNA barcoding in Mucorales: an inventory of biodiversity. Persoonia 30:11–47, 2013.
- WALTHER, G., WAGNER, L., KURZAI, O. Updates on the Taxonomy of Mucorales with an Emphasis on Clinically Important Taxa. Journal of Fungi 5(106): 1–23, 2019.
- WALTHER, G., WAGNER, L., KURZAI, O. Updates on the Taxonomy of Mucorales with an Emphasis on Clinically Important Taxa. Journal of Fungi, 5(106): 1–23, 2019.
- WANG, Y.J., ZHAO, T., WU, W.Y., WANG, M., LIU, X.Y. *Cunninghamella verrucosa* sp. nov. (Mucorales, Mucoromycota) from Guangdong Province in China. Phytotaxa, 560 (3). 274–284, 2022. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.560.3.2>
- WHITE, T.J., BRUNS, T., LEE, S., TAYLOR, J. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: Innis MA, Gelfand DH, Sninsky JJ, White TJ (eds) PCR protocols: a guide to methods and applications. Academic Press, San Diego, 315–322, 1990.
- WIJAYAWARDENE, N.N., HYDE, K.D., DAI, D.Q., *et al.* Outline of Fungi and fungus-like taxa – 2022. Mycosphere, 13(1), 53–453, 2022. doi 10.5943/mycosphere/13/1/2

- YU, J., WALTHER, G., VAN DIEPENINGEN, A.D., ENDE, A.H., LI, R., *et al.* DNA barcoding of clinically relevant *Cunninghamella* species. *Medical Mycology* 53(2): 99–106, 2015.
- ZIAEE A, Zia M, Bayat M, Hashemi J. Identification of Mucorales isolates from soil using morphological and molecular methods. *Current Medical Mycology* 2: 13-19, 2016.
- ZHANG, Z.Y., ZHAO, Y.X., SHEN, X., CHEN, W.H., HAN, Y.F., HUANG, J.Z., LIANG, Z.Q. Molecular phylogeny and morphology of *Cunninghamella guizhouensis* sp. nov. (Cunninghamellaceae, Mucorales), from soil in Guizhou, China. *Phytotaxa* 455:31-39, 2020. doi: <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.455.1.4>
- ZHAO, H. *et al.* Two New Species in the Family Cunninghamellaceae from China. *Mycobiology*, v. 49, n. 2, p. 142-150, 2021b.
- ZHAO, H.; LV, M.; LIU, Z.; ZHANG, M.; WANG, Y.; JU, X.; SONG, Z.; REN, L.; JIA, B.; QIAO, M.; LIU, X. High-yield oleaginous fungi and high-value microbial lipid resources from Mucoromycota. *BioEnergy Research*, v. 14, p. 1196–1206, 2021a. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10219-3>
- ZHENG, R.Y., CHEN, G.Q. A monograph of *Cunninghamella*. *Mycotaxon* 80:1–75, 2001. ZHENG, R.Y., CHEN, G.Q., HUANG, H., LIU, X.Y. A monograph of *Rhizopus*. *Sydowia* 59(2): 273–372, 2007.

APÊNDICE A:ARTIGO. Santos, Francisca Robervania Soares dos; Cruz, Mateus Oliveira da; Lima, Catarina Letícia Ferreira; Cordeiro, Thalline Raffaella Leite; Santos, Maria Alice Barbosa dos; Freitas, Leslie Waren Silva de; Costa, Diogo Paes da; Gurgel, Luciana Melo Sartori; Santiago, André L. Cabral Monteiro de Azevedo. Discovery of the rare *Mucor ardhlaengiktus* (Mucorales, Mucoromycota) in South America. Nova Hedwigia Band 116 Heft 1-2 (2023), p. 77 – 88. doi: 10.1127/nova_hedwigia/2023/0734



Nova Hedwigia, Vol. 116 (2023), Issue 1-2, 77–88
Stuttgart, March 2023

Article

Discovery of the rare *Mucor ardhlaengiktus* (Mucorales, Mucoromycota) in South America

Francisca Robervania Soares dos Santos¹, Mateus Oliveira da Cruz²,
Catarina Letícia Ferreira Lima³, Thalline Raffaella Leite Cordeiro⁴,
Maria Alice Barbosa dos Santos⁵, Leslie Waren Silva de Freitas⁶,
Diogo Paes da Costa⁷, Luciana Melo Sartori Gurgel⁸,
André Luiz Cabral Monteiro de Azevedo Santiago^{9*}

¹ Programa de Pós-graduação em Biologia de Fungos, Universidade Federal de Pernambuco, Av. da Engenharia s/n, 50740-600, Recife, PE, Brasil; <https://orcid.org/0000-0002-5358-6506>; robervania.soares@ufpe.br

² Programa de Pós-graduação em Biologia Celular, Molecular e Microbiologia, Universidade Estadual Paulista, 13506-000, Rio Claro, SP, Brasil; <https://orcid.org/0000-0002-5082-0117>; cruzmfungi@gmail.com

³ Programa de Pós-graduação em Biologia de Fungos, Universidade Federal de Pernambuco, Av. da Engenharia s/n, 50740-600, Recife, PE, Brasil; <https://orcid.org/0000-0002-4882-5808>; catarina.lima@hotmail.com

⁴ Programa de Pós-graduação em Biologia de Fungos, Universidade Federal de Pernambuco, Av. da Engenharia s/n, 50740-600, Recife, PE, Brasil; <https://orcid.org/0000-0002-3430-5852>; thalline.leite30@gmail.com

⁵ Programa de Pós-graduação em Biologia de Fungos, Universidade Federal de Pernambuco, Av. da Engenharia s/n, 50740-600, Recife, PE, Brasil; <https://orcid.org/0000-0002-6874-1679>; alice.barbosasantos@ufpe.br

⁶ Programa de Pós-graduação em Biologia de Fungos, Universidade Federal de Pernambuco, Av. da Engenharia s/n, 50740-600, Recife, PE, Brasil; <https://orcid.org/0000-0001-8903-4319>; lesliewaren@gmail.com

⁷ Laboratório de Microbiologia e Enzimologia, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, 55292-270, Garanhuns, PE, Brasil; <https://orcid.org/0000-0002-8551-7345>; diogocosta1@yahoo.com.br

⁸ Instituto Agrônomo de Pernambuco, Av. General San Martin, 1371, 50761-000, Recife, PE, Brasil; <https://orcid.org/0000-0002-7431-2889>; lciana.sartori@ipa.br

⁹ Programa de Pós-graduação em Biologia de Fungos, Universidade Federal de Pernambuco, Av. da Engenharia s/n, 50740-600, Recife, PE, Brasil; <https://orcid.org/0000-0001-5174-5553>; andrelcabral@msn.com

* Corresponding author: andrelcabral@msn.com

With 3 figures and 1 table

Abstract: *Mucor ardhlaengiktus* is reported for the first time in South America, where it was isolated from soil in an upland rainforest area, located in the municipality of Sanharó, state of Pernambuco, Brazil. The strain URM 8592 is characterized by forming simply branched sporangiophores, some monopodially branched, globose and subglobose columellae, infrequently ellipsoid with a slight constriction at the base. The sporangiospores are mostly ellipsoid, although some are ovoid, reniform and rarely irregularly shaped, and chlamydospores are frequently formed. This study presents a detailed morphological description of this rare mucoralean fungus. Aspects of its taxonomy and geographical distribution are also commented.

Keywords: Mucoromycotina; Mucoromycetes; soil; taxonomy

Introduction

Mucor Fresen. belongs to the phylum Mucoromycota, subphylum Mucoromycotina, class Mucoromycetes, and order Mucorales (Wijayawardene et al. 2022). Species of this genus are fast growing on culture media and form simple or sympodially and/or monopodially branched sporangiophores, with non-apophysate terminal sporangia, as well as columellae of variable shapes. Sporangiospores are smooth or rough-walled and of variable shapes (Schipper 1978, Benny et al. 2014). Rarely, species of this genus form rhizoids as is the case with *M. luteus* Linnem. and *M. irregularis* Stchigel, Cano, Guarro & E. Álvarez (Benny et al. 2014). *Mucor* species have been isolated from different substrates such as soil, animal dung, plants, and decomposing food (Santiago et al. 2013, Lima et al. 2015, Nguyen et al. 2019). Some species of the *M. circinelloides* complex can be agents of mucormycosis, affecting immunocompromised patients (Wagner et al. 2020).

Álvarez et al. (2011) proposed *Mucor ellipsoideus* Álvarez, Cano, Stchigel, Sutton & Guarro isolated from a human patient in the United States of America. However, a few years later, Walther et al. (2013), after a comprehensive phylogenetic (LSU and ITS rDNA regions) study of Mucorales, reduced this species to a synonym of *M. ardhlaengiktus* Mehrotra & Mehrotra, which was first isolated from soil in India (Mehrotra & Mehrotra 1979). *Mucor ardhlaengiktus* forms unbranched sporangiophores, sometimes once branched, globose sporangia, and usually globose or subglobose columellae. Sporangiospores are ellipsoid, ovoid or reniform, and smooth-walled. Chlamydospores are abundant, produced intercalary or terminally, isolated or in long chains (Mehrotra & Mehrotra 1979).

Currently, little is known about the distribution and ecology of *M. ardhlaengiktus*, since there are few reports of occurrence of this species. So far, it has been reported to occur in Australia (substrate unknown), India (soil), Mexico (soil), China (rice straw), South Korea (amphibian feces), the British Virgin Islands (substrate unknown), and the United States of America (human patient) (Mehrotra & Mehrotra 1979, Álvarez et al. 2011, Yang et al. 2019, Nguyen et al. 2019, GBIF 2022, GenBank 2022) (Fig. 1). A specimen of *M. ardhlaengiktus* RSC1 showed potential for the biotechnology industry due to its ability to produce the enzyme β -glucosidase, which catalyzes the last step in the formation of glucose from cellulose and can be employed in agricultural and industrial processes (Yang et al. 2019).

During a study on the diversity of mucoralean fungi in an upland forest area in Pernambuco, northeastern Brazil, a specimen morphologically similar to *M. ardhlaengiktus* was found. The identity was confirmed by morphological and molecular (ITS and LSU regions of the rDNA) data. In this work, we describe and illustrate this rare species. Aspects of its taxonomy and distribution are also commented.

Materials and methods

Study area and soil sampling: soil samples were collected in April 2022 in the district of Jenipapo, municipality of Sanharó (8°17'08.6" S 36°30'53.9" W), located in the state of Pernambuco, Brazil (Fig. 1). The local vegetation comprises subdeciduous and deciduous forests. The climate is tropical rainy, with dry summers. The rainy season starts in January/February, ending in September, and can extend until October. The average annual temperature is 31 °C, with an average annual rainfall of 496 mm (MME 2005). Using sterilized spatulas, soil samples were collected at a depth of 5 cm, packed in sterile plastic bags and stored in styrofoam boxes with ice for transport to the Laboratório de Fungos Zigospóricos at the Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

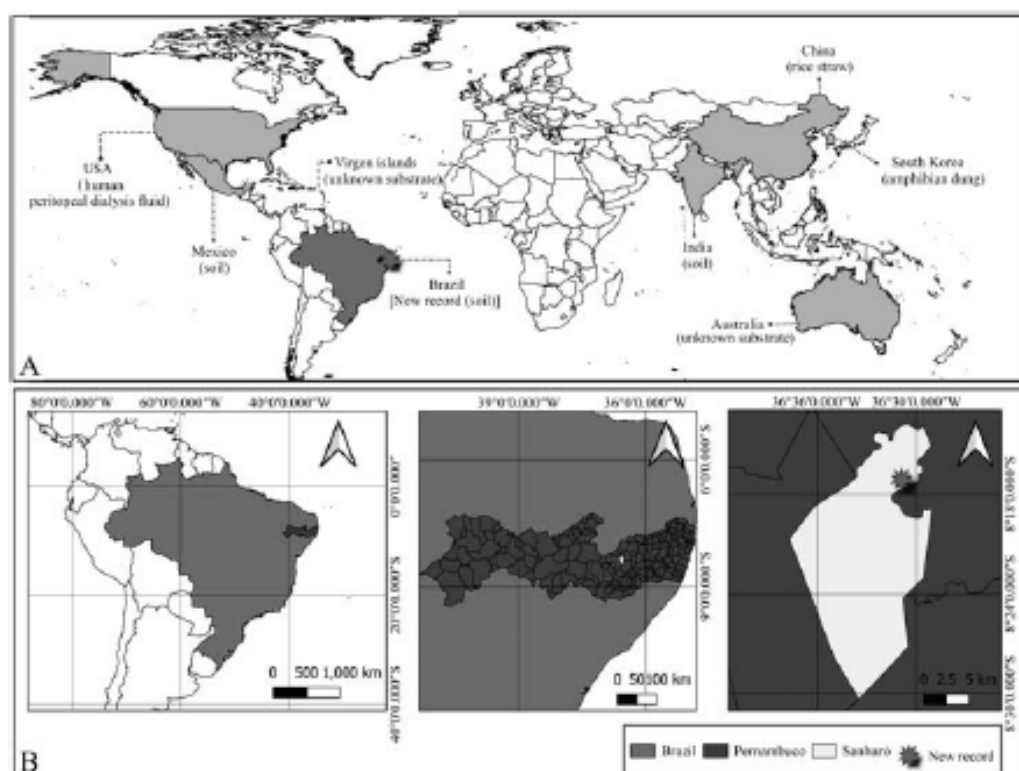


Fig. 1. A. Geographical distribution of *Mucor ardhlaengiktus*. B. Geographic location of the first record of *Mucor ardhlaengiktus* (URM 8592) in South America (Brazil).

Isolation, purification, and identification of *Mucor ardhaengiktu*: Five milligrams of soil were added to wheat germ agar culture medium (Benny 2008), with the addition of chloramphenicol (80 mgL^{-1}). Colony growth was monitored for 72 hours at room temperature ($26 \pm 2^\circ\text{C}$). Fragments of mycelium were removed directly from the Petri dishes under a Leica EZ4 stereomicroscope and transferred to malt extract agar (MEA) plates (Benny 2008). Mycelium fragments from the specimen were transferred to slides with 2% KOH or lactophenol blue and observed under light microscopy (Leica DM500). The specimen was identified by comparing the macroscopic appearance (color and appearance of the colony) and the microscopic structures (shape and size of sporangia, columellae, sporangiospores, and chlamydospores), as described by Mehrotra & Mehrotra (1979) and Álvarez et al. (2011). Forty measurements were made for each fungal structure from plates incubated at 25°C for 7 days on MEA in the dark. A live culture (URM 8592) is deposited in the URM culture collection of the Universidade Federal de Pernambuco.

DNA extraction, PCR, sequencing, and phylogenetic analysis: Fungal biomass was obtained from MEA cultures incubated at 28°C for up to 5 days and was transferred to 2 mL microtubes with screw caps. To each tube, 0.5 g of acid-washed glass beads of two different diameters ($150\text{--}212 \mu\text{m}$ and $425\text{--}600 \mu\text{m}$, 1:1) (Glass beads, Sigma-Aldrich, Darmstadt, Germany) were added and the fungal biomass was crushed by stirring at high speed in a FastPrep homogenizer (FastPrep-24, MP Biomedicals, California, USA). The genomic DNA extraction procedure was conducted as described by de Oliveira et al. (2016), where the mycelium was homogenized in CTAB lysis buffer [2% cetyltrimethylammonium bromide, 20 mM EDTA, 0.1 M Tris-HCl (pH 8.0), 1.4 M NaCl; Doyle & Doyle 1987, Doyle & Doyle 1990], washed with chloroform: isoamyl alcohol (24:1), and subsequently the DNA-containing supernatant was separated from the hyphal residues. The supernatant was mixed with an equal volume of isopropanol followed by DNA precipitation after incubation at -20°C for 30 min. After centrifugation at $13,000 \text{ rpm}$ for 15 min the resulting DNA pellet was washed with 70% ethanol and resuspended in 50 μL ultrapure water.

For the amplification of the ITS and the LSU of rDNA, the primer pairs ITS1/ITS4 and LR1/LSU2 (White et al. 1990, van Tuinen et al. 1998, Santiago et al. 2014), were used, respectively. The final amplicons were purified with the enzymatic mix (NucleoSAP, Molecular Biotechnology, Belo Horizonte, Brazil) and used for sequencing at Plataforma Multiusuários de Sequenciamento, Centro de Biociências, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Pernambuco, Brazil).

The sequences of strain URM 8592 were compared with sequences available on the National Center for Biotechnology Information GenBank database using the tool BLASTn to find genetically closest sequences (Table 1). Sequences were aligned using MAFFT v.7 (<https://mafft.cbrc.jp/alignment/server>) (Katoh & Standley 2013) for each of the molecular markers. Subsequently, the sequences were edited manually in MEGA v.7 (Kumar et al. 2016). ITS and LSU (rDNA) region alignments were concatenated before phylogenetic analyses. Bayesian inference (BI) and maximum likelihood (ML) analyses were performed with MrBayes v.3.2.2 (Ronquist et al. 2012) on XSEDE and RAxML-HPC BlackBox v.8.2.8 (Stamatakis et al. 2008, Stamatakis 2014), respectively, using the CIP-

Table 1. Specimens used in the phylogenetic analyses with their GenBank accession numbers. Bold letters indicate the strain obtained in this study. ¹ CBS culture collection of the Westerdijk Fungal Biodiversity Institute, The Netherlands; ² CNUFC Chonnam National University Fungal Collection, Gwangju, South Korea; ³ URM Culture Collection and URM Herbarium, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brazil. Ex-type, ex-epitype, and ex-holotype strains are marked with "T", "ET", and "HT", respectively.

Species	Strain number	GenBank accession No.		Reference
		ITS	LSU	
<i>Mucor amphibiorum</i> Schipper	¹ CBS 763.74 ^T	NR_103615	NG_057877	Walther et al. (2013)
<i>M. ardhlaengiktus</i> B.S. Mehrotra & B.M. Mehrotra	¹ CBS 210.80 ^{ET}	NR_152960	JN206504	Walther et al. (2013)
<i>M. ardhlaengiktus</i>	¹ CBS 650.78	JN206174	JN206499	Walther et al. (2013)
<i>M. ardhlaengiktus</i>	² CNUFC FKT18033	MK943540	MK942388	Nguyen et al. (2019)
<i>M. ardhlaengiktus</i>	² CNUFC FKT18034	MK943541	MK942389	Nguyen et al. (2019)
<i>M. ardhlaengiktus</i>	³URM 8592	OQ034611	OQ034577	This study
<i>M. azygosporus</i> R.K. Benj.	¹ CBS 292.63	NR_103639	NG_057928	Walther et al. (2013)
<i>M. falcatus</i> Schipper	¹ CBS 251.35 ^{HT}	NR_103647	NG_057931	Walther et al. (2013)
<i>M. inaequisporus</i> Dade	¹ CBS 351.50	JN206178	JN206500	Walther et al. (2013)
<i>M. inaequisporus</i>	¹ CBS 496.66	JN206179	JN206501	Walther et al. (2013)
<i>M. indicus</i> Lendn.	¹ CBS 226.29 ^{ET}	NR_077173	NG_057878	Walther et al. (2013)
<i>M. indicus</i>	¹ CBS 424.71	MH860196	MH871968	Walther et al. (2013)
<i>M. nederlandicus</i> Vániová	¹ CBS 735.70	JN206176	JN206503	Walther et al. (2013)
<i>M. odoratus</i> Treschew	¹ CBS 130.41 ^T	NR_145287	NG_057927	Walther et al. (2013)
<i>M. prayagensis</i> B.S. Mehrotra & Nand ex Schipper	¹ CBS 816.70	MH859957	JN206496	Walther et al. (2013)
<i>M. ucrainicus</i> Milko	¹ CBS 221.71	JN206191	MT523853	Walther et al. (2013)
<i>M. ucrainicus</i>	¹ CBS 674.88	JN206192	JN206507	Walther et al. (2013)
<i>M. variosporus</i> Schipper	¹ CBS 837.70 ^T	NR_152951	JN206508	Walther et al. (2013)

Table 1. cont.

Species	Strain number	GenBank accession No.		Reference
		ITS	LSU	
<i>M. zychae</i> var. <i>zychae</i> Baijal & B.S. Mehrotra	‘CBS 416.67’	NR_103641	NG_057930	Walther et al. (2013)
<i>Backusella circina</i> J.J. Ellis & Hessel.	‘CBS 128.70’	NR_103649	NG_058649	Walther et al. (2013)

RES Science Gateway (<http://www.phylo.org/>) (Miller et al. 2010). The ML analysis was performed using the GTR+I+G standard nucleotide substitution model, and the BI was performed using the best nucleotide model selected by AIC in MrModeltest 2.3. Bayesian Inference analysis was conducted with 1×10^6 generations with a burn-in value of 25%. Phylogenetic trees were viewed and arranged using Interactive Tree of Life (iTOL) v4 (<https://itol.embl.de/>) (Letunic & Bork 2019). Values less than 0.90 BI posterior probability and 70% ML bootstrap were not considered. The newly obtained sequences were deposited in the GenBank database. GenBank accession numbers are listed in Table 1.

Results

Phylogenetic analyses

Phylogenetic relationships within *Mucor* species were estimated by a Bayesian inference (BI) and Maximum Likelihood. The alignment of ITS and LSU consisted of 21 sequences and 1311 characters with 796 and 515 characters used in the ITS and LSU, respectively. The phylogenetic analysis placed the studied isolate within the the *M. ardhlaengiktus* clade with high support values. The topology of the concatenated tree, as well as the ML bootstrap values and Bayesian inference posterior probabilities ($>70\%$ and >0.95 , respectively), are shown in Fig. 2. In the BLASTn analysis, the LSU and ITS sequences of URM 8592 showed 99.4% and 100% identity with the sequence of *M. ardhlaengiktus* (ex-type CBS 210.80), respectively (Fig. 2).

Taxonomy

Mucor ardhlaengiktus B.S. Mehrotra & B.M. Mehrotra, Sydowia 31 (1–6): 94 1979 [1978]. (Fig. 3).

= *Mucor ellipsoideus* Álvarez, Cano, Stchigel, Sutton & Guarro.

Material examined: Brazil, Pernambuco, Sanharó, District of Jenipapo (8°17'08.6" S 36°30'53.9" W), isolated from soil samples, 12 April 2022, Francisca R.S. dos Santos (URM 8592).

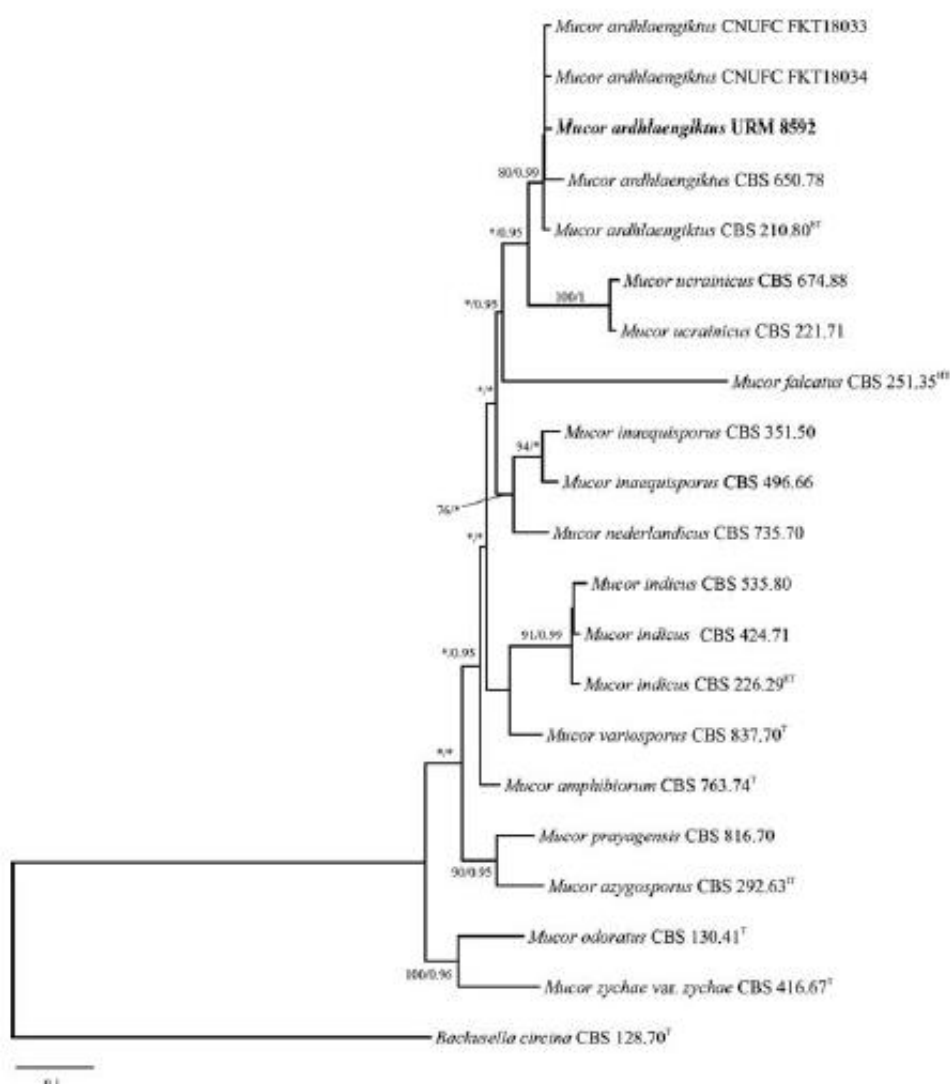


Fig. 2. Phylogenetic tree of *Mucor ardhlaengiktus* (URM 8592) and related species constructed using analysis of combined ITS and LSU of ribosomal DNA. Values for Bayesian posterior probabilities over 0.9 and ML bootstrap greater than or equal to 70% are placed above the branches. The sequence obtained in this study is showed in boldface. *Backusella circina* was used as an outgroup.

Distribution: Australia, Brazil, India, Mexico, South Korea, the British Virgin Islands, and the United States.

Description: Colony white, reverse pale cream-colored, covering the entire Petri dish (9 cm diam. and 1.5 cm high) after 5 days on MEA, at 25 °C. Sporangiophores hyaline, long, erect, infrequently curved, unbranched or with a single branch, some monopodially

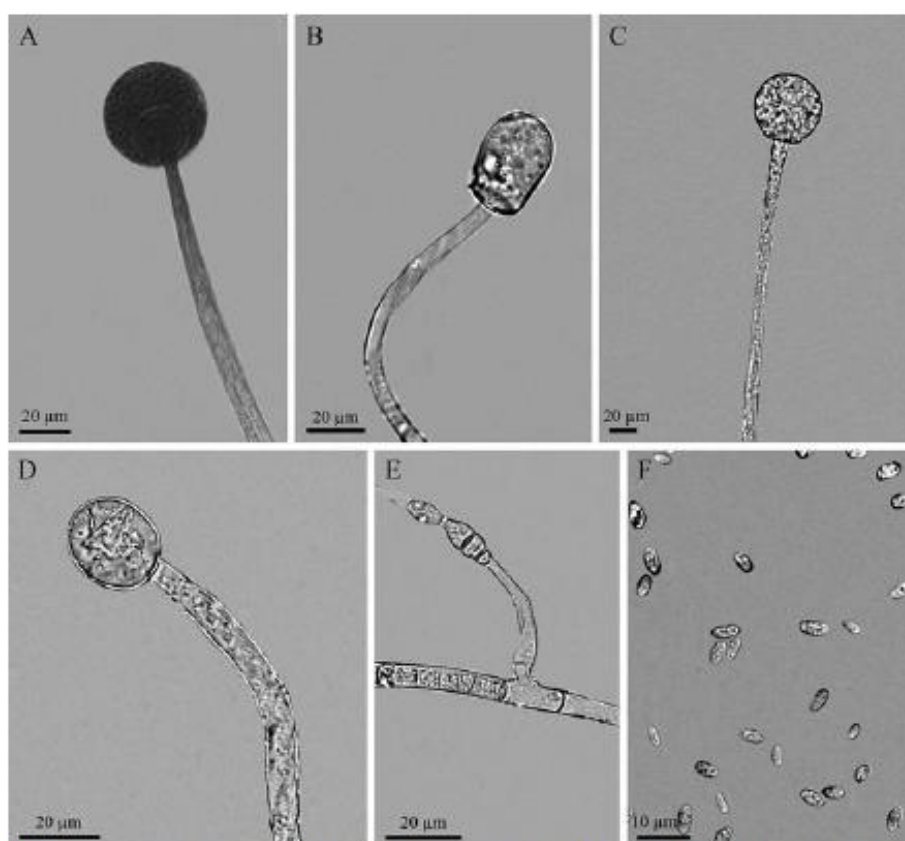


Fig. 3. *Mucor ardhlaengiktus* (URM 8592). A. Sporangiophore with sporangium. B, C, D. Sporangiophore with columella. E. Chlamydospores. F. Sporangiospores.

branched, up to 960 (-1440) $\times$ 7.5 μm , smooth-walled. Rhizoids not observed. Sporangia globose, 26.5 – 60 μm diam, initially yellowish, brownish when mature, smooth-walled. Columellae hyaline, globose and subglobose, infrequently ellipsoid with a slight constriction at the base $(9.5$ – 14.5 – 30 (-40) $\times$ $(9.5$ – 14.5 – 26.5 (-40) μm , smooth-walled. Collar discrete. Sporangiospores hyaline, ellipsoid, a few ovoid, reniform and infrequently irregularly shaped, 5 – 7 (-9.5) $\times$ 2.5 – 5 μm , with yellow contents, smooth-walled. Chlamydospores abundant on hyphae, intercalate and terminal, globose or ellipsoid. Zygosporangia and azygosporangia not observed.

Discussion

We provide data on the first occurrence of *M. ardhlaengiktus* in South America, isolated from soil in an upland forest area, located in the state of Pernambuco, Brazil. This species differs from other species by simultaneously forming unbranched or single branched sporangiophores, some monopodially branched, globose sporangia, globose or subglobose columellae, some ellipsoid with a slight constriction at base, ellipsoid sporangiospores, a few slightly ovoid, reniform or infrequently irregular, with yellow contents, and abundant chlamydospores. Although Stalpers & Schipper (1980) pointed out that *M. ardhlaengiktus* obligatorily forms azygospores, our specimen differs from the holotype (Mehrotra & Mehrotra 1979) by not forming this structure. Álvares et al. (2011) also did not observe azygospores in their specimen grown on MEA. As the culture medium used to describe the holotype was oat agar (OA), different from the MEA used in this work and by Álvares et al. (2011), we first hypothesized that the production of azygospores was induced by the type of culture medium used. However, Nguyen et al. (2019) grew a Korean specimen of *M. ardhlaengiktus* on MEA, potato dextrose agar and OA, with no azygospore formation. Thus, we believe that the formation of this structure is probably related to intrinsic aspects of each specimen. Azygospores have also been observed in mucoralean fungi from crosses between different but closely related species or between different genera. This structure originates from parthenogenesis and can be found in both homothallic and heterothallic species (O'Donnell et al. 1977, Walther et al. 2019). In addition, the Brazilian isolate forms sporangia 26.5–60 µm in diameter, slightly differing from the holotype that forms sporangia 28–72.6 in diameter (Mehrotra & Mehrotra 1979), whereas Nguyen et al. (2019) observed sporangia up to 79 µm in the South Korean specimen. The specimen described by Álvares et al. (2011) showed some minor differences in comparison to our specimen, such as a pale-yellow mature colony and globular to conical columellae. Yet these authors did not mention yellow contents inside sporangiospores.

Until now, *M. ardhlaengiktus* has been reported from Australia, India, South Korea, China, Mexico, the British Virgin Islands, and the United States of America (GBIF 2022), but with little information about substrates and ecology of this species. We strongly believe that like other species of *Mucor*, *M. ardhlaengiktus* is a soil saprobe, but it seems to also be an opportunistic infectious agent, as it was isolated from peritoneal dialysis fluid of a human patient with chronic renal failure (Álvarez et al. 2011). These authors reported that this species is able to growth and sporulate up to 37 °C, which is a virulence factor to infect humans (Köhler et al. 2015). Other species of this genus, such as *M. irregularis* (Lu et al. 2013) and those of the *M. circinelloides* complex (Wagner et al. 2020), have also been reported as causative agents of invasive mucormycosis (García-Hermoso et al. 2018). Thus, further studies on this species should be carried out to better understand its ecology, including its opportunistic behavior as an agent of mucormycosis.

Acknowledgements

We thank the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), and the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) for the scholarships granted to Francisca Robervânia Soares dos Santos and André Luiz Santiago, respectively. This research was also financed by the project 'Mucoromycotina Diversity in the different ecosystems of the Atlantic Forest of Pernambuco' (Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – FACEPE – First PPP/FACEPE/CNPq Project Program – APQ – 0842-2.12/14).

References

- Álvarez, E., Cano, J., Stchigel, A. M., Sutton, D. A., Fothergill, A., Salas, A., . . . Guarro, J. (2011). Two new species of *Mucor* from clinical samples. *Medical Mycology*, 49(1), 62–72. <https://doi.org/10.3109/13693786.2010.499521>
- Benny, G. L. (2008). The methods used by Dr. R. K. Benjamin, and other mycologists to isolate zygomycetes. *Aliso*, 26(1), 37–61. <https://doi.org/10.5642/aliso.20082601.08>
- Benny, G. L., Humber, R. A., & Voigt, K. (2014). Zygomycetous fungi: phylum Entomophthoromycota and subphyla Kickxellomycotina, Mortierellomycotina, Mucoromycotina, and Zoopagomycotina. In D. J. McLaughlin & J. W. Spatafora (Eds.), *The Mycota VII Part A, Systematics and evolution* (pp. 209–250). Berlin: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-55318-9_8
- Doyle, J. J., & Doyle, J. L. (1987). A rapid DNA isolation procedure for small quantities of fresh leaf tissue. *Phytochemical Bulletin*, 19, 11–15.
- Doyle, J. J., & Doyle, J. L. (1990). Isolation of plant DNA from fresh tissue. *Focus (San Francisco, Calif.)*, 12, 13–15.
- García-Hermoso, D., Criscuolo, A., Lee, S. C., Legrand, M., Chaouat, M., Denis, B., . . . Alanio, A. (2018). Outbreak of invasive wound mucormycosis in a burn unit due to multiple strains of *Mucor circinelloides* f. *circinelloides* resolved by whole-genome sequencing. *mBio*, 9(2), e00573–e18. <https://doi.org/10.1128/mBio.00573-18>
- Gbif (2022). Global Biodiversity Information Facility Home Page. <https://www.gbif.org>
- Genbank (2022). National Center for Biotechnology Information (NCBI). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov>
- Katoh, K., & Standley, D. M. (2013). MAFFT multiple sequence alignment software version 7: Improvements in performance and usability. *Molecular Biology and Evolution*, 30(4), 772–780. <https://doi.org/10.1093/molbev/mst010>
- Köhler, J. R., Casadevall, A., & Perfect, J. (2015). The spectrum of fungi that infects humans. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, 5(1), a019273. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a019273>
- Kumar, S., Stecher, G., & Tamura, K. (2016). MEGA7: Molecular evolutionary genetics analysis version 7.0 for bigger datasets. *Molecular Biology and Evolution*, 33(7), 1870–1874. <https://doi.org/10.1093/molbev/msw054>
- Letunic, I., & Bork, P. (2019). Interactive Tree Of Life (iTOL) v4: Recent updates and new developments. *Nucleic Acids Research*, 47(1), 256–259. <https://doi.org/10.1093/nar/gkz239>
- Lima, D. X., Santiago, A. L. C. M. A., & Souza-Motta, C. (2015). Diversity of Mucorales in natural and degraded semi-arid soils. *Brazilian Journal of Botany*, 39(4), 1127–1133. <https://doi.org/10.1007/s40415-015-0156-8>

- Lu, X.-L., Najafzadeh, M. J., Dolatabadi, S., Ran, Y.-P., Gerrits van den Ende, A. H. G., Shen, Y.-N., ... de Hoog, G. S. (2013). Taxonomy and epidemiology of *Mucor irregularis*, agent of chronic cutaneous mucormycosis. *Persoonia*, 30(1), 48–56. <https://doi.org/10.3767/003158513X665539>
- Mehrotra, B. S., & Mehrotra, B. M. (1979). Another azygospore species of *Mucor* from India. *Sydowia*, 31, 94–96.
- Miller, M. A., Pfeiffer, W., & Schwartz, T. (2010). Creating the CIPRES science gateway for inference of large phylogenetic trees. Gateway Computing Environments Workshop (GCE). New Orleans. 1–8. <https://doi.org/10.1109/GCE.2010.5676129>
- MME, Ministério das minas e energia. (2005). Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do Município de Sanharó, Pernambuco. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/ Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios. Recife: CPRM/PRODEEM. https://rigeo.cpm.gov.br/xmli/bitstream/handle/doc/16670/Rel_Sanhar%C3%B3.pdf?sequence=1
- Nguyen, T. T. T., Hyde, K. D., & Lee, H. B. (2019). *Cunninghamella binariae*, *Mucor ardhlaengik*, *Mucor gigasporus* and *Umbelopsis changbaiensis*, newly recorded species from amphibian feces and soil in Korea. *Phytotaxa*, 425(1), 19–34. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.425.1.2>
- O'Donnell, K. L., Ellis, J. J., Hesseltine, C. W., & Hooper, G. R. (1977). Morphogenesis of azygospores induced in *Gilbertella persicaria* (+) by imperfect hybridization with *Rhizopus stolonifer*. *Canadian Journal of Botany*, 55(21), 2721–2727. <https://doi.org/10.1139/b77-311>
- Oliveira, R. J. V., Bezerra, J. L., Lima, T. E. F., Silva, G. A., & Cavalcanti, M. A. Q. (2016). *Phaeosphaeria nodulisporea*, a new endophytic coelomycete isolated from tropical palm (*Cocos nucifera*) in Brazil. *Nova Hedwigia*, 103(1–2), 185–192. https://doi.org/10.1127/nova_hedwigia/2016/0343
- Ronquist, F., Teslenko, M., van der Mark, P., Ayres, D. L., Darling, A., Höhna, S., ... Huelsenbeck, J. P. (2012). MrBayes 3.2: Efficient bayesian phylogenetic inference and model choice across a large model space. *Systematic Biology*, 61(3), 539–542. <https://doi.org/10.1093/sysbio/sys029>
- Santiago, A. L. C. M. A., Hoffmann, K., Lima, D. X., de Oliveira, R. J. V., Vieira, H. E. E., Malosso, E., ... da Silva, G. A. (2014). A new species of *Lichtheimia* (Mucoromycotina, Mucorales) isolated from Brazilian soil. *Mycological Progress*, 13, 343–352. <https://doi.org/10.1007/s11557-013-0920-8>
- Santiago, A. L. C. M. A., Santos, P. J. P., & Maia, L. C. (2013). Mucorales from the semiarid of Pernambuco, Brazil. *Brazilian Journal of Microbiology*, 44(1), 299–305. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822013005000027>
- Schipper, M. A. A. (1978). On certain species of *Mucor* with a key to all accepted species. *Studies in Mycology*, 17, 1–52.
- Stalpers, J. A., & Schipper, M. A. A. (1980). Comparison of zygospore ornamentation in intra- and interspecific matings in some related species of *Mucor* and *Backusella*. *Persoonia*, 11(1), 39–52.
- Stamatakis, A. (2014). RAxML version 8: A tool for phylogenetic analysis and post-analysis of large phylogenies. *Bioinformatics (Oxford, England)*, 30(9), 1312–1313. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btu033>
- Stamatakis, A., Hoover, P., & Rougemont, J. (2008). A rapid bootstrap algorithm for RAxML web-servers. *Systematic Biology*, 57(5), 758–771. <https://doi.org/10.1080/10635150802429642>
- van Tuinen, D., Zhao, B., & Gianinazzi-Pearson, V. (1998). PCR in studies of AM fungi: from primers to application. In A. K. Varma (Ed.), *Mycorrhizal manual* (pp. 387–399). Berlin: Springer; https://doi.org/10.1007/978-3-642-60268-9_24
- Wagner, L., Stielow, J. B., de Hoog, G. S., Bensch, K., Schwartze, V. U., Voigt, K., ... Walther, G. (2020). A new species concept for the clinically relevant *Mucor circinelloides* complex. *Persoonia*, 44(1), 67–97. <https://doi.org/10.3767/persoonia.2020.44.03>

- Walther, G., Pawłowska, J., Alastruey-Izquierdo, A., Wrzosek, M., Rodríguez-Tudela, J. L., Dolatabadi, S., . . . de Hoog, G. S. (2013). DNA barcoding in Mucorales: An inventory of biodiversity. *Persoonia*, 30(1), 11–47. <https://doi.org/10.3767/003158513X665070>
- Walther, G., Wagner, L., & Kurzai, O. (2019). Updates on the Taxonomy of Mucorales with an Emphasis on Clinically Important Taxa. *Journal of Fungi (Basel, Switzerland)*, 5(4), 106. <https://doi.org/10.3390/jof5040106>
- White, T. J., Bruns, T., Lee, S., & Taylor, J. (1990). Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In M. A. Innis, D. H. Gelfand, J. J. Sninsky, & T. J. White (Eds.), *PCR protocols: a guide to methods and applications* (pp. 315–322). San Diego: Academic Press.
- Wijayawardene, N. N., Hyde, K. D., Dai, D. Q., Sánchez-García, M., Goto, B. T., Saxena, R. K., . . . Thines, M. (2022). Outline of fungi and fungus-like taxa – 2021. *Mycosphere: Journal of Fungal Biology*, 13(1), 53–453. <https://doi.org/10.5943/mycosphere/13/1/2>
- Yang, Z., Wu, L., Fu, M., Li, Q., & Ye, D. (2019). Characteristics and kinetic analysis of β -glucosidase (MaBgl) from *Mucor ardhlaengiktus* RSC1. *BioResources*, 14(1), 1626–1638. <https://doi.org/10.15376/biores.14.1.1626-1638>

Manuscript received: December 31, 2022

Manuscript accepted: February 3, 2023

Responsible editor: J. Błaszcowski