



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS - CTG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS - PPGEOC

EDILSON BEZERRA DOS SANTOS FILHO

**ASPECTOS PALEOECOLÓGICOS E TAFONÔMICOS DA PALEOFLORA
CRETÁCEA DA ILHA NELSON, SHETLANDS DO SUL, PENÍNSULA ANTÁRTICA**

Recife/Pe

2024

EDILSON BEZERRA DOS SANTOS FILHO

**ASPECTOS PALEOECOLÓGICOS E TAFONÔMICOS DA PALEOFLORA
CRETÁCEA DA ILHA NELSON, SHETLANDS DO SUL, ANTÁRTICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em
Geociências da Universidade Federal de Pernambuco,
como preenchimento dos requisitos para obtenção do
título de Doutor em Geociências.

Área de Concentração: Geologia Sedimentar e
Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Ribeiro Oliveira

Coorientadores: Profa. Dra. Flaviana Jorge de Lima

Prof. Dr. Alexander Wilhelm Armin Kellner

Recife/Pe

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Santos Filho, Edilson Bezerra dos.

ASPECTOS PALEOECOLÓGICOS E TAFONÔMICOS DA PALEOFLORA CRETÁCEA DA ILHA NELSON, SHETLANDS DO SUL, PENÍNSULA ANTÁRTICA / Edilson Bezerra Dos Santos Filho. - Recife, 2024.

112f.: il.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, Centro de Tecnologia e Geociências - CTG, Programa de Pós-Graduação em Geociências - PPGEOC.

Orientação: Gustavo Ribeiro de Oliveira.

1. Paleoecologia; 2. Tafonomia; 3. Antártica. I. Oliveira, Gustavo Ribeiro de. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

CDD 550

EDILSON BEZERRA DOS SANTOS FILHO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS - CTG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS - PPGEOC

Aprovada em: 14/junho de 2024

Banca examinadora:

Dr ^a . Flaviana Jorge de Lima (UFPE)	Presidente
Dr ^a . Juliana Manso Sayão (PPGEOC-UFPE)	Membro interno
Dr. Cristine Trevisan (INACH)	Membro externo
Dr. André Jasper (UNIVATES)	Membro externo
Dr ^a . Etiene Fabbrin Pires de Oliveira (UFT)	Membro externo
Dr. Antônio Álamo Feitosa Saraiva (URCA)	Membro externo
Dr ^a . Alcina Magnólia Franca Barreto (UFPE)	Suplente interno
Dr. Arthur Souza Brum (UFRJ)	Suplente externo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois sem sua permissão nada acontece.

À minha família, pelo apoio de sempre.

À minha esposa, Thatiany Alencar Batista, por ser sempre minha maior incentivadora nessa jornada do doutorado.

Ao meu orientador, Dr. Gustavo Ribeiro de Oliveira, pelo suporte durante todo esse tempo e pela disposição de sempre para me ajudar.

Ao professor Antônio Álamo Feitosa Saraiva, que foi meu orientador de graduação e mestrado, sendo nesse período, acima de tudo, um grande amigo.

À minha coorientadora e amiga Dra. Flaviana Jorge de Lima, que me acompanha desde a graduação na minha jornada acadêmica, sempre ajudando e aconselhando da melhor forma.

À minha amiga Naiara Cipriano, pelo apoio e pela colaboração na obtenção das imagens em MEV.

A Arthur Souza Brum, pela colaboração na triagem do material, pelas informações de campo e colaborações relevantes.

À professora Juliana Manso Sayão, pelo suporte prestado durante todo o período do doutorado.

Ao professor Alexander Wilhelm Armim Kellner, por me permitir fazer parte do projeto PALEOANTAR para realizar minha pesquisa.

Ao CNPq/CAPES, pelo fomento da minha pesquisa de doutorado através da bolsa de estudos pelo projeto PALEOANTAR. [CNPq/PROANTAR 442677/2018-9; CAPES/PROANTAR 88887.336584/2019-00].

Ao Programa de Pós-graduação em Geociências (PPGEOC), pela estrutura e suporte durante esse período.

A professora Enelise Katia Piovesan, por permitir realizar análise do material no Laboratório de Micropaleontologia Aplicada (LMA), da UFPE.

Ao colega Robbyson Melo, pelo suporte nas análises realizadas no Laboratório de Micropaleontologia Aplicada (LMA).

Ao professor André Jasper, pelo auxílio na identificação de parte do material e por sempre estar à disposição para contribuir.

À amiga Ana Maria de Souza Alves, pela colaboração no processo de metalização de amostras.

Ao CENAPESQ (Centro de Apoio à Pesquisa da Universidade Federal Rural do Pernambuco), pela colaboração no processo de metalização de algumas amostras analisadas neste trabalho.

Ao Laboratório de Crustáceos Do Semiárido (LACRUSE), pelo espaço e suporte para realização da triagem e fotografias de parte do material analisado na tese.

Ao Laboratório de Paleontologia da URCA, que foi minha segunda casa durante toda minha vida acadêmica, fornecendo todo o suporte necessário para o desenvolvimento da minha tese.

Aproveito Também para estender meus agradecimentos aos colegas do laboratório durante este período, especialmente. Nossas conversas divertidas, as colaborações nos trabalhos, a companhia nas escavações, tudo isso sempre deu uma força a mais para seguir em frente.

RESUMO

Fósseis de plantas são comuns na Antártica, representando, em alguns casos, o único registro fossilífero de uma determinada localidade. Entre esses locais, destacam-se as ilhas do arquipélago Shetlands do Sul, na Península Antártica. O material analisado no presente trabalho corresponde a fósseis vegetais coletados na localidade *Rip Point*, noroeste da Ilha Nelson (Shetlands do Sul). Os fitofósseis são provenientes de depósitos piroclásticos e são representados por folhas fragmentadas, *charcoal* e fragmentos de galhos preservados por impressão e compressão, com predominância do gênero *Nothofagus*, além de conter outras angiospermas, gimnospermas e samambaias. Os fósseis da Ilha Nelson são atribuídos ao Campaniano (Cretáceo Superior) por correlação estratigráfica e composição de macroflora com outras localidades. O objetivo deste trabalho foi analisar aspectos tafonômicos e paleoecológicos desses fósseis, buscando entender o modo de preservação; descrever suas interações com insetos herbívoros; contribuir com novos registros de *charcoal* para o Continente Antártico, comprovando a existência de incêndios vegetacionais; identificar a flora da ilha Nelson e comparar seu registro fóssil com elementos de ilhas adjacentes e com a flora atual. Deste modo, aqui são apresentados os primeiros registros de interação inseto-planta para o Cretáceo da Antártica. Também são fornecidas informações tafonômicas dos fitofósseis analisados, assim como novos dados sobre paleoincêndios no Continente. Além disso, foram descritos novos morfotipos foliares que enriquecem o conhecimento sobre a paleoflora do Cretáceo da Península Antártica.

Palavras-chave: Paleoecologia; Tafonomia; fitofósseis; Antártica; Ilha Nelson.

ABSTRACT

Fossils of plants are common in Antarctica, representing, in some cases, the only fossil record of a particular locality. Among these places, the islands of the South Shetlands Archipelago, in the Antarctic Peninsula, stand out. The material analyzed in this study corresponds to plant fossils collected at Rip Point, northwest of Nelson Island (South Shetlands). The phytofossils from pyroclastic deposits and they represented by fragmented leaves, charcoal, and branch fragments preserved by impression and compression, predominantly of the genus *Nothofagus*, as well as other angiosperms, gymnosperms, and ferns. The fossils from Nelson Island are attributed to the Campanian (Late Cretaceous) through stratigraphic correlation and macroflora composition with other localities. The aim of this study was to analyze taphonomic and paleoecological aspects of these fossils, seeking to understand the mode of plant preservation and their interactions with herbivorous insects; contribute new charcoal records for the Antarctic Continent, proving the existence of vegetation fires; identify the flora of Nelson Island and compare its fossil record with elements from adjacent islands and current flora. Thus, the first records of insect-plant interactions for the Cretaceous of Antarctica are presented here. Taphonomic information on the analyzed phytofossils is also provided, as well as new data on paleofires on the Continent. Additionally, new leaf morphotypes have been described, enriching our knowledge of the Cretaceous paleoflora of the Antarctic Peninsula.

Keywords: Paleoecology; Taphonomy; Fossil Plants; Antarctica; Nelson Island.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa do continente Antártico destacando a divisão entre Antártica Oriental e Antártica Ocidental.....	14
Figura 2 - Mapa da região Antártica mostrando os diferentes blocos crustais da Antártica Ocidental. AP, Península Antártica; EWN, montanhas Ellsworth-Whitmore; HN, Haag Nuanataks; PM, Montanhas Pensacola; TI, ilha Thurston.....	17
Figura 3 - A) Localização da área de coleta em <i>Rip Point</i> , Ilha Nelson, Shetlands do Sul, Antártica. B) Perfil estratigráfico do ponto de coleta. Estrela vermelha indicando o ponto de coleta.....	18
Figura 4 - Esquema mostrando como as diferentes formas de fossilização da madeira.....	25
Figura 5 - Tipos de danos (DT's) de galhas para floras do Mesozoico, mostrando uma maior diversidade de galhas no período Cretáceo.....	29
Figura 6 - Localidade <i>Rip Point</i> , Ilha Nelson. A) Local de coleta dos fósseis. B) Nível em que as folhas fósseis aparecem no afloramento. C) Acúmulo de folhas fósseis <i>in situ</i>	35
Figura 7 - Espécime de <i>Nothofagus</i> procedentes de <i>Rip Point</i> , Ilha Nelson. A e B: Foto e desenho do morfotipo NRP1. C e D: Foto e desenho do morfotipo NR.....	39
Figura 8 - A e B: foto e desenho esquemático do morfotipo NRP3. C e D: Foto e desenho esquemático do morfotipo NRP4.....	41
Figura 9 - A e B: foto e desenho do morfotipo NRP5. C e D: Foto e desenho do NRP6.....	43
Figura 10 - A e B) Foto e desenho do morfotipo NRP7. C e D) Foto e desenho do morfotipo NRP8.....	45
Figura 11 - Exemplos de preservação de diferentes partes foliares dos fósseis da ilha Nelson.....	46
Gráfico 01 - Percentual de fósseis analisados, nos quais foram identificadas interação inseto-plantas.....	49
Gráfico 02 - Percentual de minas e galhas observadas nos espécimes analisados.....	50
Figura 12 - A) Espécime 460Pbe. B) desenho esquemático do espécime 460Pbe com ênfase nas estruturas indicadas. C) Detalhe da mina (seta preta) e das galhas (setas brancas).....	51
Figura 13 - Minas foliares presentes nas folhas de <i>Nothofagus</i> sp. da Ilha Nelson (<i>Rip Point</i>): A) Pequena mina serpentiforme entre veias secundárias no espécime 464pbe (similar a DT 105) (escala 5mm); B) Delgada de formato serpentiforme atravessando veias secundárias no espécime 462pbe (similar a DT 141) (escala	

1cm. C) Espécime 470pbe com minas dispostas transversalmente às veias secundárias dos dois lados da lâmina foliar (similar a DT 90) (escala 1cm); D) Mina Circular e bifurcada disposta entre veias secundárias no espécime 461pbe, similar a DT93 (escala 1cm); E) Mina de formato sinuoso, próximo à margem foliar, atravessando veias secundárias e com uma das extremidades curvada no espécime 463pbe, similar a DT41 (escala 1cm); F) Mina retilínea transversal às veias secundárias do espécime 465pbe (similar a DT 90) (escala 1cm); G) Mina disposta no centro da folha, cruzando veias secundárias e principal no espécime 466pbe (similar a DT 41) (escala 5mm).....52

Figura 14 - Minas foliares identificadas nos fósseis: A) Pequena mina que atravessa uma veia secundária no espécime 473pbe, similar a DT 41; B) Retilínea, pequena, cruzando veias secundárias no espécime 472pbe, similar a DT 96; C) Pequena mina entre veias secundárias no espécime 475pbe, em forma de “S”, similar a DT 90; D) No espécime 474pbe, quatro pequenas minas mais profundas, de formato sinuoso, dispostas entre veias secundárias (similar a DT 94); E) Pequena em Forma de “L” entre veias secundárias no espécime 467pbe, similar a DT 105; F) No espécime 468pbe, transversais às veias secundárias, uma maior, próxima à veia principal e outra um pouco menor próxima à margem, similares a DT 105; G) Pequena mina em forma de “V” atravessando veias secundárias, delgada, similar a DT 41 no espécime 469pbe. Barras de escala: 1 cm.....54

Figura 15 - Fragmentos de *macro-charcoal* isolados, coletados em Rip Point, ilha Nelson. Nas amostras, é possível observar cor e brilho, características típicas de *macro-charcoal*.....61

Figura 16 - Diferentes modos de preservação do *macro-charcoal* proveniente da ilha Nelson. A) carvão preservado na matriz rochosa. B) fragmento isolado de carvão silicificado. C) carvão isolado da matriz rochosa. D) fragmentos silicificados incorporados na rocha. Barras de escala: 1 cm.....62

Figura 17 - Paredes homogeneizadas nas amostras de *macro-charcoal* da Ilha Nelson. A) Visão geral das paredes homogeneizadas. B) detalhe das paredes homogeneizadas marcadas em “A”. C) Detalhe aproximado mostrando homogeneização das paredes, sem presença da lamela média.....63

Figura 18 - A) traqueídes. B) pontoações (setas amarelas). C) raios seriados (tracejado amarelo). D) células em campo cruzado. E) detalhe aproximado das paredes homogeneizadas. F) detalhe aproximado de pontoação em traqueídes. Porcentagem de fósseis nos quais foram identificadas interação.....64

Figura 19 - Padrão disperso dos fitofósseis de *Rip Point* mostrando a ausência de fluxo direcional no material. Barra de escala: 8cm.68

Figura 20 - Folhas de *Nothofagus* da ilha Nelson com caracteres de ápice, base ou margem preservados. Barra de escala: 1cm.....71

Figura 21 - Folhas não relacionadas ao gênero *Nothofagus*, provenientes da ilha Nelson, preservadas sem grandes perdas de caracteres.....72

Figura 22 - Fragmentos de galhos provenientes da ilha Nelson preservados como compressão e carbonização. Barra de escala; 1 cm.....	73
Gráfico 03 - Porcentagem de partes preservadas nas impressões foliares da ilha Nelson.....	74
Figura 23 - Exemplo dos principais órgãos vegetais e as principais vias tafonômicas associadas ao registro fóssil.....	75
Figura 24 - Esquema mostrando a associação entre o vulcanismo, sua extensão espacial e os impactos causados nos ecossistemas e na preservação dos fitofósseis.....	77
Figura 25 - A. Aspecto preservacional da acumulação de folhas. B. Detalhe mostrando a espessura fina entre as camadas contendo as folhas fossilizada.....	78
Figura 26 - Paisagem hipotética mostrando diferentes ambientes deposicionais e vias tafonômicas associadas. Setas claras indicam transporte de órgãos vegetais. Setas pretas indicam transporte de sílica. P = piritização.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Lista de todos os espécimes estudados da ilha Nelson e sua distribuição por grupo morfológico.....	47
Tabela 02 - Resumo das interações inseto-planta identificadas na ilha Nelson, Shetlands do Sul.....	55
Tabela 03 - Resumo dos registros de carvão macroscópico fossilizado (charcoal) para o Cretáceo da Antártica.....	66
Tabela 04 - Resumo das principais características tafonômicas dos fósseis de Rip Point, Ilha Nelson.....	79

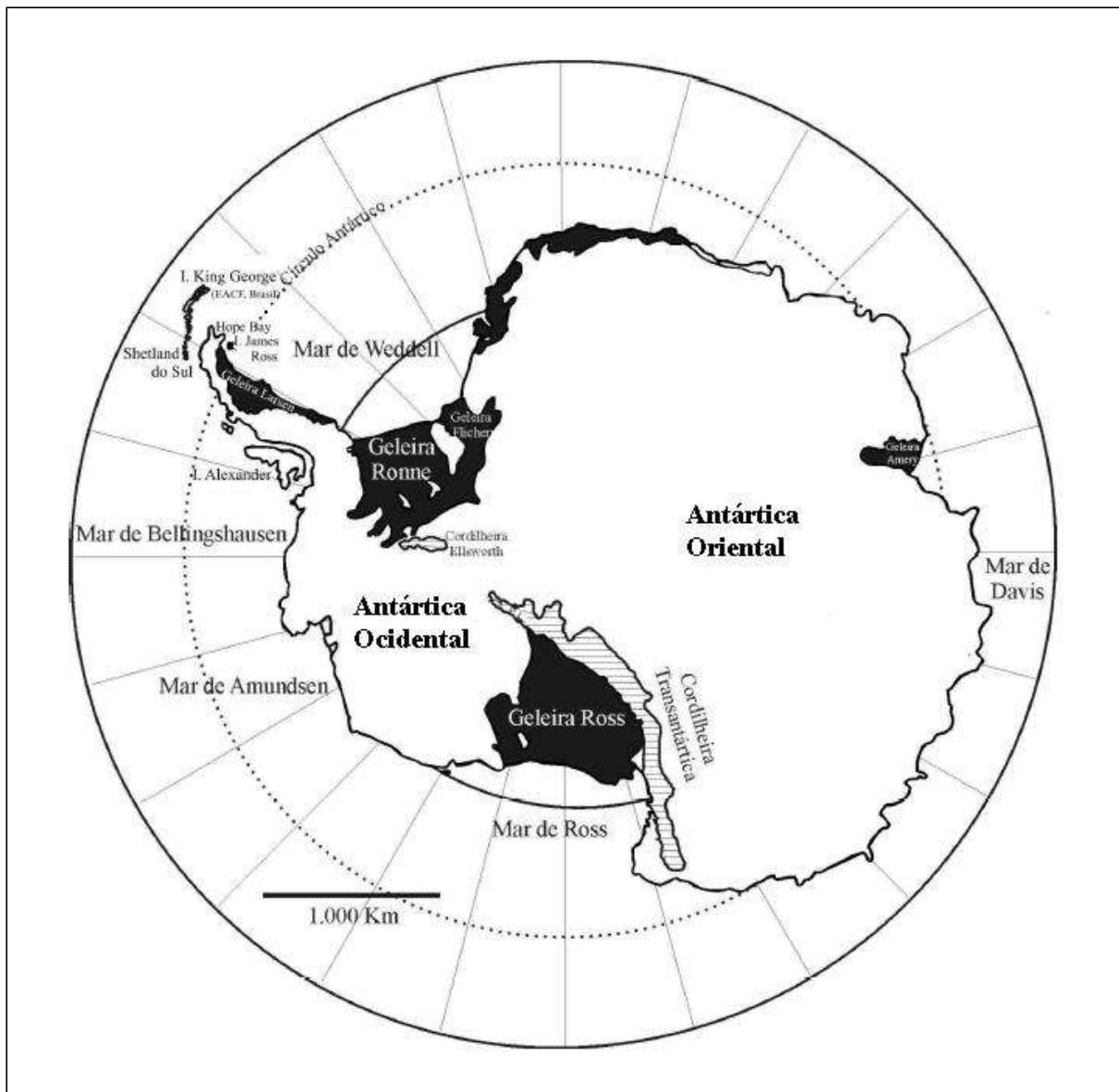
SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
2.	GEOLOGIA LOCAL	16
2.1	PONTO DE COLETA	17
3.	REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1	O REGISTRO PALEOBOTÂNICO NA PENÍNSULA ANTÁRTICA	19
3.2	O REGISTRO PALEOBOTÂNICO NA ILHA NELSON.....	21
3.3	HISTÓRIA E REGISTRO FÓSSIL DE <i>NOTHOFAGUS</i>	22
3.4	REGISTRO DE <i>CHARCOAL</i> NA PENÍNSULA ANTÁRTICA	24
3.5	INTERAÇÃO INSETO-PLANTA NO REGISTRO FÓSSIL E OCORRÊNCIAS NA PENÍNSULA ANTÁRTICA	26
3.6	PROCESSOS TAFONÔMICOS EM PLANTAS FÓSSEIS.....	30
4.	OBJETIVOS	33
4.1	OBJETIVO GERAL	33
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	33
5.	MATERIAL E MÉTODOS	34
5.1	MATERIAL ESTUDADO	34
5.2	LOCAL DE ESTUDO	34
5.3	MÉTODOS.....	35
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
6.4	DESCRIÇÃO DA PALEOFLORA DA ILHA NELSON	37
6.2	INTERAÇÃO INSETO-PLANTA.....	48
6.1	MACRO-CHARCOAL	60
6.3	ASPECTOS TAFONÔMICOS DA PALEOFLORA DAS ILHAS NELSON	67
7.	CONCLUSÃO	80
	REFERÊNCIAS	81
	APÊNDICE A - ARTIGO	96

1. INTRODUÇÃO

O continente Antártico originou-se a partir da fragmentação do Gondwana, tendo se separado das demais massas de terra que compõem o Hemisfério Sul do planeta durante o Mesozoico (BOSE et al., 1990). Este intenso processo de separação está registrado em rochas da África, Antártica e América do Sul (RILEY e KNIGHT, 2004). Atualmente, a Antártica é constituída por duas massas de terra de histórias geológicas distintas: a Antártica Oriental e a Antártica Ocidental (Figura 1), com geologia e registro fóssil distintos (ELIOT, 1991).

Figura 1 - Mapa do continente Antártico destacando a divisão entre Antártica Oriental e Antártica Ocidental.



Fonte: Modificado de DUTRA E JASPER (2010).

A porção oriental é formada por rochas metamórficas, ígneas e sedimentares que variam do Pré-Cambriano ao Permiano (MCLOUGHLIN, 2001; BURTON e RILEY, 2015). Já a porção ocidental é composta por blocos crustais de origens distintas, entre eles a Península Antártica, que apresenta diferentes unidades litológicas, com rochas sedimentares do Paleozoico ao Cenozoico (BURTON e RILEY, 2015).

A Península Antártica se formou como resultado do processo de subducção da placa do pacífico ao longo da porção ocidental da Antártica (CANTRIL e POLE, 2012). O rifteamento, subsequente ao processo de subducção, resultou na formação do estreito de Bransfield e na separação das Shetlands do Sul da Península Antártica. Dessa forma, mesmo estando atualmente separadas da Península, as características litológicas destas ilhas registram uma mudança de condições intra-arco no Cretáceo para condições de arco no Cenozoico (CANTRIL e POLE, 2012; Bastias et al., 2021).

O registro fóssil do Cretáceo na Antártica ocidental tem fornecido informações de grande relevância para o conhecimento das estratégias adaptativas e das relações filogenéticas e biogeográficas dos grupos ali representados, que, por sua vez, são fundamentais para as reconstituições paleogeográficas e paleoambientais do Gondwana (CANTRIL E POOLE, 2012). É na região oeste do continente, especialmente na Península Antártica, que se concentram os depósitos mais significativos, contendo fósseis representantes da flora do Cretáceo.

No final do Cretáceo, florestas subtropicais se desenvolveram devido às condições climáticas úmidas e temperadas (FRANCIS e ASHWORTH, 2008; CANTRIL e POLE, 2012; CANTRILL, 2018). Dessa forma, a paleoflora da Antártica é bastante diversificada (KVAČEK e SAKALA, 2011; CANTRILL e POOLE, 2012; IGLESIAS, 2016). O estudo da paleoflora Antártica é de grande importância para a compreensão do paleoambiente e de eventos paleoclimáticos no continente, bem como para a compreensão dos processos decorrentes da separação dos continentes e na origem, evolução e dispersão da flora moderna do Hemisfério Sul.

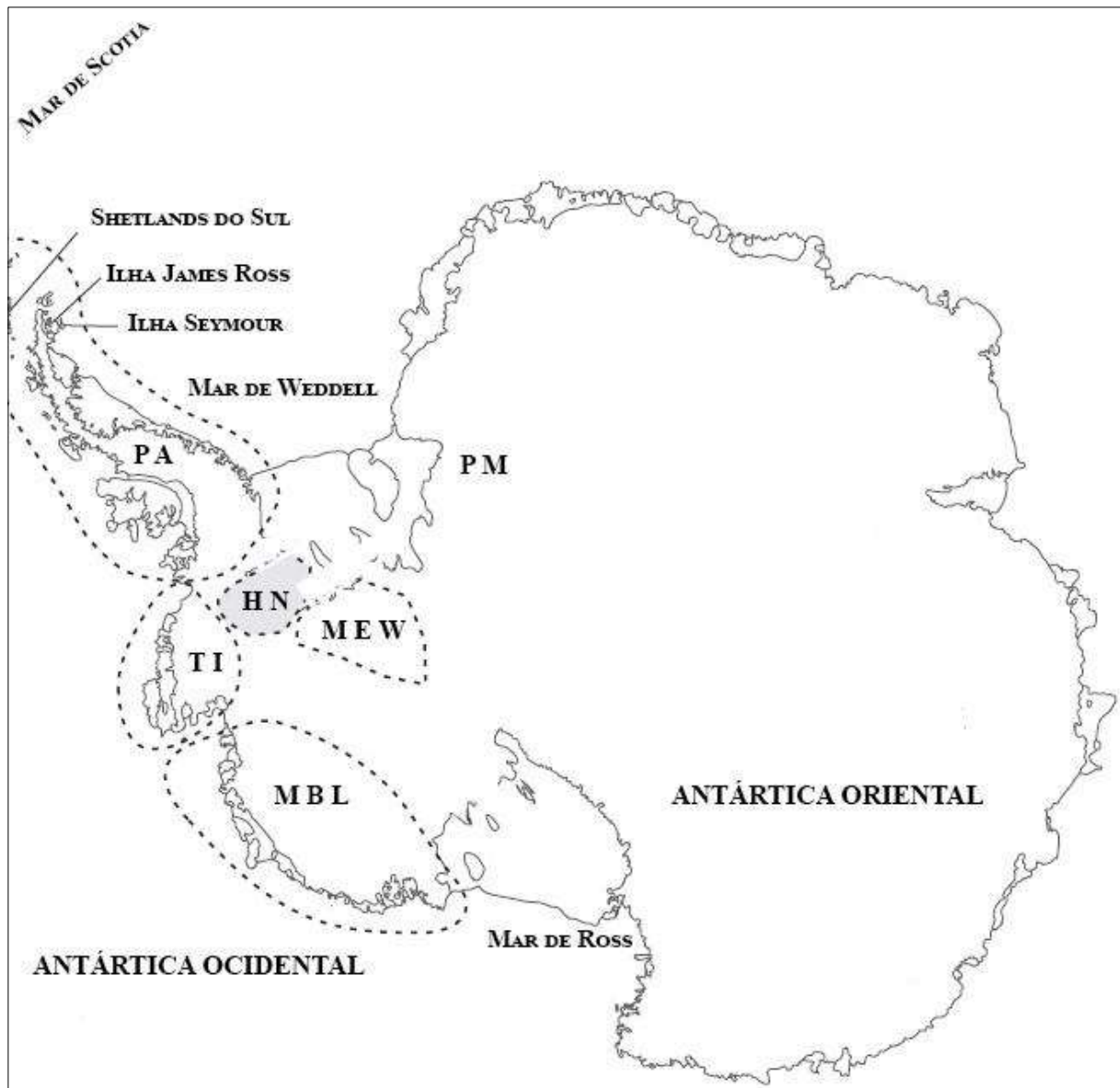
2. GEOLOGIA LOCAL

O início do processo de sedimentação da Península Antártica data do Carbonífero até o Permiano, com deposição em um cenário de subducção. Durante o Permiano, episódios de magmatismo e metamorfismo ocorreram em grande parte da Península Antártica (JORDAN et al., 2020). O magmatismo Triássico é predominante em parte da Península, especialmente ao sul de Graham Land e Palmer Land, até o bloco crustal da Ilha Thurston, com eventos magmáticos de 240-220 Ma. (RILEY et al., 2017; MILLAR et al., 2002).

O intervalo entre os períodos Jurássico e Cretáceo modificou o panorama da Península Antártica, refletindo expressiva evolução tectônica, magmática e deposicional, com o Cretáceo representando a principal fase de magmatismo de margem de arco através da Península (JORDAN et al., 2020). Do Cretáceo Superior ao Neógeno houve uma diminuição progressiva do processo de subducção ao longo da margem da Península Antártica (LARTER e BARKER, 1991), com o fim do magmatismo de arco na Península por volta de 20 MA.

A atual configuração da Península Antártica (Figura 2) resulta da interação de um conjunto de pequenas placas e de seus processos de subducção junto com outros blocos crustais que formaram a porção ocidental da Antártica (MCCARRON e LATER, 1998; MCLOUGHLIN, 2001; CANTRILL, 2018). O registro geológico foi moldado por subducção ao longo da margem do proto-Pacífico e rift no setor do mar de Wedell, que culminou num cinturão montanhoso arqueado que preserva uma complexa história geológica e tectônica, desde o Ordoviciano até os dias atuais (JORDAN et al., 2020). As ilhas Shetlands do Sul formam um conjunto de ilhas com alinhamento SW-NE. Estas ilhas são formadas por rochas de idades que variam Paleozoico Superior ao Cenozoico (HAWKES, 1961; BARTON, 1965; SMELLIE et al., 1984).

Figura 2 - Mapa da região Antártica mostrando os diferentes blocos crustais da Antártica Ocidental. AP, Península Antártica; EWN, montanhas Ellsworth-Whitmore; HN, Haag Nuanataks; PM, Montanhas Pensacola; TI, Ilha Thurston.

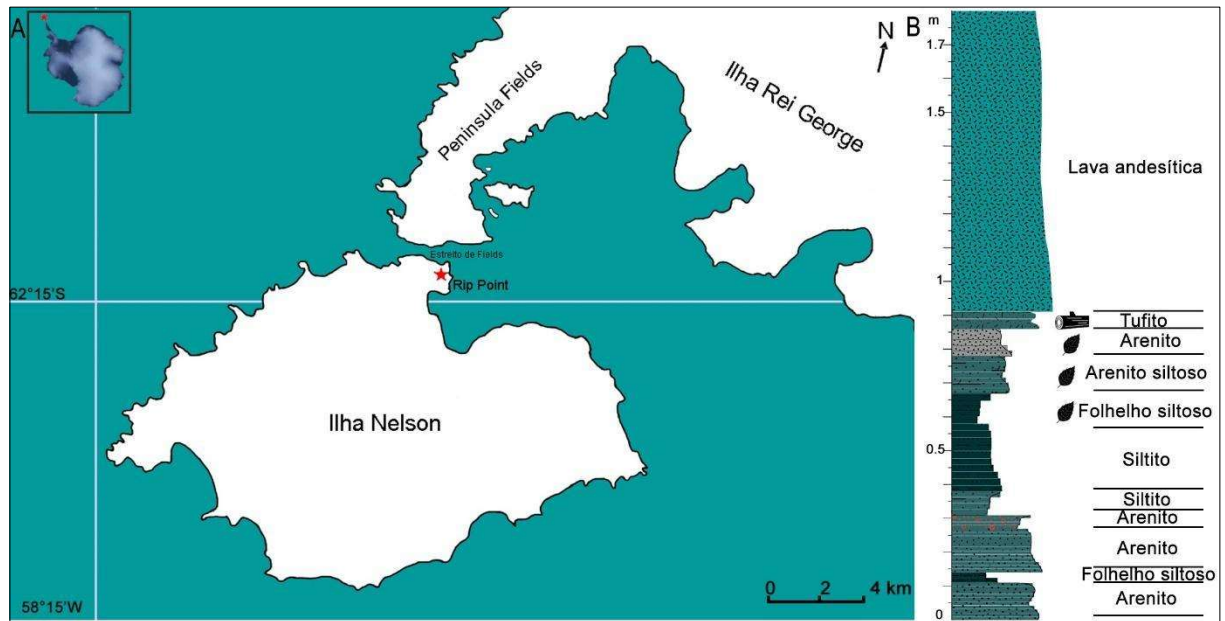


Fonte: Modificado de CANTRILL (2018).

2.1 PONTO DE COLETA

Os fósseis foram coletados na localidade *Rip Point* (Figura 3 A), a noroeste da ilha Nelson ($62^{\circ}14'18.2''\text{S}$, $58^{\circ}58'58.2''\text{W}$), às margens do estreito de Fields que a separa da ilha Rei George. O material está preservado em camadas de arenito, folhelho siltoso e tufitos. (Figura 3 B).

Figura 3 - A) Localização da área de coleta em *Rip Point*, Ilha Nelson, Shetlands do Sul, Antártica. B) Perfil estratigráfico do ponto de coleta. Estrela vermelha indicando o ponto de coleta.



Fonte: Santos Filho et al. (2023).

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 O REGISTRO PALEOBOTÂNICO NA PENÍNSULA ANTÁRTICA

O registro fóssil mostra que florestas já existiam na Antártica desde o Paleozoico, sustentadas por condições climáticas mais quentes, sobrevivendo até o Oligoceno-Mioceno (CANTRILL e POOLE, 2002). Ao longo do tempo, a conformação destas florestas antárticas sofreu mudanças, passando de florestas dominadas por coníferas e samambaias no Cretáceo Inferior, até as florestas compostas por angiospermas, que se estabeleceram durante o Cretáceo Superior e, até hoje, elementos dessa flora vivem em certas áreas do Hemisfério Sul (FALCON-LANG e CANTRILL, 2001; LEPPE et al., 2012).

Os movimentos tectônicos do Cretáceo Superior contribuíram para um intercâmbio de fauna e flora que se encerra no Paleógeno, com a separação total do continente Antártico (CANTRILL e POOLE, 2012). Este fluxo de espécies entre a Antártica e a América do Sul se deu devido à presença de uma ligação entre a Patagônia e a Península Antártica que permitiu a expansão de florestas (CANTRILL, 2018). A história da vegetação que existiu na Antártica está intimamente ligada aos fatores geográficos e climáticos que dominaram e influenciaram diretamente a vegetação presente no continente ao longo do tempo geológico (CANTRILL e POOLE, 2012). Outro aspecto relevante é a importância da Antártica para o estabelecimento dos padrões biogeográficos do Hemisfério Sul, conectando regiões que hoje são totalmente separadas. Um importante exemplo disso é a distribuição disjunta de *Nothofagus* em continentes que formaram o Gondwana, tendo a Antártica como rota de dispersão (CANTRILL e POOLE, 2012). O intervalo de tempo entre o Cretáceo e o Paleógeno é importante na modificação de padrões circum-Antárticos, cortes de conexão e diversificação e dispersão de grupos importantes de plantas (CANTRILL, 2018).

O clima durante o Cretáceo foi caracterizado por temperaturas mais quentes, mas com oscilações, com intervalos de temperaturas mais baixas (PRICE e NUNN, 2010; CANTRILL e POOLE, 2012). O Cretáceo permitiu o estabelecimento de climas temperados quentes que favoreceram que florestas diversificadas se formassem nas altas latitudes (CANTRILL e POOLE, 2012). Estas temperaturas mais quentes estão associadas, possivelmente, aos altos teores de CO² resultantes de atividade vulcânica da época (CANTRILL e POOLE, 2012, 2018).

O Cretáceo Inferior foi caracterizado por abrigar uma flora relativamente uniforme em todo supercontinente Gondwana (CANTRILL e POOLE, 2012), porém, com os sucessivos estudos das assembleias fósseis, as floras demonstraram sinais de provincialismo entre o

Gondwana oriental e ocidental (MCLOUGHLIN, 2001). Esta flora do Cretáceo Inferior, composta predominantemente por coníferas e samambaias, foi dominante em todo o Gondwana, diferenciando-se à medida que ocorria sua separação, assim como pela chegada das angiospermas e por alterações climáticas (CANTRIL e POOLE, 2012).

Durante o Cretáceo Superior as regiões polares eram cobertas por florestas equivalentes às florestas temperadas atuais (CANTRILL e POOLE, 2012). Esta flora era representada por grandes árvores de vida longa e alta produtividade, que mesmo com um regime de baixas temperaturas e sazonalidade de luz, tais fatores não impediram o crescimento das plantas (FALCON-LANG e CANTRILL, 2001; CANTRIL e POOLE, 2012). Estas florestas polares foram inicialmente consideradas como constituídas por plantas perenes, contudo, posteriormente, se considerou florestas mistas de plantas perenes e caducas (CANTRIL e POOLE, 2012). Além disso, outros depósitos do Cretáceo, localizados entre 40 e 60° S de latitude, apresentam táxons (macro e microfósseis) que indicam a presença de plantas perenes (ASKIN, 1989).

A Antártica abrigou importante flora durante o Cretáceo Superior que se restringe à porção ocidental, mais especificamente à Península Antártica, com ocorrências na Bacia de James Ross e no arquipélago das Shetlands do Sul. (CANTRIL, 2018). O Campaniano marca um período de mudança na vegetação com o aparecimento, diversificação e ascensão a dominância de *Nothofagus*, tanto nos registros de pólen (DETTMANN e JARZEN, 1991) quanto de madeira e folhas (POOLE e CANTRILL, 2006).

O intervalo de transição entre o Cretáceo Superior e o Paleoceno tem como característica climas globalmente quentes (CANTRILL, 2018). O clima durante o Cretáceo Superior oscilou entre intervalos mais frios e mais quentes entre o Campaniano e o Limite Cretáceo-Paleógeno (BARRAL et al., 2017; CANTRILL, 2018). Estas oscilações de clima tiveram influência nas floras de alta latitude do Hemisfério Sul, interferindo os aspectos biogeográficos, o que leva a considerar as variações climáticas como fator determinante nos aspectos paleobiogeográficos, não apenas fatores geológicos/tectônicos (CANTRILL, 2018).

Os fósseis encontrados na Península Antártica são a única janela para a vegetação do Cretáceo Superior da Antártica, ocorrendo na Bacia de James Ross e nas ilhas Shetlands do Sul (CANTRIL, 2018). Na Bacia de James Ross, folhas, madeiras e palinomorfs foram registrados na Formação Hidden Lake (Coniaciano) (BARREDA et al., 1999; CANTRILL e POOLE, 2002, 2005; HAYES et al., 2006; SAKALA e VODRÁZKA, 2014), na Formação Santa Marta, Bacia Larsen (Santoniano-Campaniano) (CANTRILL e POOLE, 2002, 2005; HAYES et al., 2006), na Formação Snow Hill (Maastrichtiano) (CANTRILL e POOLE, 2005) e Lopez de

Bertodano (Maastrichtiano-Daniano) (CANTRILL e POOLE, 2005; BOWMAN et al., 2014). Nas ilhas Shetlands, floras do Cretáceo Superior foram registradas na ilha Livingston (REES e SMELLIE, 1989; CHAPMAN e SMELLIE, 1992; POOLE e CANTRILL, 2001), na ilha Rei George (DUTRA e BATTEN, 2000) e na Ilha Nelson (DUTRA, 1998; DUTRA, 2007; BASTOS, 2012; TREVISAN, 2011; MANFROI et al., 2023).

O registro fóssil de vegetação terrestre na Antártica é diversificado e predominantemente representado por folhas (compressões e impressões) e palinomorfos. Contudo, os registros também contam com madeiras, flores e frutos, sendo estes últimos muito mais raros (POLE e CANTRIL, 2006; GANDOLFO et al, 1998; EKLUND, 2003). O registro de folhas fósseis é relativamente abundante (ZASTAWNIAK, 1981; 1994; LI, 1994; ZHOU e LI, 1994; HAYES, 2006; DUTRA e BATTEN, 2000; BASTOS et al., 2012; TREVISAN et al. 2022), mas muitas vezes por ausência de caracteres diagnósticos, é de difícil identificação taxonômica.

A Península Antártica apresenta remanescentes de uma margem continental e arco magmático de idade mesozoica-cenozoica, que apresentam paleoambientes com presença de plantas fósseis (POOLE e CANTRILL, 2006; LEPPE, 2012). Alguns dos locais representativos de paleoflora na Península Antártica são Half Three Point, Price Point, Skua Bay (ilha Rei George), ilhas Snow, Seymour, Vega e Nelson, Alexander (SHEN, 1994; CAO, 1994; DUTRA, 1998; DUTRA e BATTEN, 2000; BASTOS et al., 2012;). Os fitofósseis do noroeste da Península Antártica são comuns e representam distintos intervalos de tempo, sendo essa paleoflora intensamente estudada durante as últimas décadas e se mostrando essencial para o entendimento da origem e distribuição das linhagens evolutivas que hoje estão presentes na América do Sul, Austrália e Nova Zelândia (CANTRILL e NICHOLS, 1996).

3.2 O REGISTRO PALEOBOTÂNICO NA ILHA NELSON

Esta ilha é uma das que formam o arquipélago das Shetlands do Sul, que está isolado da porção continental da Península Antártica pelo estreito de Bransfield (BIRKENMAJER, 1980; 1981; 1982 BIRKENMAJER e ZASTAWNIAK, 1989). A ilha Nelson apresenta um registro fóssil escasso e representado exclusivamente por plantas, dentre estas, samambaias, gimnospermas e angiospermas, com preservação de folhas, troncos e restos carbonizados (*charcoal*), todos restritos à localidade Rip Point (DUTRA et al., 1998; BASTOS et al., 2013; MANFROI et al., 2015; TREVISAN et al., 2022).

A ilha Nelson, assim como as outras ilhas vizinhas, é composta por lavas andesíticas intrusivas, intercaladas por sedimentos vulcanoclásticos (ELIOT, 1988; BIRKENMAJER, 2001). Os níveis fossilíferos da ilha se restringem à sua porção noroeste, na costa do estreito de Fields, que separa as ilhas Nelson e Rei George, com sucessões que se iniciam no nível do mar e atingindo até dez metros (DUTRA et al., 1998; TREVISAN et al., 2022; MANFROI et al., 2015).

3.3 HISTÓRIA E REGISTRO FÓSSIL DE *NOTHOFAGUS*

Os fósseis do gênero *Nothofagus* mostram que sua distribuição foi ainda mais ampla no passado geológico, ocorrendo em diferentes massas que compunham o supercontinente Gondwana, com exceção da África e Índia, o que corrobora a hipótese de que o gênero nunca esteve presente nestes continentes (DETTMAN et al., 1990; HILL, 2001).

O centro de origem de *Nothofagus* foi alvo de vários estudos no passado, dentre eles Van Steenis (1971) e Hill (1993), que propuseram que sua origem estava relacionada a regiões da Austrália. Entretanto, após reinterpretações dos fósseis e novas propostas de centros de origem e rotas de dispersão, atualmente, a Península Antártica é considerada o centro de origem do gênero *Nothofagus* (POOLE, 1992; HILL e DETTMAN, 1996; DUTRA, 1997; DUTRA, 2000).

Embora seja difícil explicar os padrões biogeográficos do Gondwana baseando-se apenas em um único gênero, *Nothofagus* é considerado um gênero de angiospermas importante para a melhor compreensão dos processos evolutivos e de migração da biota do Hemisfério Sul (LINDER e CRISP, 1995; HILL e DETTMAN, 1996). Alguns fatores são importantes para explicar a importância biogeográfica deste gênero, como seu registro fóssil, que data do Cretáceo Superior, a composição distinta do gênero e seu domínio em áreas de clima temperado na Austrália, Nova Zelândia e América do Sul e em altitudes mais elevadas na Nova Caledônia e Nova Guiné (POOLE, 1987; DETMANN et al., 1990; READ e HOPE, 1996). O gênero, único da família Nothofagaceae, foi inicialmente proposto por Karl Ludwing Blume (1851), representado por 43 espécies (HILL e JORDAN, 1993; JORDAN e HILL, 1999; HILL, 2001).

As formas mais antigas de *Nothofagus* do Campaniano são seguidas por uma diversificação no Maastrichtiano na Península Antártica, América do Sul, Nova Zelândia e Austrália, com rotas de dispersão através do continente antártico (DETMANN, 1989). Certamente, *Nothofagus* e outros grupos que apresentam hoje distribuição disjunta em áreas

austrais de latitude média à baixa, tiveram na Antártica o seu centro de origem ou corredor de dispersão durante o Cretáceo Superior (DETMANN, 1989).

Um importante evento de vulcanismo na Península Antártica no Cretáceo Superior pode ter desencadeado a evolução de *Nothofagus*, com rotas transantárticas influenciando no processo de dispersão do grupo para Nova Zelândia e Austrália (DETMANN, 1989). Este processo de irradiação, tanto de *Nothofagus* quanto de outros grupos de plantas, está associado a estes eventos de vulcanismo, ligados ao rifteamento do supercontinente Gondwana, gerando estresses ambientais e contribuindo para a rotatividade de táxons e ao processo de expansão de comunidades de angiospermas (DETMANN, 1989).

No final do Cretáceo, 20% da microflora, associada também à macroflora, já era representada por *Nothofagus* e, durante o Maastrichtiano da ilha Seymour e no Paleoceno das Shetlands do Sul, equivalerá a cerca de 40% das assembleias fossilíferas (DUTRA, 2001; DUTRA e BATTEN, 2000). Isso levou Dutra (1997) a propor uma rota de chegada das Fagales ao Gondwana Sul com base em micro e macrofósseis, corroborando com outros autores (DETMANN et al, 1989) que já consideravam que as formas antigas australianas teriam se originado de formas existentes no Cretáceo em áreas da Península Antártica.

O gênero *Nothofagus* é encontrado em todas as áreas onde são encontradas também espécies atuais do gênero, e na Antártica, particularmente na Península Antártica e ilhas próximas (HAOMIN e ZHEKUN, 2007). Seus primeiros fósseis descritos para a Antártica datam do Cretáceo Superior da Península Fields, ilha Rei George. Fósseis de *Nothofagus* também são encontrados no Campaniano e Maastrichtiano da Nova Zelândia e no Cenozoico da Austrália e da América do Sul (HAOMIN e ZHEKUN, 2007). A Família Nothofagaceae foi definida com base no estudo de pólen de *Nothofagus* por Kuprianova (1962). Novos autores passaram a apoiar a proposta de definição desta família (NIXON, 1989; 1982; JONES, 1986).

Dentre todos os órgãos da planta, o pólen é o mais representativo, tanto geologicamente quanto geograficamente (DETMANN e JARZEN, 1990). Os primeiros fósseis de pólen de *Nothofagus* (Campaniano) no Gondwana Sul foram relatados por Detmann et al (1990), que apontaram diferenças entre as formas de pólen de *Nothofagus* existentes, tratando-o como um tipo ancestral, com características intermediárias entre formas atuais. Essa diferença ajudou a explicar a polaridade na evolução dos tipos de pólen de *Nothofagus* (DETMANN et al., 1960; HAOMIN e ZHEKUN, 2007).

Os primeiros macrofósseis de folhas de *Nothofagus* da Península Antártica foram encontrados na ilha Rei George (Cretáceo Superior) (DUTRA e BATTEN, 2000; ZASTAWNIAK, 1994). Também há registros no Maastrichtiano e Campaniano na Nova

Zelândia, Austrália e América do Sul (TANAI, 1986; POOLE, 1992), sendo que a maioria destas folhas fósseis se trata de impressões e compressões (HAOMIN e ZHEKUN, 2007). Hill (2001) destaca a importância do registro fóssil do gênero *Nothofagus* para o entendimento da biogeografia, paleoecologia e evolução de um gênero que já foi muito diverso no passado, com pico de diversidade no Oligoceno/Mioceno. Haomin e Zhekun (2007) destacam a importância dos fósseis coletados na Antártica para estudar paleogeografia, paleoambiente e mudanças climáticas no continente, assim como a importância de impressões foliares de *Nothofagus* para uma melhor compreensão do gênero.

A partir da década de 1980, fósseis de folhas, madeira e pólen de *Nothofagus* foram relatados para o Cretáceo e Paleógeno em diferentes regiões da Antártica, onde uma ampla revisão foi feita por Cantrill e Poole (2012). Segundo Swenson et al. (2001), a biota austral, incluindo *Nothofagus*, representa fortes ligações entre Austrália e América do Sul, ligando essa distribuição disjunta a uma dispersão em períodos pré-separação do Gondwana, o que já era defendido por Hooker (1853), que atribuía as causas geológicas para a separação da flora do Hemisfério Sul. No entanto, outros autores, como Christenhusz e Chase (2013), discordam da importância de processos tectônicos na distribuição disjunta de alguns gêneros do Hemisfério Sul, como *Nothofagus*. Dutra (2001) propõe uma origem e dispersão de *Nothofagus* a partir da Antártica. Essa origem Antártica tem sido discutida há muitos anos (ASKIN, 1989; DETMANN, 1989), destacando a Antártica e áreas do Sul como origem não só de *Nothofagus*, mas também de outros elementos florais (CANTRILL e NICHOLS, 1996).

3.4 REGISTRO DE *CHARCOAL* NA PENÍNSULA ANTÁRTICA

De todos os produtos gerados por incêndios vegetacionais, o *charcoal* é o que oferece as melhores condições de estudo destes eventos no tempo profundo (BROWN et al, 2012; SCOTT, 2000; SCOTT, 2009). Os relatos mais antigos de depósitos contendo carvão datam do Siluriano e seu registro ocorre em todos os períodos geológicos desde então. Ao longo do tempo geológico há um maior número de assembleias contendo carvão no Carbonífero, Permiano, Jurássico e no Cretáceo, que é considerado um período de intensos eventos de paleoincêndios (JONES, 1994; SCOTT, 2000; GLASSPOL et al., 2004; SCOTT; SCOTT e GLASSPOL, 2005; SCOTT, 2009; BOWMAN et al, 2009; GLASSPOL e SCOTT, 2010; BROWN et al. 2012; JASPER et al, 2021).

Os materiais carbonizados são fruto da combustão parcial de restos vegetais e apresentam, comumente, altos teores de carbono em sua constituição (GOLDBERG, 1985;

FORBES et al., 2006; SCOTT, 2010). A figura 4 mostra as diferentes formas de preservação de madeira fóssil feito por Scott (2010). O carvão pode ser reconhecido por sua forma, cor, brilho e presença de estruturas anatômicas (SCOTT, 2010) e é produzido por eventos de incêndios vegetacionais. Por ser facilmente preservado, a anatomia da planta que o gerou é conservada em pequenos fragmentos, contribuindo para análise anatômica das estruturas preservadas (SCOTT, 1989; SCOTT, 2000; 2001; 2010).

Figura 4 - Esquema mostrando diferentes processos de fossilização da madeira.



Fonte: modificado de Scott (2010).

Os sistemas de incêndio estão associados a determinadas variáveis, dentre elas, o tipo de vegetação, o clima e a concentração de oxigênio atmosférico (BROWN et al., 2012). Por exemplo, a concentração de oxigênio é importante para determinar o quanto o clima exerceu maior ou menor controle na distribuição dos incêndios ao longo do tempo, tendo em vista as oscilações dos teores de pO_2 durante o Fanerozoico (BERNER, 2009; GLASPOOL e SCOTT, 2010; BROWN et al., 2012).

O Cretáceo é um período especialmente importante para o estudo de paleoincêndios vegetacionais e sua importância na dinâmica dos ecossistemas, principalmente por representar um período de clima quente e níveis altos de pCO₂ (SPICER, 2003; BROWN et al., 2012). Há registros de incêndios em todos os continentes durante o Cretáceo, porém a maior parte concentra-se na América do Norte e Europa, com poucas ocorrências para o Hemisfério Sul (BROWN et al., 2012).

Nos ambientes vulcânicos, como na Península na Antártica, o *macro-charcoal* pode ocorrer em uma variedade de rochas, onde as plantas são carbonizadas e soterradas (SCOTT, 2010). Nestes ambientes, os restos vegetais podem ser preservados em diferentes depósitos, por diferentes temperaturas e por distintos intervalos de tempo (SCOTT, 2008). O *macro-charcoal* é comumente relacionado a incêndios locais e pode ser tanto incorporado ao solo local, como pode ser transportado por uma maior distância pela água, principal agente transportador de carvão macroscópico (OHLSON e TRYERUD, 2000; SCOTT, 2010).

O processo de formação da Península Antártica, com marcante influência de vulcanismo, contribuiu significativamente para a preservação desse tipo de fóssil (BIRKENMAJER, 2001; WILLIAN e HUNTER, 2005; REGUERO et al., 2013; LIMA et al., 2021). A Península Antártica preserva uma diversa flora do Cretáceo, composta por uma variedade de grupos. Dentre esses registros, há ocorrências de *macro-charcoal* associados às gimnospermas que compunham as grandes florestas no Cretáceo Superior da Antártica (EKLUND, 2003; MANFROI et al, 2023; LIMA et al, 2021).

Os registros cretáceos de evidências de paleoincêndios na Antártica são escassos, sendo representado por poucas ocorrências. Eklund (2003) e Eklund et al (2004) registraram a presença de madeira e fragmentos vegetais carbonizados, preservando estruturas anatômicas provenientes da Formação Table Nunatak, Cretáceo Superior da Península Antártica. Manfroi et al (2015) identificaram a presença de *macro-charcoal* com detalhes anatômicos bem preservados na localidade *Rip Point*, Ilha Nelson, Cretáceo Superior da Península Antártica. Lima et al (2021) descreveram a ocorrência de *macro-charcoal* atribuídos à gimnospermas na Formação Santa Marta, Cretáceo Superior da Ilha James Ross, Península Antártica. Estes registros de partes vegetais carbonizadas indicam a ocorrência de incêndios florestais na Antártica durante o Cretáceo (MANFROI et al, 2023).

3.5 INTERAÇÃO INSETO-PLANTA NO REGISTRO FÓSSIL E OCORRÊNCIAS NA PENÍNSULA ANTÁRTICA

Como as plantas constituem a base de grande parte dos ecossistemas e os insetos formam o principal grupo de herbívoros da natureza, somando juntos 40% da biodiversidade terrestre atual (PRICE, 2002), é de se esperar que estes dois grupos de organismos apresentem algum tipo de associação, e que estas associações tenham evoluído e se especializado ao longo dos milhões de anos de contínua coevolução (LABANDEIRA, 2002). Desde o final do Siluriano as relações de interação entre insetos e plantas têm evoluído, tornando-se cada vez mais complexas e diversas e, até hoje, dominam os ecossistemas terrestres (LABANDEIRA, 2002, 2006).

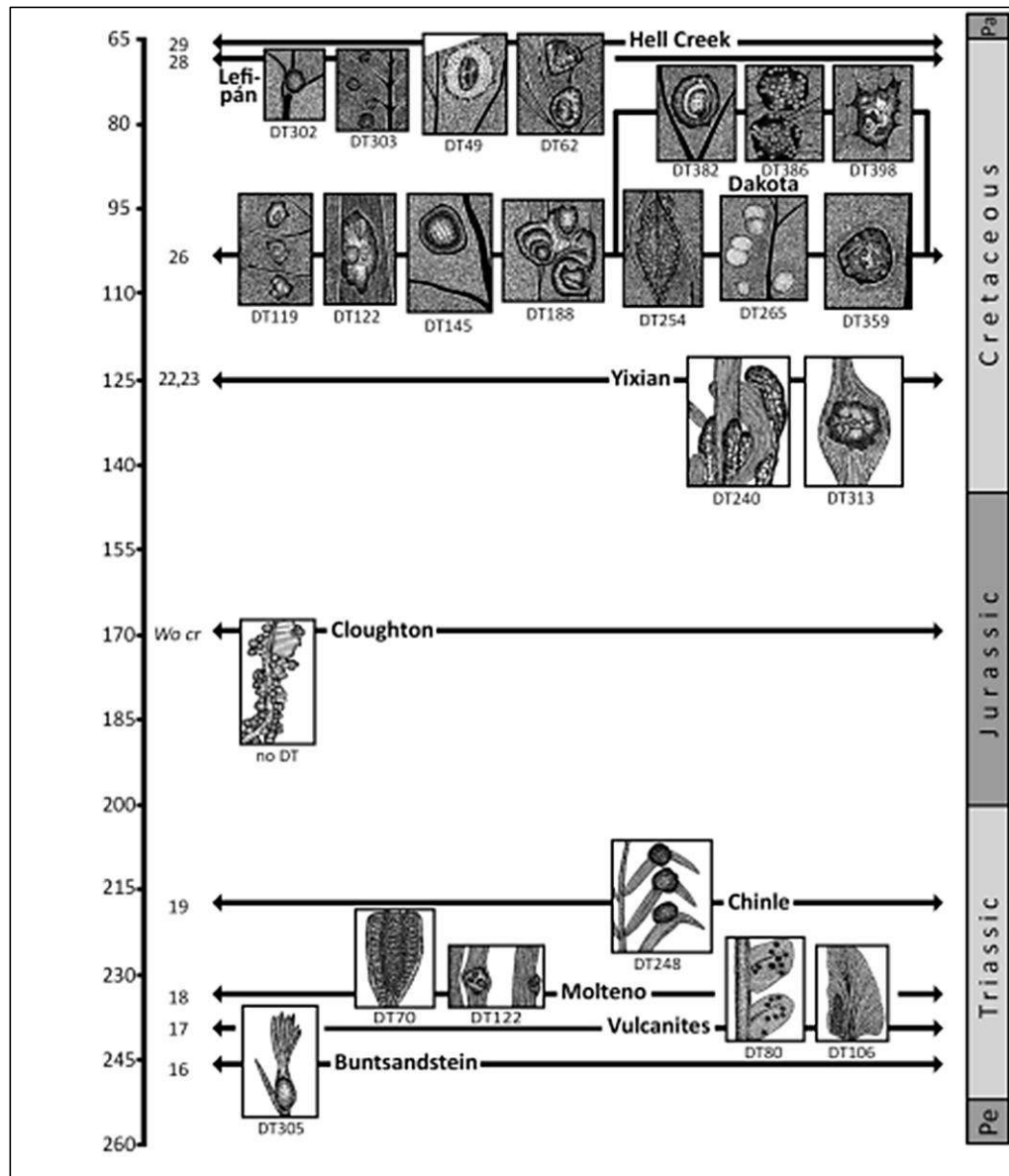
Os vestígios fósseis de atividade biológica são determinantes para o estudo dos organismos ao longo do tempo, principalmente quando estes vestígios fornecem informações diretas sobre o comportamento e associações ecológicas entre diferentes organismos, inclusive de organismos que faltam partes corporais no registro fóssil (LABANDEIRA, 2007; MACCRACKEN et al, 2021). Estes comportamentos incluem as diferentes formas de interação inseto-planta, que fazem parte de uma categoria de registro fóssil especialmente importante para a compreensão de organismos com registro fóssil relativamente pobre, como é o caso dos insetos (LABANDEIRA, 2007; MACCRACKEN et al., 2021).

As evidências de interação inseto-planta são identificadas no registro fóssil logo após as plantas iniciarem o domínio do ambiente terrestre, e seus estudos trazem informações importantes sobre a diversidade de insetos fitófagos em períodos geológicos passados, as dinâmicas das comunidades, o clima e a evolução das formas de interação e coevolução entre plantas e insetos, e como os tipos diferentes de interação foram surgindo ao longo do tempo geológico (GANDOLFO et al., 2021; LABANDEIRA, 2006).

Das diferentes formas de se estudar as interações inseto-planta, os danos causados nas folhas são os mais intensamente estudados (SLATER, 2014). Dentre todos os tipos de interação, as minas foliares são as estruturas mais facilmente reconhecíveis, devido aos seus padrões e formas específicas (SLATER, 2012). Segundo Labandeira (2006), que classificou em quatro fases diferentes a história da evolução da herbivoria e das relações entre artrópodes e plantas, o hábito de mineração surge apenas no Triássico Superior, tardiamente em comparação com outras formas de interação, como a oviposição, a predação de sementes e as galhas, que surgiram ainda no Paleozoico, entre os períodos Siluriano e Devoniano (LABANDEIRA, 2006). As minas foliares são estruturas produzidas pelo consumo de tecido foliar vivo por larvas de algumas ordens insetos (p.ex: Diptera, Coleoptera), enquanto habitam no tecido da planta hospedeira, alimentando-se e crescendo de forma que deixam seu registro na lâmina foliar (LABANDEIRA, 2006; IMADA et al., 2022).

As galhas são estruturas formadas pelo crescimento do tecido foliar, formando tecidos modificados devido à ação do crescimento e de larvas de alguns grupos de insetos indutor de galhas (REDFERN et al, 2002). As galhas apresentam formas e cores diferentes e estas características, junto a um aspecto mais endurecido do tecido produzido, permitem a preservação das galhas, fornecendo bases para analisar suas estruturas externas e, em alguns casos, internas (LABANDEIRA et al, 2007; LABANDEIRA, 2021). Segundo Labandeira (2014), o evento de expansão das angiospermas durante o Cretáceo foi o principal fenômeno para a biologia das galhas, durante o qual houve uma mudança de flora e a mudança de dominância das gimnospermas para as angiospermas. Durante o Mesozoico os padrões de produção de galhas e suas plantas hospedeiras sofreram oscilações devido a eventos ambientais e ecológicos, como recuperação pós crises e o surgimento das angiospermas. A figura 5 mostra os tipos de galhas em floras mesozoicas, exibindo uma maior diversificação no Cretáceo (LABANDEIRA, 2021). As minas e galhas são potencialmente significativas, pois fornecem informações preciosas sobre a ação dos insetos e as respostas das plantas a estes comportamentos dos herbívoros, ao mesmo tempo em que nos ajuda a compreender o funcionamento dos ecossistemas estudados.

Figura 5 - Tipos de danos (DT's) de galhas para floras do Mesozoico, evidenciando uma maior diversidade de galhas no período Cretáceo.



Fonte: Labandeira (2021).

As evidências de atividades de insetos/artrópodes associados às plantas fósseis no continente antártico são escassas. Há registros de perfurações, túneis e coprólitos identificados por Kellog e Taylor (2004) em turfa permineralizada do Permiano Superior (Formação Buckley) das montanhas transantárticas, no Triássico (Formação Fremouw) e Jurássico (Formação Kirkpatrick), onde identificaram coprólitos em diferentes localidades e idades e perfurações em fragmentos de raízes e caules causados por ácaros oribatídeos, sem registro de qualquer outro tipo de dano em outras partes vegetais. Estes registros demonstram que alguns grupos de artrópodes desenvolveram associações com a flora antártica desde o Paleozoico.

Slater et al. (2012) identificaram coprólitos e outras evidências de interação inseto-planta que incluem alimentação de margem foliar, oviposição e galhas em folhas de *Glossopteris* do Permiano de Prince Charles Mouthains, Antártica Oriental. Há também o registro de minas, galhas, esqueletização e consumo de margem foliar em impressões e compressões foliares de Nothofagaceae e Cunoniaceae do Eoceno das ilhas Rei George e Seymour (MCDONALD et al., 2007). Estes eram, até o momento, os poucos trabalhos que reportaram estes tipos de evidências de atividades de insetos em fitofósseis em todo o continente antártico, não havendo, até o presente trabalho, registros cretáceos na Antártica, assim como para o gênero *Nothofagus* no Cretáceo. Os estudos das interações entre plantas e herbívoros são de grande importância para a compreensão das relações entre estes grupos, enriquecendo os aspectos paleoecológicos dos ecossistemas do Cretáceo.

3.6 PROCESSOS TAFONÔMICOS EM PLANTAS FÓSSEIS

Segundo Efremov (1940), a tafonomia é a área de estudo que se dedica a analisar a passagem de restos orgânicos provenientes das biocenoses para a assembleia fóssil. A tafonomia vegetal abrange os processos de transporte até o seu local de deposição, soterramento e litificação, e a análise destes processos pode identificar os fatores que influenciaram tanto no conjunto de fósseis da assembleia como na sua composição taxonômica (GREENWOOD e DONOVAN, 1991). Spicer (1991) define uma assembleia composta por fitofósseis como uma acumulação de partes vegetais derivadas de uma ou várias plantas, depositadas essencialmente nas mesmas condições. Devido às características morfológicas e fisiológicas das plantas, além de sua variedade de órgãos, as assembleias formadas por macrofósseis vegetais se constituem basicamente de órgãos e fragmentos isolados/desarticulados, com raríssimos fósseis preservados por completo (GREENWOOD e DONOVAN, 1991; GREENWOOD, 1992).

As assembleias fósseis compostas exclusivamente por restos de plantas apresentam composição e padrão muito variados e, o fato de seus diferentes órgãos geralmente permanecerem próximos à planta mãe quando se desprendem, sua análise permite reconstruções detalhadas das paleofloras pretéritas (KIDWELL e FLESSA, 1995; HOLZ e SIMÕES, 2002). Em contraste, vale ressaltar o fato da dispersão dos restos vegetais, pois distintos órgãos de uma planta exibem características diferentes (flutuabilidade e resistência, por exemplo), e isto implica na probabilidade de estarem presentes no mesmo depósito sedimentar (HOLZ e SIMÕES, 2002).

O transporte de partes vegetais tem início, na maioria dos casos, de forma aérea, porém, o transporte pela água é mais comum (GRENWOOD, 1996). Características específicas de cada parte vegetal são relevantes para o seu transporte como, dentre outros, tamanho, forma e densidade, e influenciam o transporte aéreo ou aquático (FERGUSON, 1985; SPICER, 1991; GRENWOOD, 1996). Ferguson (1985) observou que em florestas temperadas decíduas a serrapilheira formada tem grande influência das árvores mais próximas, devido ao processo de perda de folhas. Como as assembleias de microfósseis vegetais são basicamente serrapilheiras que se fossilizam, estas são compostas por diferentes partes de plantas, desde folhas, que são os registros mais comuns, até fragmentos de troncos, galhos, sementes, flores e frutos (GRENWOOD e DONOVAN, 1991).

A distância que as folhas podem percorrer depende de suas características como peso e morfologia, onde folhas pequenas e leves percorrem maiores distâncias comparado com folhas mais pesadas e maiores (FERGUSON, 1985; SPICER, 1991). O transporte de folhas em ambiente aquático depende da capacidade que elas têm de se encharcar, das suas propriedades hidrodinâmicas e do tipo de fluxo, mais ou menos turbulento (SPICER, 1989). O transporte de folhas também é influenciado pela taxa de decomposição, que muda de acordo com cada espécie (FERGUSON, 1985; GRENWOOD, 1996). A composição dos depósitos formados por plantas fósseis é influenciada por vieses tafonômicos destas características que influenciam na representação de estruturas e espécies de plantas (GASTALDO, 1992; SPICER, 1989). Um dos principais problemas na análise de concentrações fossilíferas compostas por fitofósseis está na mistura de restos de diferentes comunidades e baixo potencial de algumas espécies ou órgãos vegetais que podem, respectivamente, aumentar ou diminuir artificialmente a riqueza da assembleia (WING e DIMICHELI, 1995).

Depósitos vulcanoclásticos propiciam um ambiente favorável à preservação de restos vegetais, capturando um retrato mais semelhante da biocenose do que ambientes fluviais e deltaicos (WING e DIMICHELI, 1995), contribuindo muito para reconstruções paleoecológicas/paleoambientais e estudos sobre recuperação/sucessão pós catástrofes destes organismos. Tanto a ação mais rápida do processo de deposição e soterramento, quanto a ação da água enriquecida por sílica, contribuem para uma boa preservação em ambientes vulcânicos (BURNHAM, 1993). Tanto a estratégia de vida quanto o tempo de vida dos diferentes táxons vegetais são fundamentais na determinação da quantidade de biomassa produzida e que pode ou não ser preservada no registro fóssil (GASTALDO, 1992).

Dentre os processos tafonômicos mais importantes no que se trata da preservação de partes vegetais, principalmente de folhas, a decomposição atua como processo central na

observação das feições preservacionais de plantas fósseis e devem ser compreendidos o suficiente para contribuir nas análises paleoecológicas (SPICER, 1991). O processo de decomposição é fortemente influenciado pelo clima, pela umidade e pela ação microbiana, que podem retardar ou acelerar este processo (SPICER, 1991). Além da decomposição, o tempo de queda das folhas, a forma e peso por área foliar, a degradação mecânica e o tipo de transporte, também são fatores determinantes em uma análise tafonômica de fitofósseis (SPICER, 1991).

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

Descrever os fitofósseis da ilha Nelson e realizar análises tafonômicas e paleoecológicas dos fitofósseis da ilha Nelson, possibilitando inferências paleoambientais dos ecossistemas cretáceos da Península Antártica.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar e descrever os fósseis, acrescentando novos registros para a paleoflora da Península Antártica;
- Descrever amostras de *macro-charcoal* com a finalidade de aumentar o conhecimento sobre a ocorrência de paleoincêndios na Antártica durante o Cretáceo;
- Comparar a paleoflora identificada com a de ilhas adjacentes na Península Antártica;
- Descrever os processos tafonômicos envolvidos na preservação dos fósseis da ilha Nelson;
- Descrever novos registros de interação inseto-planta identificados nas impressões foliares.

5. MATERIAL E MÉTODOS

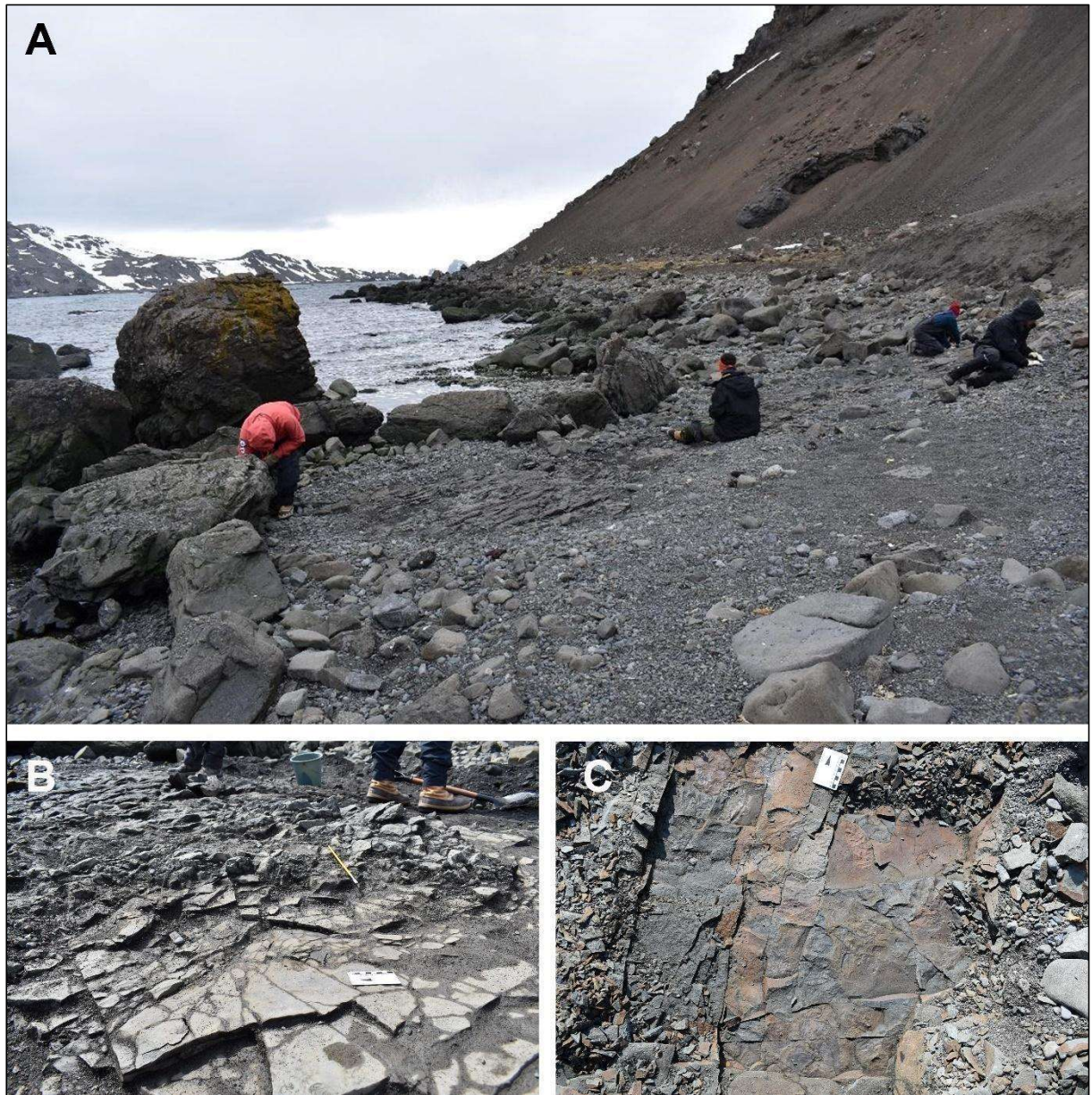
5.1 MATERIAL ESTUDADO

Os fósseis aqui estudados foram coletados pela equipe de pesquisadores do projeto PALEOANTAR, durante a OPERANTAR XXXVIII (2019-2020). Estão depositados na coleção de paleobotânica do Museu Nacional/UFRJ, e encontram-se sob empréstimo ao Laboratório de Paleontologia da URCA (LPU), da Universidade Regional do Cariri (URCA). Os fósseis receberam um número de campo para identificação provisória contendo a sigla Mn-n (Museu Nacional/Nelson).

5.2 LOCAL DE ESTUDO

O material é proveniente da localidade *Rip Point*, noroeste da ilha Nelson (62°14'18.2''S, 58°58'58.2''W) (Figura 6), que faz parte do arquipélago Shetlands do Sul, na Península Antártica. Durante a realização dos trabalhos de campo foram coletados dados sobre a geologia do local e o modo de preservação dos fósseis, a fim de se obter o máximo de informações a respeito de cada fóssil, assim como as características litológicas e posicionamento estratigráfico, permitindo melhores interpretações paleoecológicas e tafonômicas com base nos fitofósseis analisados.

Figura 6 - Localidade *Rip Point*, Ilha Nelson. A) Local de coleta dos fósseis. B) Nível em que as folhas fósseis aparecem no afloramento. C) Acúmulo de folhas fósseis *in situ*.



Fonte: Autor.

5.3 MÉTODOS

Os fósseis foram analisados no Laboratório de Paleontologia da Universidade Regional do Cariri (LPU/URCA), para onde foram enviados provisoriamente após chegar ao Brasil. Para a identificação das interações inseto-planta os fósseis foram analisados com auxílio de lupa/estereoscópio e comparados com fósseis descritos em literatura especializada. Para comparação e classificação dos tipos de danos (DT's), foram utilizadas as determinações publicadas por Labandeira et al. (2007) que melhor descrevem tais estruturas. Para a

identificação de *macro-charcoal*, os fragmentos vegetais carbonizados foram fixados em stubs em cortes transversais e examinados ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

As análises em MEV foram realizadas no Laboratório de Micropaleontologia Aplicada (LMA), na Universidade Federal do Pernambuco (UFPE) utilizando-se microscópio eletrônico modelo Phenom XL de bancada Thermo Scientific, com suporte para amostras até 100x100 mm e EDS integrado; e na Universidade Regional do Cariri (URCA), utilizando-se microscópio eletrônico modelo SU3500 HITACHI.

As amostras foram fixadas com fita de carbono em porta amostras de alumínio. Algumas amostras de *macro-charcoal* passaram pelo processo de metalização com objetivo de captar melhores imagens da sua microestrutura. Para isso, parte dessas amostras foram metalizadas no CENAPESQ (Centro de Apoio à Pesquisa da Universidade Federal Rural do Pernambuco). As demais amostras foram preparadas no Laboratório de Paleobotânica e Evolução de Biomas da Universidade do Vale do Taquari (UNIVATES) e metalizadas no Parque Científico Tecnológico (TECNOVATES), em metalizados Quorum Q150R. Para a metalização das amostras analisadas na Universidade regional do Cariri (URCA), as amostras foram recobertas com uma fina camada de prata (20 nm) utilizando uma metalizadora Q150T ES (Quorum Technologies, Newhaven, Reino Unido). As imagens foram adquiridas em alto vácuo, com uma distância de trabalho de 16,1 mm, utilizando um detector de elétrons secundários (SE) e tensão de aceleração de elétrons de 10 kV. Os fósseis foram medidos com auxílio de paquímetro digital e fotografados com câmera digital (Canon EOS60d) e auxílio de estativa, para auxiliar na observação dos caracteres. O software “image j” foi utilizado para tomar medidas dos fósseis.

A identificação das impressões foliares foi realizada utilizando-se a terminologia proposta por Hickey (1973) e Hickey e Wolfe (1975) e, sempre que possível, atualizada pelo *Manual de Arquitetura Foliar* (ELIS et al., 2009). Após se estabelecer as principais formas de arquitetura foliar representadas nos espécimes, os diferentes morfotipos foram separados individualmente, seguindo propostas realizadas para floras austrais do final do Cretáceo (POLE, 1992; ZASTAWNIAK, 1994; CANTRIL e NICHOLS, 1996; IGLESIAS et al., 2007).

Para auxiliar na observação dos caracteres identificados, todos os morfotipos foram fotografados e desenhados. Das 262 impressões foliares analisadas, foram identificados 08 diferentes morfotipos foliares, que estão preservados por completo ou quase completos.

As análises tafonômicas preliminares se deram por observação do estado de preservação dos fósseis, associado às informações paleoambientais e geológicas para a localidade na qual os fósseis foram encontrados, permitindo inferir fatores que determinaram o modo de preservação dos fósseis, como transporte, degradação, fragmentação, entre outros fatores.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.4 DESCRIÇÃO DA PALEOFLORA DA ILHA NELSON

O termo arquitetura foliar é usado no sentido de apontar a posição e formato dos elementos que caracterizam a forma geral (aspecto) de uma folha, sem considerar histologia, função ou origem (HICKEY e WOLF, 1975). Segundo Hickey e Wolf (1975) as principais características que permitem avaliar afinidades taxonômicas em níveis mais elevados são: organização simples ou composta, formato da margem, características dos dentes, configurações da veia principal e secundárias. A morfologia foliar tem sido muito utilizada para descrever espécies atuais e extintas de *Nothofagus* sp., e estudar as relações evolutivas entre os diferentes táxons (MATHIASSEN et al., 2017).

O material analisado consiste em impressões foliares, majoritariamente fragmentadas, porém, todas as partes foliares são preservadas de alguma forma nos diferentes fitofósseis. O Gráfico 3 mostra as porcentagens de cada parte da folha preservada, levando em consideração as seguintes: apenas ápice preservado, apenas base preservada, apenas parte central da lâmina foliar preservada e folhas preservadas por completo.

Os fósseis associados ao gênero *Nothofagus* apresentam características como caráter pinado, veia principal proeminente, secundárias craspedódromas rectipinadas e terciárias percorrentes (quando visíveis). Além dos espécimes associados ao gênero *Nothofagus* há também espécimes com características que permitem inferir associações com as ordens Laurales, Canellales, Piperales, Myrtales, Pinales, como a forma, base, ápice e textura foliar. Também consta no material fósseis associados ao gênero *Dicotylphyllum*.

O material descrito consta principalmente de espécimes do gênero *Nothofagus*, mas também conta com outros espécimes relacionados às gimnospermas. Os exemplares foram associados taxonomicamente, através de caracteres específicos e comparações morfológicas, que permitiram relacionar os espécimes com outros registros de localidades e idades distintas. As folhas atribuídas ao gênero *Nothofagus* possuem caracteres típicos da família Nothofagaceae, como venação secundária craspedódroma, terciárias percorrentes, margem serrilhada e denteada. A descrição/identificação dos espécimes segue o padrão de classificação em morfotipos, levando em consideração apenas caracteres morfológicos que diferenciam os fósseis. O aspecto fragmentário dos fósseis limita sua descrição a níveis de agrupamentos taxonômicos mais específicos, pois a preservação de detalhes anatômicos mais diagnósticos não foi comum.

No caso do material fragmentado, cada espécime foi associado a um morfotipo através das características morfológicas preservadas, principalmente na forma e no tipo de venação, forma da margem ou outras características que possibilitasse associação. Na designação dos morfotipos utilizou-se a sigla NRP, referente ao local de ocorrência (ilha Nelson/Rip Point). As tentativas de comparação dos fósseis com algumas espécies atuais, seguem as afinidades que constam nos trabalhos de Vento et al. (2018; 2022), nos quais traçam relações entre espécies extintas e vivas de *Nothofagus*.

MORFOTIPO: NRP1 (Figura 07 A, B)

Material: Impressão de folha de *Nothofagus* completa (MNN02425)

Descrição: Folha grande e simples (95 mm), pinada, simétrica, forma elíptica ovalada, base cuneada e ápice obtuso. Margem denteada, com poucos dentes preservados. Veia primária de curso reto, levemente mais delgada próximo ao ápice. 11 pares de secundárias craspedódromas visíveis, de curso reto, tornando-se mais fina em direção ao ápice, com distâncias secundárias e ângulos regulares. Ápice da folha não preservado. Venação de ordens superiores ausentes.

Comparação e observações: O morfotipo NRP1 apresenta caracteres morfológicos que sugerem sua associação à espécie *N. subferruginea* (TANAI, 1986, prancha 9, figuras 7, 10 e 12). As características que permitem essa associação com *N. subferruginea*, que constam na diagnose feita por Tanai (1986), são as veias secundárias craspedródomas uniformemente espaçadas, formato ovalado, a ordem de dentes na margem serrilhada, dentes de ápice agudo. Segundo Tanai (1986), *N. subferruginea* é comparável com *Nothofagus alessandri*, espécie existente atualmente na América do Sul.

MORFOTIPO: NRP2 (Figura 07 C, D)

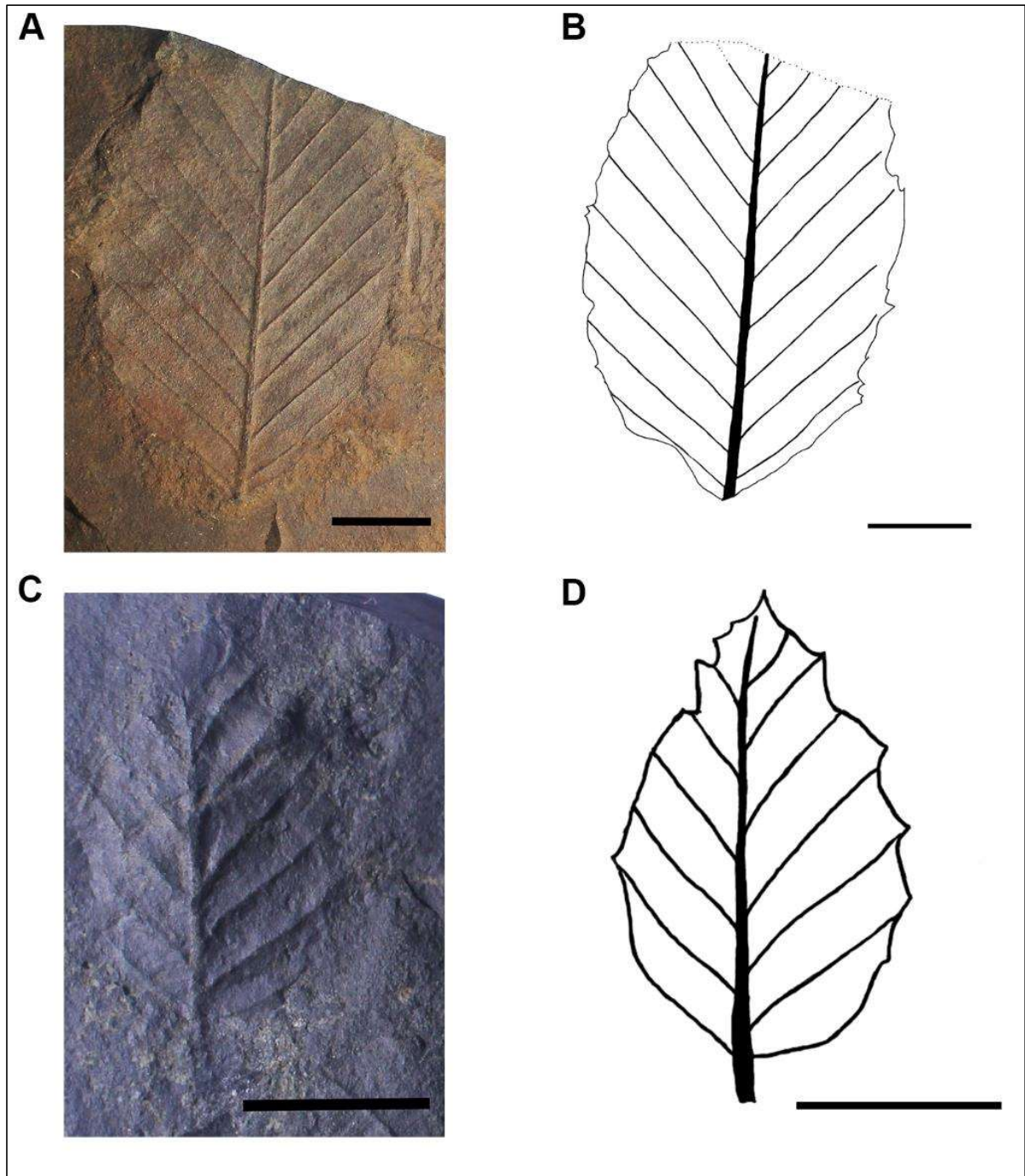
Material: Impressão de folha pequena de *Nothofagus* (MNN02459)

Descrição: Folha pequena (22 mm), simétrica, formato elíptico/oblongo, base e ápice obtusos. Padrão de margem não preservado. Veia de primeira ordem proeminente e de largura regular, de onde partem 5 pares de veias secundárias craspedódromas espessas e proeminentes de curso reto e ângulos regulares entre veias.

Comparação e observações: Os caracteres morfológicos deste morfotipo se enquadram no grupo II das espécies fósseis de *Nothofagus* de Tanai (1986, prancha 12, figura 5) que, segundo este autor, é comparável com a espécie atual *N. pumilio*. Segundo Hill e Jordan (1993), os caracteres permitem também a comparação com *N. gunnii*, espécie atual da Tasmânia. *Nothofagus densinervosa* foi descrita inicialmente na América do Sul (Dusén, 1899, prancha 9,

figuras 14-19), sendo um elemento comum no registro fóssil da América do Sul, principalmente para o Paleógeno (TANAI, 1986). Os caracteres que definem a diagnose feita por Tanai (1986) para *N. densinervosa* que são observados no NRP2 são seu tamanho pequeno, formato elíptico a oblongo, ápice agudo, base arredondada e margem denteada.

Figura 07 - Exemplares de *Nothofagus* procedentes de *Rip Point*, Ilha Nelson. A e B: Morfotipo NRP1. C e D: Morfotipo NRP2. Barras de escala: 1cm



Fonte: Autor.

MORFOTIPO: NRP3 (Figura 08 A, B)

Material: Impressão de folha de *Nothofagus* (MNM02604)

Descrição: Folha simples pinada (43 mm), formato arredondado, margem aparentemente inteira, ápice obtuso e base obtusa. Veia primária de trajeto retilíneo, tornando-se mais delgada em direção ao ápice. Sete pares de veias secundárias craspedódromas, levemente curvadas para baixo. Veias de ordens superiores ausentes.

Comparação e observações: Hill (1984, figura 4 a) descreve espécimes de *Nothofagus gunnii* do Eoceno-Oligoceno da Tasmânia, que apresentam forma da lâmina e margem que permitem comparação com NRP3. Este autor descreve a margem foliar como crenada, o que pode ser característica do morfotipo NRP3, que pode ter sofrido algum tipo de processo que tornou a margem arredondada. *Nothofagus gunnii* trata-se de uma espécie atual da Nova Zelândia que apresenta algumas características como veias secundárias proeminentes que desaparecem/diminuem apicalmente ou próximo à base. Dessa forma, assim como no trabalho de Hill (1984) serão utilizados aqui para associação entre estes espécimes. Estas observações nos permitem associar NRP3 à espécie *N. gunni*, a menos que espécimes melhores preservados indiquem diferenças consistentes.

MORFOTIPO: NRP4 (Figura 08 C, D)

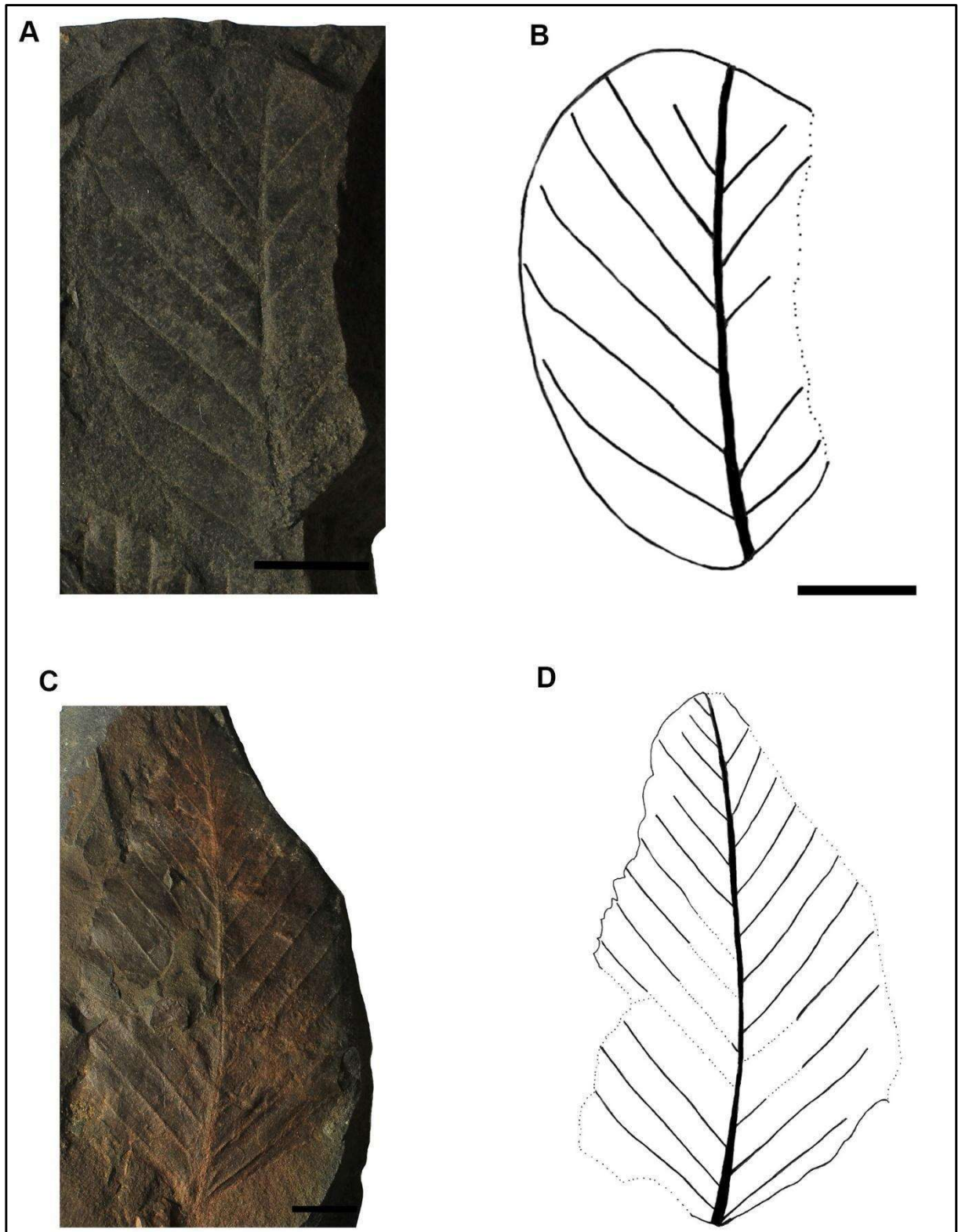
Material: Impressão completa de folha de *Nothofagus* (MNN02512)

Descrição: Folha simples e completa (75 x 46 mm), pinada e assimétrica. Ápice agudo, base cuneada e formato ovalado. Margem denteada com poucos dentes visíveis. Veia primária destacada, levemente arqueada e tornando-se mais delgada próximo ao ápice. Veias secundárias craspedódromas, com 12 pares visíveis, de curso reto, ângulos regulares e distância entre secundárias diminuindo levemente nas veias mais próximas do ápice.

Comparação e observações: Este morfotipo apresenta caracteres que possibilitam associá-lo à duas espécies descritas por Tanai (1986): *Nothofagus variabilis* (prancha 14, figura 8), pelas características de formato foliar ovalado, base levemente arredondada, ápice agudo. Também é comparável com *N. subferruginea* (TANAI 1986, prancha 9, figura 2) pelo ápice agudo, pelo formato levemente assimétrico e pelo padrão de veias secundárias craspedódromas. Segundo Tanai (1986), tanto *N. variabilis* quanto *N. subferruginea* relacionam-se com espécies atuais da América do Sul e da Nova Zelândia. NRP4 também pode ser associado a *Nothofagus novaezealandiae*, do Mioceno da Nova Zelândia (POOLE, 1993, figura 4, d). NRP4 associa-se também à *Nothofagus multinervis* (HAOMIN e ZHEKUN, 2007, figura 1 b, c, h), e compartilha, dentre os caracteres diagnósticos, folha levemente assimétrica, primária levemente curvada,

base larga e cuneada, ápice agudo e margem denteada. Dentre as espécies citadas acima, podemos atribuir/incluir NRP4 na espécie *N. multinervis*.

Figura 08 - A-B: foto e ilustração esquemática do morfotipo NRP3. C-D: Foto e ilustração esquemática do morfotipo NRP4. Barras de escala: 1cm



Fonte: Autor.

MORFOTIPO: NRP5 (Figura 09 A, B)

Material: Impressão de Folha *Nothofagus* (MN02738)

Descrição: Folha grande (65 x 22 mm), pinada, ovalada, ápice agudo e base cuneada. Margem denteada com uma ordem de dente entre veias secundárias. Veia primária proeminente, de curso reto e afinando próximo ao ápice. Secundárias craspedródomas de curso reto e distância e ângulos regulares.

Comparação e observações: NRP5 apresenta aspecto morfológico semelhante a espécie atual *Nothofagus nitida*, espécie perene endêmica das florestas úmidas do sul do Chile e Argentina (MATHIASSEN et al., 2017). Das características observadas que permitem associar NRP5 à *N. nitida*, destaca-se seu formato rombóide trapezoidal (formato ponta de flecha), característica fenotípica da espécie e o seu tamanho, sendo maior que outras espécies. Dentre os morfotipos aqui estudados, NRP5 foi comparado apenas com análogos atuais, porém, preserva algumas características genéricas comparáveis aos outros morfotipos.

MORFOTIPO: NRP6 (Figura 09 C, D)

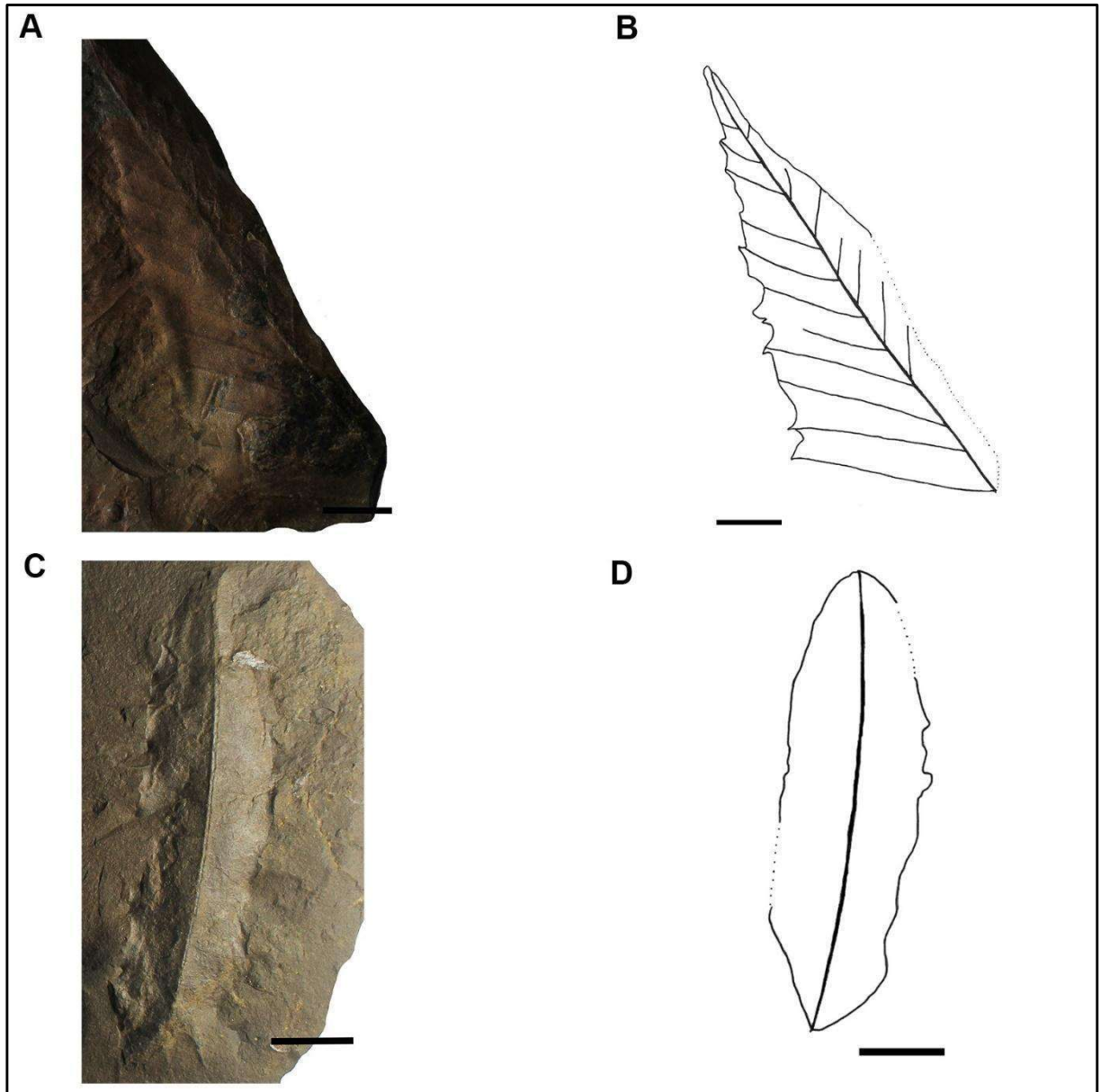
Material: Impressão completa de folha linear (MNN02624)

Descrição: Folha completa (53 x 15mm), linear, elíptica, microfílica assimétrica, com margem inteira. Ápice agudo/arredondado e base aguda. Veia principal pronunciada, levemente arqueada. Venação secundária não preservada.

Comparação e observações: NRP6 apresenta caracteres que permitem sua associação ao gênero *Dicotylphyllum*. Espécimes registrados para outras localidades (JACKES et al., 2014, figura 2) permitem fazer tais comparações e observar a distribuição deste gênero em diferentes localidades e idades. O gênero *Dicotylphyllum* é um elemento comum em depósitos mesozoicos e cenozoicos da América do Sul. A ausência de outros caracteres como venação secundária ou terciária impede que quaisquer outras afinidades sejam determinadas. Em Tosolini et al. (2021, figura 2 d) há o registro de um morfotipo de forma lanceolada, semelhante a NRP6. Neste trabalho, com sete espécimes quase completos, definiram um morfotipo semelhante para o Paleoceno da Ilha Seymour. Fish (2009, figuras 29 e 30) descreve para a Ilha Rei George um morfotipo Cretáceo correspondente à *Dicotylphyllum* sp. que apresenta as mesmas características de forma, venação e ápice de NRP6. Tais características são sua forma

elíptica, ápice agudo e base cuneada, primária pinada. Características de venação de ordem secundária ou superior não são visíveis em NRP6.

Figura 09 - A-B: Foto e desenho do morfotipo NRP5. C-D: Foto e desenho do NRP6. Barras de escala: 1cm



Fonte: Autor.

MORFOTIPO: NRP7 (Figura 10 A, B)

Material: Impressão incompleta de folha pequena (MN0227)

Descrição: Folha pequena (36 x 15 mm), formato ovado/elíptico, simétrica e margem inteira. Ápice obtuso de ângulo agudo e base ausente. Veia primária pinada de curso reto e largura uniforme ao longo da lâmina foliar.

Comparação e observações: Mesmo incompleta, as características descritas para o morfotipo NRP7 mostram afinidade com o morfotipo RIP1 descrito por Bastos (2013, figura 4 a e b) e morfotipo RIP2 (BASTOS, 2013, figura 4 c e d). Bastos (2013) classifica o morfotipo RIP1 no grupo laurofilico (divisão Magnoliophyta), porém como não se preservaram venações de ordens superiores, como descrito por Bastos (2013), não podemos indicar nível taxonômico para NRP7, apenas correlacionar morfologicamente. NRP7 também se compara a espécie *Ficophyllum skuaensis*, descrita por Dutra e Batten (2000, figura 5 a) para a Península Fields, Cretáceo Superior da Ilha Rei George. NRP7 também se compara aos morfotipos laurofilicos de Dutra e Batten (2000, figura 6 c, d).

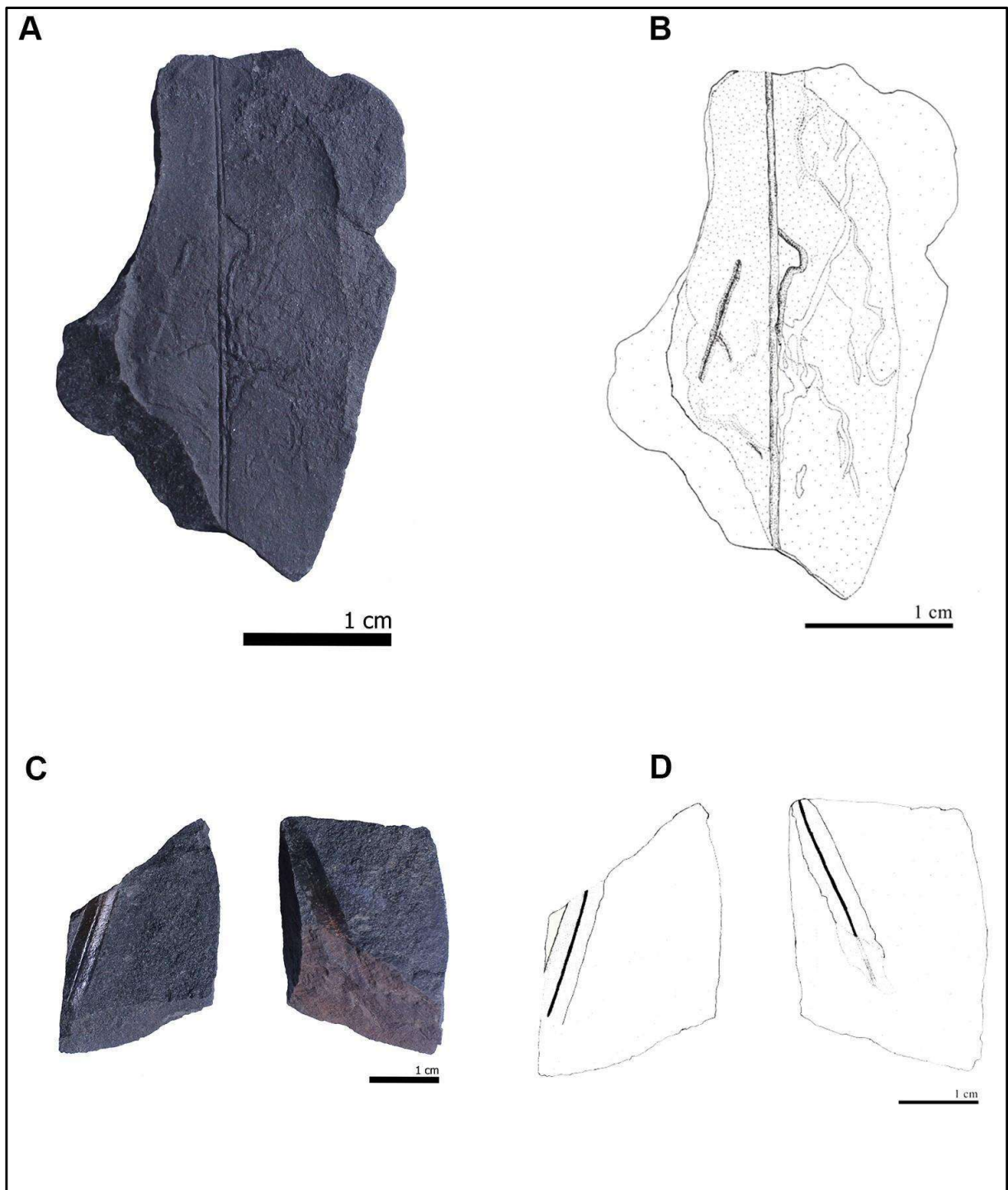
MORFOTIPO: NRP8 (Figura 10 C e D)

Material: Impressão de fragmento de folha linear (parte e contraparte) (MNN02301)

Descrição: Parte principal - impressão de pequeno fragmento de folha linear, lanceolada (20 x 4mm), aparentemente coriácea e simétrica. De margem inteira e veia principal destacada e pinada, de curso reto e largura uniforme. Ápice e base não preservados; Contraparte - impressão pequena (1,9 cm) com as mesmas características, porém, menos preservadas. A qualidade preservacional não é adequada o suficiente para determinar ordens superiores de venação.

Comparação e observações: NRP8 é morfologicamente associado a *Podocarpaceae* pelas características de forma e venação. Esta família é amplamente distribuída em parte da Antártica e América do Sul. De acordo com Quiroga et al. (2016), A família Podocarpaceae é amplamente distribuída em quase todos os continentes do Hemisfério Sul e apresenta grande importância bioestratigráfica. A forma da folha e da veia principal assemelha-se à espécie *Dacrycarpus puertae* (WILF, 2012, figura 12) do Eoceno da Patagônia. O mesmo formato foliar lanceolado foi descrito por Cantril e Falcon-Lang (2001, figura 3 b), porém associado à Araucariaceae. NRP8 também compartilha caracteres descritos por Bastos et al. (2013, figura 3 c, d) para formas similares à *Papuacedrus* sp., com folhas alongadas, superfície com finas linhas paralelas à nervura principal. O fato de NRP8 estar fragmentado impossibilita maiores associações, tanto com o registro fóssil, como também a comparação com espécies atuais. Além disso, compartilha elementos que o associam às famílias Podocarpaceae e Cupressaceae, possibilitando relacioná-lo à ordem Pinales, que engloba estas duas famílias.

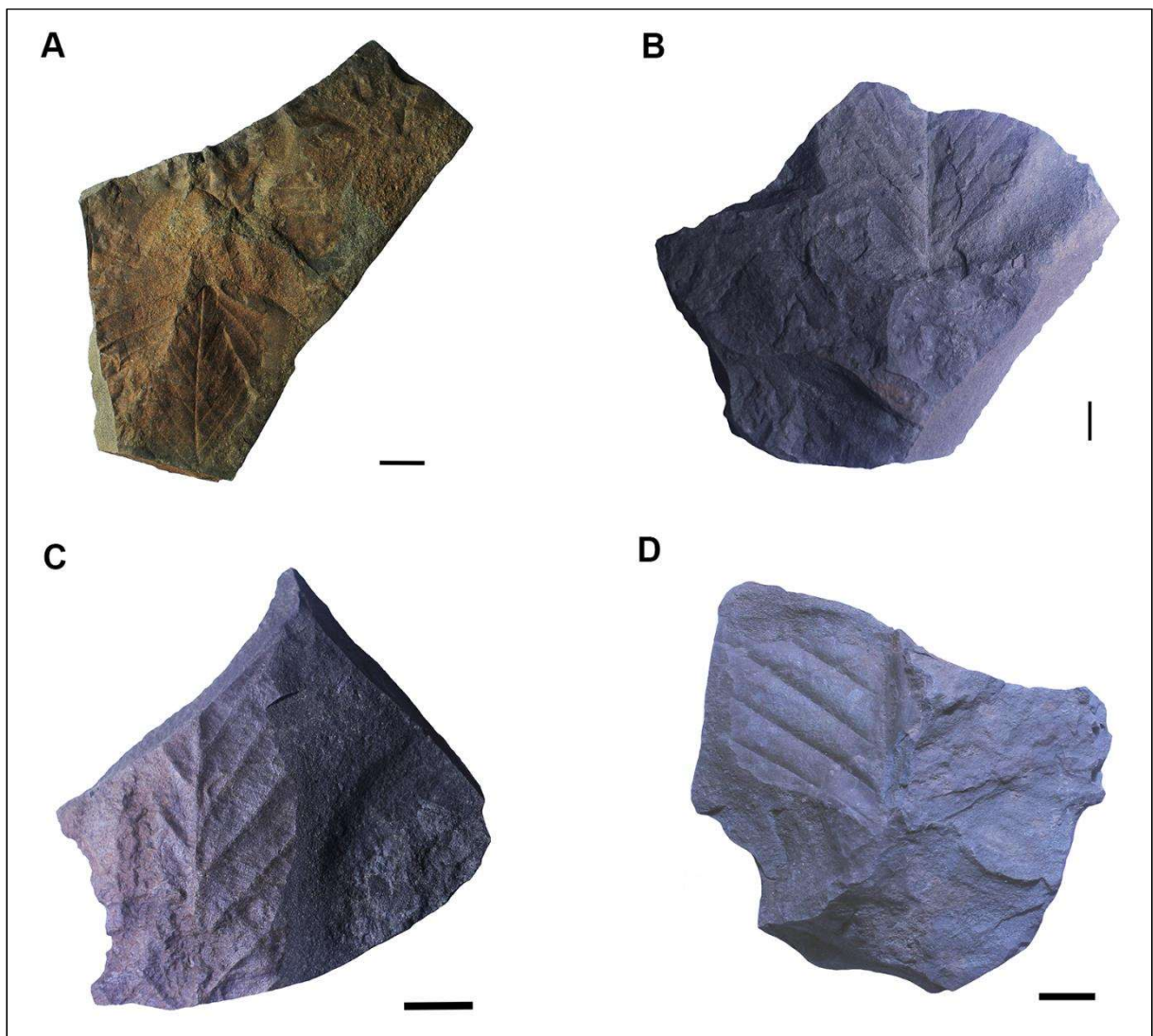
Figura 10 - A e B) Foto e desenho do morfotipo NRP7. C e D) Foto e desenho do morfotipo NRP8.



Fonte: Autor.

A maior parte dos espécimes analisados trata-se de fragmentos preservados de folhas de *Nothofagus* sp., que correspondem a diferentes partes de folhas (ápice, base, centro ou fragmentos de venação). Assim, o foram associados a este gênero pelas características de venação, margem, ápice e base observadas e por comparação com os espécimes completos que formaram os morfotipos (Figura 11 A-D). A Tabela 01 lista todos os espécimes analisados e relacionados ao gênero *Nothofagus* e outros grupos vegetais.

Figura 11 - Exemplos de preservação de diferentes partes foliares dos fósseis da Ilha Nelson. Barras de escala: 1cm.



Fonte: Autor.

Tabela 01 - Lista de todos os espécimes estudados da Ilha Nelson e sua distribuição por grupo morfológico.

MORFOTIPOS FOLIARES DE RIP POINT E ESPÉCIES INCLUÍDOS EM CADA GRUPO MORFOLÓGICO	
Espécimes associados ao gênero <i>Nothofagus</i>	Espécimes associados à outras ordens
Mn-n-02642; Mn-n-02459; Mn-n-02604; Mn-n-02756; Mn-n-02571; Mn-n-02512; Mn-n-0251; Mn-n-02738; Mn-n-0225; Mn-n-0265; Mn-n-0278; Mn-n-0278; Mn-n-02282; Mn-n-02421; Mn-n-02448; Mn-n-02513; Mn-n-02537; Mn-n-02559; Mn-n-02630; Mn-n-02658; S/N; Mn-n-02238; Mn-n-02405; Mn-n-02420; Mn-n-0227-6; Mn-n-0227-5; Mn-n-02482; Mn-n-02747; Mn-n-02589; Mn-n-0273; Mn-n-0248; Mn-n-02233; Mn-n-0261-11; Mn-n-0261-15; Mn-n-021469; Mn-n-02489; Mn-n-02560; Mn-n-02225; Mn-n-02461; Mn-n-02457; Mn-n-02566; Mn-n-0277; Mn-n-02739; Mn-n-02672; Mn-n-02552; Mn-n-02310; Mn-n-0231; Mn-n-02674; Mn-n-02661; Mn-n-02556; Mn-n-0204; Mn-n-02406; Mn-n-02752; Mn-n-02667; Mn-n-0261-6; Mn-n-02375; Mn-n-02375-5; Mn-n-02671; Mn-n-02684; Mn-n-0261-10; Mn-n-02375b; Mn-n-02466; Mn-n-02683; Mn-n-02595; Mn-n-0258; Mn-n-02208; Mn-n-02404; Mn-n-02601; Mn-n-02593; Mn-n-0287; Mn-n-02296; Mn-n-02286; Mn-n-02598; Mn-n-02036; Mn-n-0209; Mn-n-0251; Mn-n-02602; Mn-n-02544; Mn-n-0246; Mn-n-02596; Mn-n-0278; Mn-n-02430; Mn-n-0227; Mn-n-0227-2; Mn-n-02299; Mn-n-0265; Mn-n-02420; Mn-n-02419; Mn-n-02467; Mn-n-02278; Mn-n-02297; Mn-n-02224; Mn-n-02285; Mn-n-02500; Mn-n-02295; Mn-n-02505; Mn-n-02505-3; Mn-n-02505-2; Mn-n-02230; Mn-n-02235; Mn-n-02350; Mn-n-02257; Mn-n-02257-2; Mn-n-02501; Mn-n-02409-2; Mn-n-02324; Mn-n-02303; Mn-n-02420; Mn-n-02369; Mn-n-0249; Mn-n-02423; Mn-n-02491; Mn-n-0207; Mn-n-02506; Mn-n-02227; Mn-n-02378; Mn-n-02229; Mn-n-02487; Mn-n-02221; Mn-n-02524; S/N; Mn-n-02586; Mn-n-02581; Mn-n-02561; Mn-n-02559; Mn-n-02546; Mn-n-02553; Mn-n-02549; Mn-n-02343; Mn-n-02528; Mn-n-02418; Mn-n-02464-2; Mn-n-02368; Mn-n-02473; Mn-n-02485; Mn-n-02486; Mn-n-02446; Mn-n-02446-2; Mn-n-02460; Mn-n-02455; Mn-n-02454; Mn-n-02633; Mn-n-02427; Mn-n-02675; Mn-n-02551; Mn-n-02599; S/N; Mn-n-02538; Mn-n-02598; Mn-n-02616; Mn-n-02620; Mn-n-02292; Mn-n-02517; Mn-n-02563; Mn-n-02560; Mn-n-02569; Mn-n-02567; Mn-n-02572; Mn-n-02564; Mn-n-02550; Mn-n-02566; Mn-n-02337; Mn-n-02409-1; Mn-n-02407; Mn-n-02464; Mn-n-02458; Mn-n-02448; Mn-n-02602; Mn-n-02430; Mn-n-02532; Mn-n-02516; Mn-n-02536; Mn-n-02519; Mn-n-02514; Mn-n-02654; Mn-n-02630b; S/N; Mn-n-02165; Mn-n-02161; Mn-n-02155; Mn-n-02156; Mn-n-02160; Mn-n-02167; Mn-n-02162; Mn-n-02163; Mn-n-02168; Mn-n-02126; Mn-n-02125; Mn-n-0275; Mn-n-02123; Mn-n-02122; Mn-n-0261; Mn-n-0261-2; Mn-n-0278; Mn-n-0278; Mn-n-0271; Mn-n-0274; Mn-n-0244; Mn-n-02243; Mn-n-0212; Mn-n-02309; Mn-n-02233; Mn-n-02465; Mn-n-02370; Mn-n-0210; Mn-n-02405; Mn-n-02422; Mn-n-02302; Mn-n-0273; Mn-n-02307;	Mn-n-02624 Mn-n-0227 Mn-n-02301

Mn-n-02603; Mn-n-02187; Mn-n-02312; Mn-n-0225; Mn-n-02313; Mn-n-02245; Mn-n-02244; Mn-n-02291; Mn-n-02225; Mn-n-02282; Mn-n-0211; Mn-n-02298; Mn-n-02294; Mn-n-02305; Mn-n-02316; Mn-n-02518; Mn-n-02526; Mn-n-02520; Mn-n-02525; Mn-n-02510; Mn-n-02283; Mn-n-02298; Mn-n-0203; Mn-n-0205; Mn-n-0202; Mn-n-0201; Mn-n-02311; Mn-n-02331b; Mn-n-0204; Mn-n-0268; Mn-n-0265; Mn-n-02247; Mn-n-02495	
--	--

Fonte: Autor.

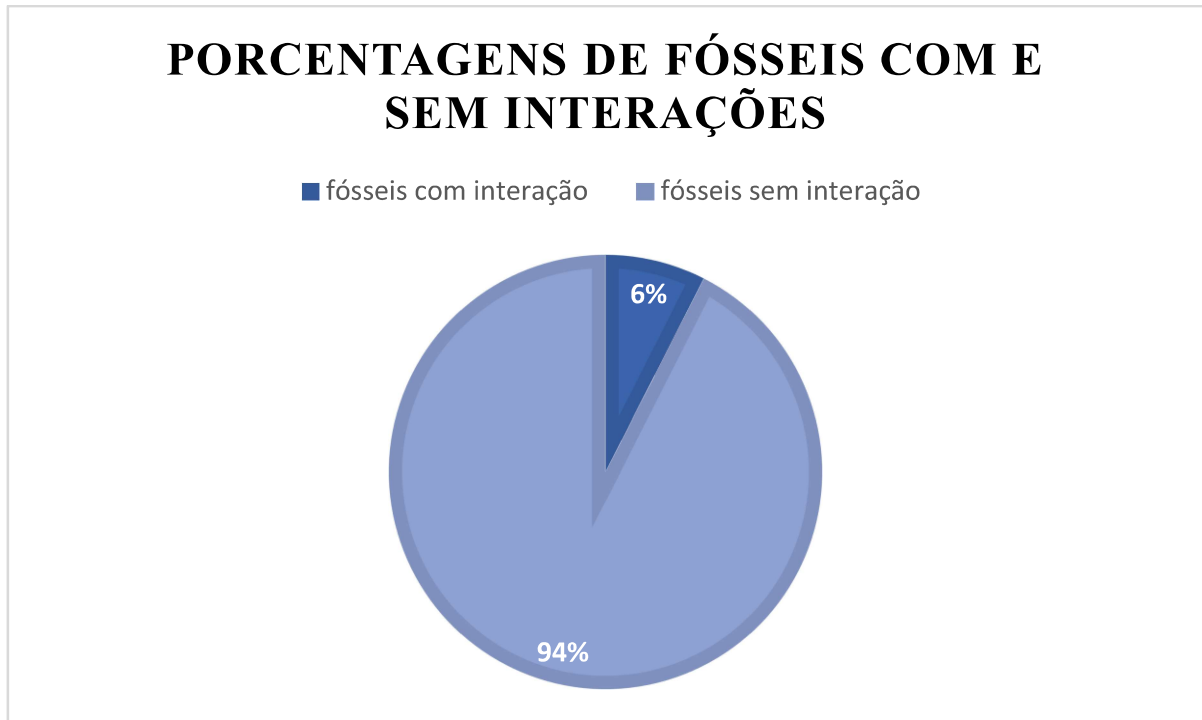
6.2 INTERAÇÃO INSETO-PLANTA

De um total de 200 fitofósseis analisados, 15 (6%) apresentaram marcas de atividade de insetos com graus de preservação, tamanho e forma variáveis (Gráfico 1). As folhas afetadas pertencem exclusivamente ao gênero *Nothofagus*.

As interações aqui descritas são classificadas em dois dos cinco grupos funcionais de alimentação definidos por Colson e Witter (1984) e Beck e Labandeira (1998), sendo as minas e as galhas as evidências identificadas de interação inseto-planta nos espécimes analisados. As galhas são representadas por cicatrizes circulares em um único espécime e as minas apresentam formas, larguras e tamanhos variáveis em diferentes fósseis. Embora as minas se estendam livremente pelas folhas cruzando veias secundárias e terciárias, raramente atravessam a venação principal. O fato de as nervuras foliares não se apresentarem distorcidas indica que os tecidos vasculares não foram consumidos. As minas não apresentam espessamento ao longo de seu trajeto, mantendo-se em largura regulares.

As marcas de interação inseto-planta aqui descritas estão preservadas em impressões de folhas de *Nothofagus*, gênero vegetal comum na Ilha Nelson e em ilhas vizinhas, assim como em outros pontos da Península Antártica e da América do Sul. O aspecto dos fósseis indica uma grande acumulação de folhas, formando um tipo de serrapilheira constituída principalmente por folhas isoladas, indicando a presença de espécies decíduas, formando uma assembleia parautóctone. As folhas são preservadas na forma de impressões, sem conexões orgânicas na sua maioria (raríssimas exceções apresentam folhas pecioladas ou conectadas à ramos), se apresentando na maior parte muito fragmentadas, com a lâmina foliar incompleta e caracteres morfológicos como ápice, margem e base ausentes. O Gráfico 1 mostra a relação entre o número de espécimes analisados e a quantidade de fósseis que preservaram interações.

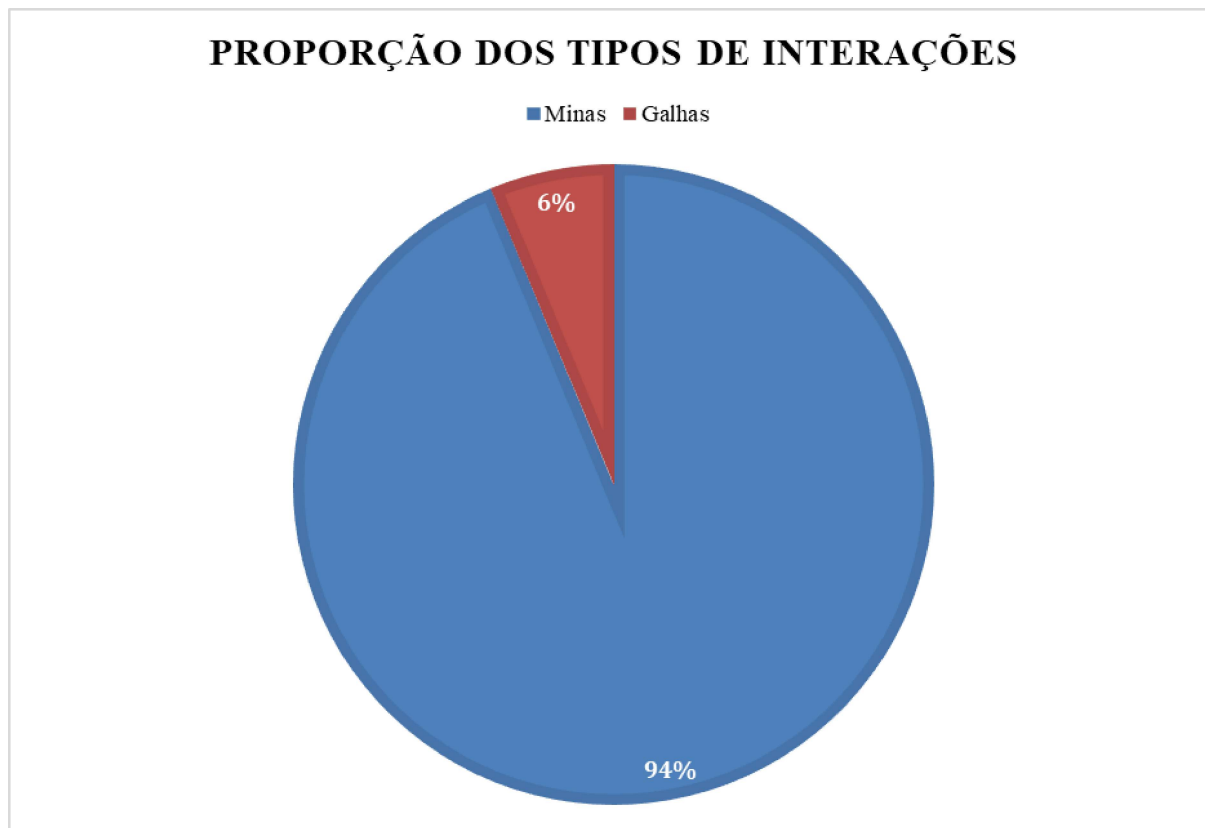
Gráfico 1 - Percentual de fósseis analisados nos quais foram identificadas interação inseto-plantas, mostrando as proporções de fósseis com interação e sem interação.



Fonte: Autor.

O Gráfico 2 mostra a proporção dos diferentes tipos de interação inseto-planta entre os fósseis que preservaram estes vestígios.

Gráfico 2 - Relação entre as proporções de minas e galhas observadas nos espécimes analisados, mostrando o maior número de registros de minas na flora da ilha Nelson.



Fonte: Autor.

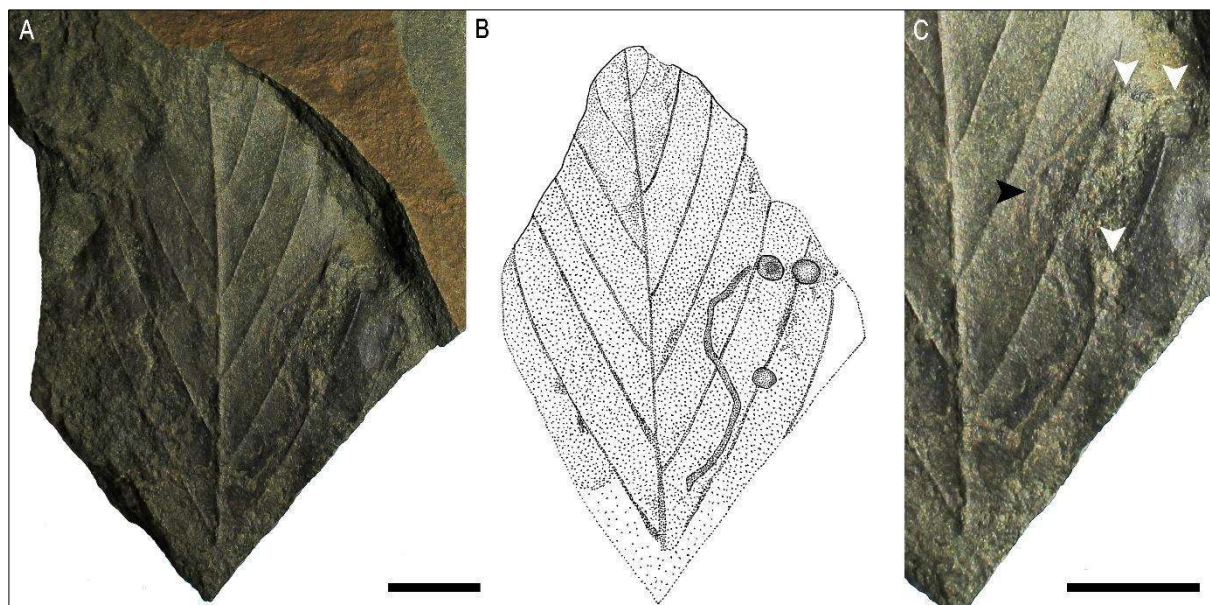
6.2.1. DESCRIÇÃO DOS TIPOS DE DANOS (DTs)

O espécime 460Pbe é representado por uma impressão de folha fragmentada. Este exemplar apresenta uma mina alongada, medindo 44 mm, possuindo forma de “S”. É possível determinar que a mina se inicia próximo à base da folha, seguindo em direção à margem direita, na qual atravessa veias secundárias em seu trajeto (Figura 12 A, B). Além das minas, em 460Pbe, há também duas galhas circulares sobre uma das veias secundárias e entre duas veias, próximo à mina, medindo 3 mm (Figura 11 B, C).

O exemplar 464Pbe é representado por uma impressão de folha fragmentada, medindo 31 x 23 mm. Em 464Pbe, parte de folha permite observar uma pequena mina serpentina (em forma de “S”), medindo 22 mm entre duas veias secundárias (Figura 13 A).

O espécime 462Pbe (55 x 27 mm) contém uma mina pequena, delgada e serpentina, inter cruzando veias secundárias até chegar na margem foliar, medindo 13 mm de comprimento (Figura 13 B).

Figura 12 - Imagens mostrando os dois tipos de interações identificadas. A) Espécime 460Pbe. B) desenho esquemático do espécime 460Pbe com ênfase nas estruturas indicadas. C) Detalhe da mina (seta preta) e das galhas (setas brancas). Barras de escala: 1cm.

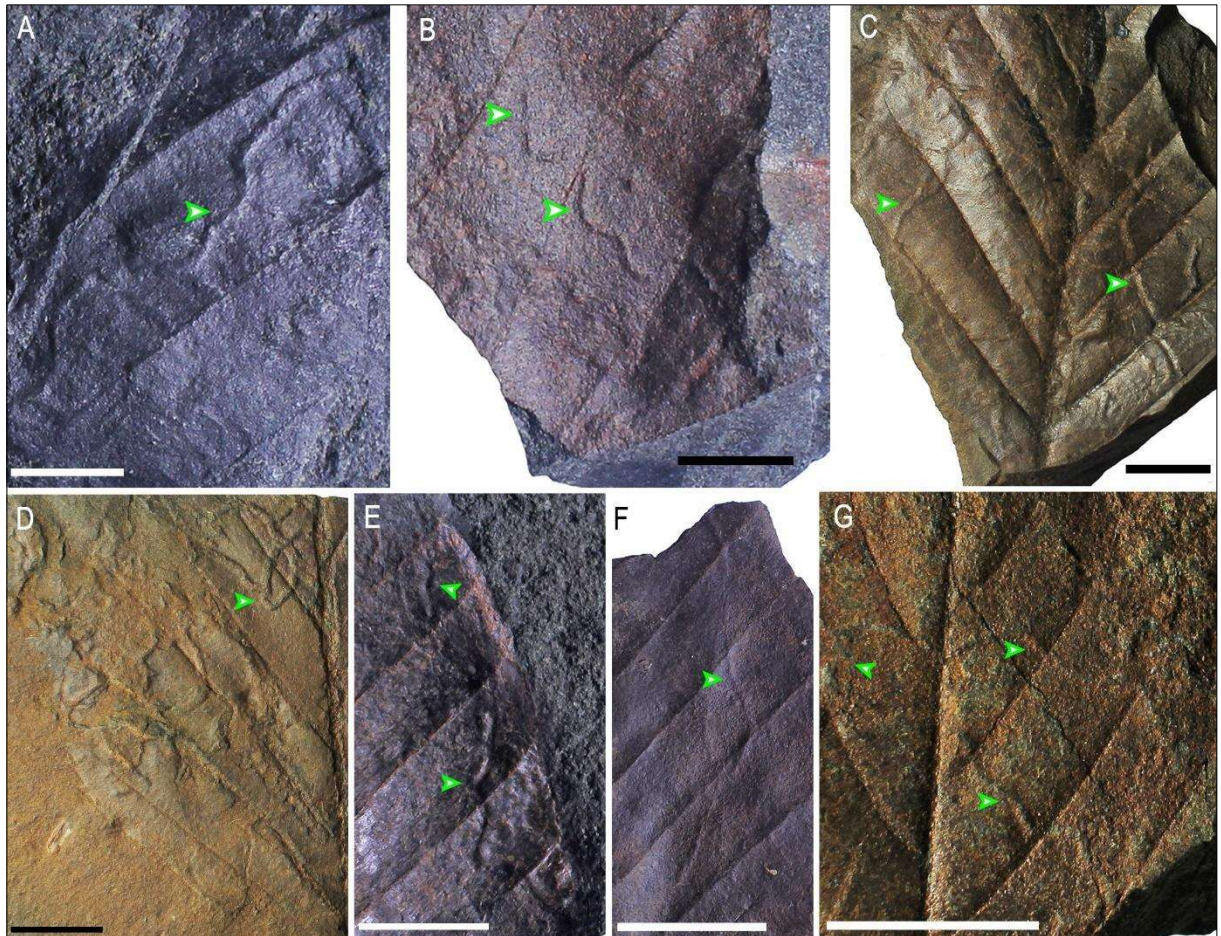


Fonte: Autor.

O espécime 470Pbe (73 x 47mm) contém uma mina retilínea medindo 1.5 mm cruzando veias secundárias na parte esquerda da folha (Figura 13 C). No lado direito da lâmina foliar há uma mina bifurcada em direção a posição da base foliar medindo 20 mm e 12 mm em cada bifurcação. O espécime 461Pbe (64 x 48 mm) apresenta pequenas minas, com destaque para uma de formato circular medindo 30 mm na porção superior da folha, próximo de onde seria o ápice foliar, entre as veias secundárias (Figura 13 D).

No espécime 463Pbe (59 x 36 mm) há uma pequena mina de formato sinuoso, atravessando a venação secundária da folha e próxima à margem foliar medindo 30 mm (Figura 13 E). No espécime 465Pbe (38 x 30 mm) há uma mina retilínea atravessando transversalmente três veias secundárias na direção da base para ápice foliar (ausentes no fóssil), medindo 25 mm (Figura 13 F). O espécime 466Pbe (39 x 30 mm) apresenta duas pequenas minas transversais à veia principal da folha, cruzando a lâmina foliar, sendo que a mina mais superior mede 19mm e a posicionada logo abaixo mede 17 mm, ambas atravessam tanto a venação principal quanto as secundárias, fato que é incomum nas minas observadas no restante do material (Figura 13 G).

Figura 13 - Minas foliares presentes nas folhas de *Nothofagus* sp. da Ilha Nelson (*Rip Point*): A) Pequena mina serpentiforme entre veias secundárias no espécime 464pbe (similar a DT 105) (escala 5 mm); B) Delgada de formato serpentiforme atravessando veias secundárias no espécime 462pbe (similar a DT 141) (escala 1 cm). C) Espécime 470pbe com minas dispostas transversalmente às veias secundárias dos dois lados da lâmina foliar (similar a DT 90) (escala 1 cm); D) Mina Circular e bifurcada disposta entre veias secundárias no espécime 461pbe, similar a DT93 (escala 1 cm); E) Mina de formato sinuoso, próximo à margem foliar, atravessando veias secundárias e com uma das extremidades curvada no espécime 463pbe, similar a DT41 (escala 1 cm); F) Mina retilínea transversal às veias secundárias do espécime 465pbe (similar a DT 90) (escala 1 cm); G) Mina disposta no centro da folha, cruzando veias secundárias e principal no espécime 466pbe (similar a DT 41) (escala 5 mm).



Fonte: Autor.

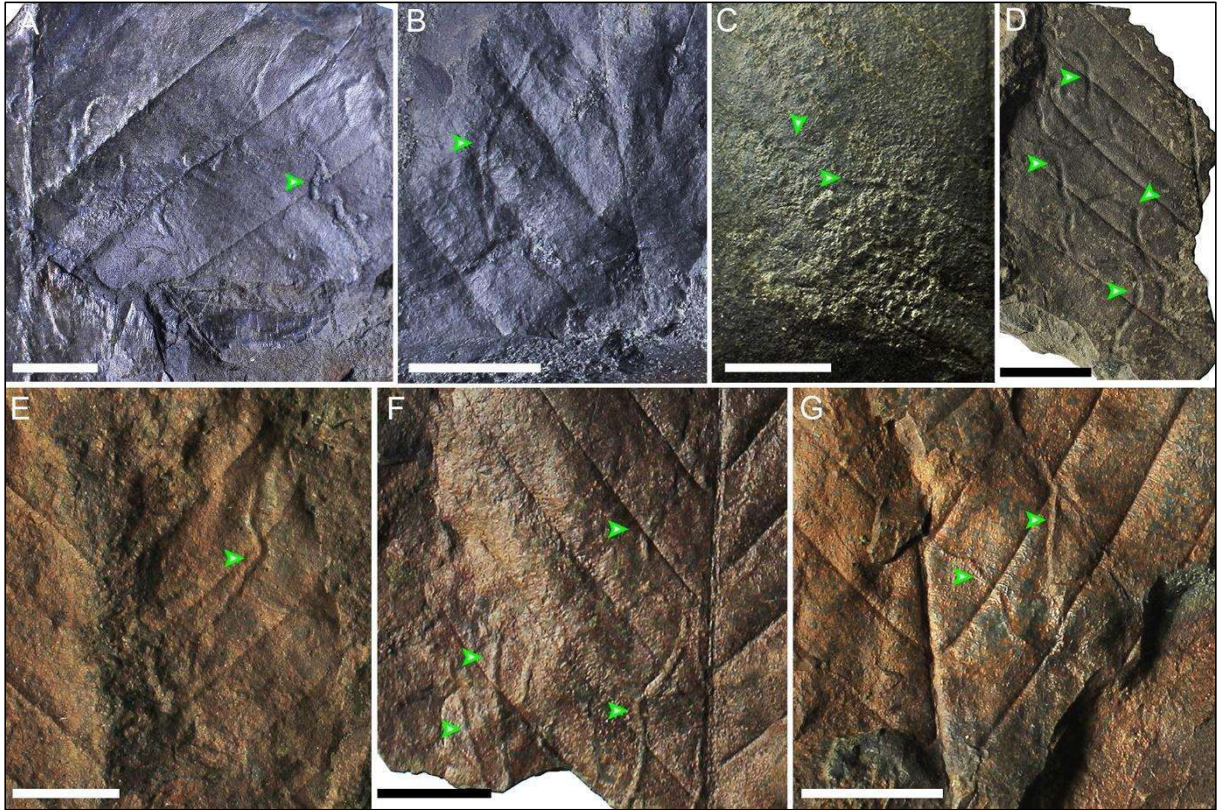
O espécime 473Pbe (74 x 65 mm) trata-se de um fragmento de impressão foliar de parte central (sem ápice, margem ou base preservados) no qual observa-se mina serpentiforme na margem da folha, entre veias secundárias medindo 21 mm de comprimento (Figura 14 A). No espécime 472Pbe (27 x 38 mm) uma pequena mina retilínea a levemente curvada, medindo 17 mm atravessando duas nervuras secundárias em impressão de parte de folha de *Nothofagus* sp. (Figura 14 B).

475Pbe (70 x 60 mm) possui uma mina serpentiforme (forma de S) medindo 17 mm, localizada entre duas veias secundárias, sem cruzar a venação (Figura 14 C). Quatro minas serpentiformes, curtas, de tamanhos variados entre 14 e 15 mm, em direção da margem ao centro da lâmina foliar, estão presentes no espécime 474Pbe (43 x 37 mm) (Figura 14 D). No espécime 467Pbe (60 x 44 mm) foi observada uma mina retilínea medindo 22 mm, curvando-se em seu percurso e cruzando veias secundárias (Figura 14 E).

O espécime 468Pbe (80 x 53mm) trata-se de uma folha um pouco melhor preservada em relação à maioria. Apresenta algumas minas ao longo da lâmina foliar, com destaque para uma maior e mais visível de formato sinuoso medindo 35 mm, que corta quatro veias secundárias, paralela à veia principal (Figura 14 F). 469Pbe (100 x 80 mm) apresenta uma mina curta, fina, em forma de “V”, medindo 2cm de comprimento, atravessando veias secundárias e terciárias (Figura 14 G).

A Tabela 2 apresenta um resumo das interações descritas acima, com associação aos DT's e pequena descrição.

Figura 14 - Minas foliares identificadas nas folhas fósseis da Ilha Nelson: A) Atravessa uma das veias secundárias no espécime 473pbe, similar a DT 41; B) Retilínea, cruzando veias secundárias no espécime 472pbe, similar a DT 96; C) Aparece entre veias secundárias no espécime 475pbe, em forma de “S”, similar a DT 90; D) O espécime 474pbe possui quatro minas mais profundas, de formato sinuoso, dispostas entre veias secundárias, similar a DT 94; E) Em Forma de “L” entre veias secundárias no espécime 467pbe, similar a DT 105; F) No espécime 468pbe, transversais às veias secundárias, uma maior, próxima à veia principal, e outra menor, próxima à margem, similares a DT 105; G) Em forma de “V” atravessando veias secundárias, delgada, similar a DT 41 no espécime 469pbe. Barras de escala: 1 cm.



Fonte: Autor.

Tabela 2 - Resumo das características das interações inseto-plantas identificadas para o Cretáceo Superior da Ilha Nelson, Shetlands do Sul, Península Antártica.

ESPÉCIME	TIPO DE INTERAÇÃO	DT	OBSERVAÇÕES
460Pbe	Mina	94	Pequena, serpentiforme, entre veias secundárias
461Pbe	Mina	93	Circular, bifurcada, entre veias secundárias
462Pbe	Mina e galhas	141	Delgada, serpentiforme, entre veias secundárias
463Pbe	Mina	41	Serpentiforme, uma das extremidades curvadas
464Pbe	Mina	105	Pequena, serpentiforme, entre veias secundárias
465Pbe	Mina	90	Retilínea, transversal às veias secundárias
466Pbe	Mina	41	Pequena, cruzando veias secundárias
467Pbe	Mina	105	Pequena, curvada, entre veias secundárias
468Pbe	Mina	105	Formato sinuoso, próxima à veia principal
469Pbe	Mina	41	Em forma de "V" entre veias secundárias
470Pbe	Mina	90	Pequenas, transversais às veias secundárias
472Pbe	Mina	96	Pequena, retilínea, entre veias secundárias
473Pbe	Mina	41	Pequena, entre veias secundárias
474Pbe	Mina	94	Pequenas, serpentiformes, entre veias secundárias
475Pbe	Mina	90	Pequena, entre veias secundárias

Fonte: Autor.

As associações entre insetos e plantas são aspectos fundamentais nos ecossistemas terrestres, sendo componentes imprescindíveis nas teias alimentares, mostrando-se, ao longo do tempo, muito sensíveis à distúrbios ambientais (WILF et al., 2006; DONOVAN et al., 2014). Considerando que as evidências de atividades de insetos associadas às plantas fósseis no continente antártico são escassas, aqui é registrada a primeira ocorrência para a Ilha Nelson, que poderão auxiliar na compreensão mais abrangente sobre o ecossistema antártico no passado.

As interações identificadas para a Ilha Nelson são representadas majoritariamente por minas foliares, mas há também um único registro de galhas. Essas minas foram produzidas por insetos minadores que apresentam um comportamento alimentar extremamente especializado. Fruto da ação alimentar de larvas, as minas fornecem ao inseto proteção contra predação e desidratação, através da construção de túneis no tecido vegetal (MOLLER, 2017). Já os ovos são depositados por insetos adultos no tecido foliar onde larvas se alimentam e desenvolvem-se dentro do parênquima da planta, formando traços variados (HERING, 1951). As minas preservam detalhes morfológicos informativos para sua determinação nas folhas fósseis, principalmente por sua forma. As minas foliares aqui descritas variam em forma e tamanho e apresentam pouca variação em espessura. Atualmente, os insetos minadores pertencem às ordens Lepidoptera, Diptera, Coleoptera e Hymenoptera (MCDONALD et al., 2007).

Comparando os tipos de danos foliares analisados neste estudo com os materiais analisados por McDonald et al. (2007) para as ilhas Rei George e Seymour (com um total de 2268 espécimes analisados para as duas localidades), as minas aqui descritas representaram um maior número, em relação às cinco descritas McDonald et al. (2007), mesmo com uma amostragem muito menor de fósseis analisados. Além de apresentarmos um percentual mais expressivo, foi possível constatar que há diferenças nos tamanhos e formas e na designação de DT's, que não foram registradas para outras localidades antárticas. Dos trabalhos citados para a Antártica, apenas McDonald et al. (2007) descreveram danos pertencentes a grupos funcionais similares aos descritos no material aqui analisado.

As galhas são formadas por reação fisiológica que provoca crescimento anormal do tecido da planta hospedeira, que fornece proteção e recursos alimentares para larvas em desenvolvimento e são um tipo de interação de alta especificidade, podendo ser identificadas por características como coloração distinta ou formatos e podem ser comparadas com formas atuais (MCDONALD et al., 2007).

As galhas aqui descritas tratam-se de pequenas estruturas circulares no espaço intervenal de folha de *Nothofagus*, próximo a uma mina foliar (espécime Mn-n02537, figura 11 b, c). Nossos resultados indicam uma provável baixa diversidade de insetos herbívoros que é demonstrado pela baixa quantidade de DT's, o que também é observado para o Eoceno da Península Antártica (ilhas Rei George e Seymour) de acordo com McDonald et al. (2007) e contrasta quando comparado com a variedade de danos em outras localidades no mundo, como no Mioceno da Nova Zelândia, onde fósseis de *Nothofagus* apresentaram uma maior variedade de tipos de danos (MOLLER et al., 2017).

A percentagem de fósseis com interação identificadas (6%) corrobora com o percentual identificado na maioria dos trabalhos para o Cretáceo, que oscilam entre 5 e 8% de folhas com interação. Com exceção de algumas localidades *fossillagerstätten* para o Cretáceo, como a Formação Crato da Bacia do Araripe, essa porcentagem pode chegar a até 40% das folhas analisadas, como descrito por Filho et al. (2017). Essa baixa diversidade de danos na Antártica, tanto no Cretáceo Superior (Campaniano) quanto no Paleogeno (Eoceno) pode ter ocorrido, entre outros fatores, devido às variações de temperatura, que é o principal fator limitante para a presença de insetos herbívoros, o que influencia diretamente na quantidade de folhas com danos e na quantidade de danos por folha (MOLLER et al., 2017).

Fósseis de *Nothofagus sp.* do Mioceno da Nova Zelândia apresentaram altas taxas de herbivoria (MOLLER et al., 2017) quando comparadas com amostras do Eoceno da Antártica (ilhas Rei George e Seymour) (MCDONALD et al., 2007). Da mesma forma ocorreu quando comparado ao material aqui analisado, apresentando uma maior diversidade e quantidade de grupos funcionais de alimentação e de tipos de danos.

Entre os dois pontos que reportam interação entre artrópodes e *Nothofagus* na Antártica, a Ilha Rei George (Eoceno) apresentou uma quantidade maior de DT's, incluindo alimentação de margem foliar, galhas, mina e esqueletização (MCDONALD et al., 2007). Em contraste com o registro restrito à minas e galhas do Cretáceo da Ilha Nelson, o que indica uma baixa diversidade de herbivoria em folhas fósseis na Antártica durante o Cretáceo Superior, ou mesmo entre o Cretáceo e o Eoceno. Contudo, o número restrito de trabalhos com interação inseto-planta pode contribuir também para um tendenciamento para essa baixa diversidade conhecida até o momento. As diferenças no número de folhas danificadas por insetos podem ser explicadas por distúrbios ambientais, alterações ecológicas ou mesmo pela forma de preservação dos fósseis (MOLLER et al., 2017). Fatores tafonômicos e deposicionais também podem estar associados ao menor número de folhas com danos preservados na Ilha Nelson.

Segundo Garibaldi et al. (2011) em estudo com *Nothofagus pumilio*, o gradiente latitudinal influencia diretamente nas interações ecológicas, o que influencia tanto na frequência de folhas danificadas, assim como na frequência de danos nas folhas, podendo ser um dos fatores que levam à ausência de outros tipos de danos e grupos funcionais no material da Antártica aqui estudado. A quantidade de artrópodes com potencial para interações com as plantas também decresce com a diminuição da temperatura, que é o principal fator abiótico que afeta os insetos herbívoros (BALE et al., 2002; DEUTHSC et al., 2008).

Segundo Mcquilan et al. (1993) e Hardy et al. (2008), *Nothofagus sp.* pode abrigar até 30 espécies de herbívoros e, ao longo do tempo evolutivo, respondeu a muitas espécies de

invertebrados herbívoros (RUSSEL et al., 2000). O estudo de zoofitófagos associados à *Nothofagus sp.* são escassos, tanto em fósseis quanto em espécies viventes. Segundo Carrilo e Cerda (1987) o número de espécies de insetos fitófagos nas espécies atuais de *Nothofagus sp.* no Chile poderia chegar a 125, sendo Coleópteros, Hemípteros e Lepidópteros as ordens com maior representatividade, incluindo defoliadores, consumidores de madeira, sementes e seiva. Porém, os Dípteros também estão entre os principais grupos de insetos fitófagos relacionados a *Nothofagus antarctica* (G. Forster) Oerst. Outro trabalho com espécies atuais no Chile mostra associações de grupos de insetos de ordens semelhantes às já citadas, também com maior representatividade de Coleópteros e mostrando que a abundância dos grupos de fitófagos não se altera nos diferentes períodos de coleta (VERGARA e JERES, 2010).

De acordo com Reichgelt et al. (2015), os principais invertebrados associados à Nothofagaceas perenes da Nova Zelândia são Coleópteros, Lepidópteros, Dípteros, Phasmatodea e Acari, com maioria entre os Lepidoptera e, com a maioria das espécies de Nothofagaceae abrigando pelo menos quatro espécies de herbívoros defoliadores. Ainda, segundo os autores, Nothofagaceae perenes atuais são eficientes produtoras de produtos químicos defensivos alimentares, tornando as folhas atuais de difícil consumo. Contudo, em espécies decíduas, a produção de defesas químicas para conter a ação de herbívoros é menos eficiente. Nessas últimas também é menor a massa foliar por unidade de área.

No estudo de Reichgelt et al. (2015) foram identificadas marcas de alimentação de folhagem externa, além de esqueletização e galhas, com ausência de outros grupos funcionais de alimentação. Já nos fósseis da Ilha Nelson foram identificados traços referentes a minas e galhas de insetos em diferentes tipos de folhas. Segundo Reichgelt et al. (2015), o principal clado de insetos minadores são os coleópteros podendo, juntos com Lepidoptera e Diptera, serem possíveis causadores dos danos foliares.

A análise dos fitofósseis na Ilha Nelson também sugere a ausência de insetos defoliadores, de aparelho bucal mastigador, pois em nenhum espécime há indícios de áreas consumidas. Atribuir uma mina a algum táxon de inseto está sujeito a muitas limitações, em especial para a Antártica, onde fósseis corporais de insetos são muito raros, levando ao desconhecimento da entomofauna cretácea e, assim, dificultando ainda mais uma possível atribuição taxonômica.

O baixo número de fósseis com minas pode indicar baixa diversidade de insetos herbívoros. Segundo Carvalho et al. (2014), a quantidade de danos pode indicar a presença dos insetos herbívoros, mesmo quando fósseis destes são ausentes, o que acontece na Península Antártica, com raros registros de insetos, limitados apenas a fragmentos corporais. Donovan et

al. (2014) constataram uma queda na diversidade de associações inseto-planta do Cretáceo ao Paleoceno. Esta informação se confirma para a Antártica, que mostra um registro fóssil com menor variedade e quantidade de registros de danos foliares, mas que pode ser subestimado pela escassez de pesquisas com esse objetivo no continente.

O registro de insetos fósseis no continente Antártico é pouco documentado, sendo representado por registros fragmentados que abrangem um intervalo de tempo do Permiano ao Mioceno. Tais registros são relatados na Antártica desde os trabalhos de Zeuner (1959) em depósito do Jurássico, em Hope Bay, Graham Land, na Península Antártica, através da presença de élitros isolados, sem posicionamento taxonômico definido.

Asas de homópteros preservadas junto a fragmentos vegetais do Permiano foram relatadas nas montanhas Theron (PLUMSTEAD, 1962). Um espécime de Odonata do Jurássico foi identificado por Carpenter (1969), em South Victoria Land. O mesmo autor também relata uma ninfa do Permiano na Formação Mount Glossopteris, Ohio Range. Também foram encontrados fósseis de insetos preservados junto com fragmentos de *Glossopteris* sp., representados por fragmentos abdominais incompletos de ninfas semelhantes às descritas por Carpenter (1969). Um fóssil corporal quase completo de Blattodea, bem como élitros e traços preservados foram relatados por Bomfleur et al. (2011).

Ashworth et al. (2007) identificaram duas espécies de coleópteros (Curculionidae) do Mioceno das montanhas transantárticas, associados à madeira, pólen e folhas de *Nothofagus* sp., consideradas descendentes de linhagens antárticas que evoluíram no Cretáceo Superior. Estes registros de fósseis de insetos demonstram que tais organismos estavam presentes na Antártica desde o Paleozoico e, que existindo grandes florestas em determinados períodos, como é o caso do Cretáceo, estariam associados a flora local, representada principalmente por *Nothofagus* sp., das mais diversas formas de associação possíveis.

Uma quantidade maior de registros corporais ou fragmentos de insetos em maior número e variedade, assim como marcas de interação com as plantas poderia ser esperada. Porém, fatores climáticos poderiam já estar exercendo forte limitação à presença de herbívoros, assim como fatores tafonômicos/deposicionais podem ter sido relevantes na expressividade destes registros, tanto de artrópodes fósseis quanto de evidências de interação inseto-planta.

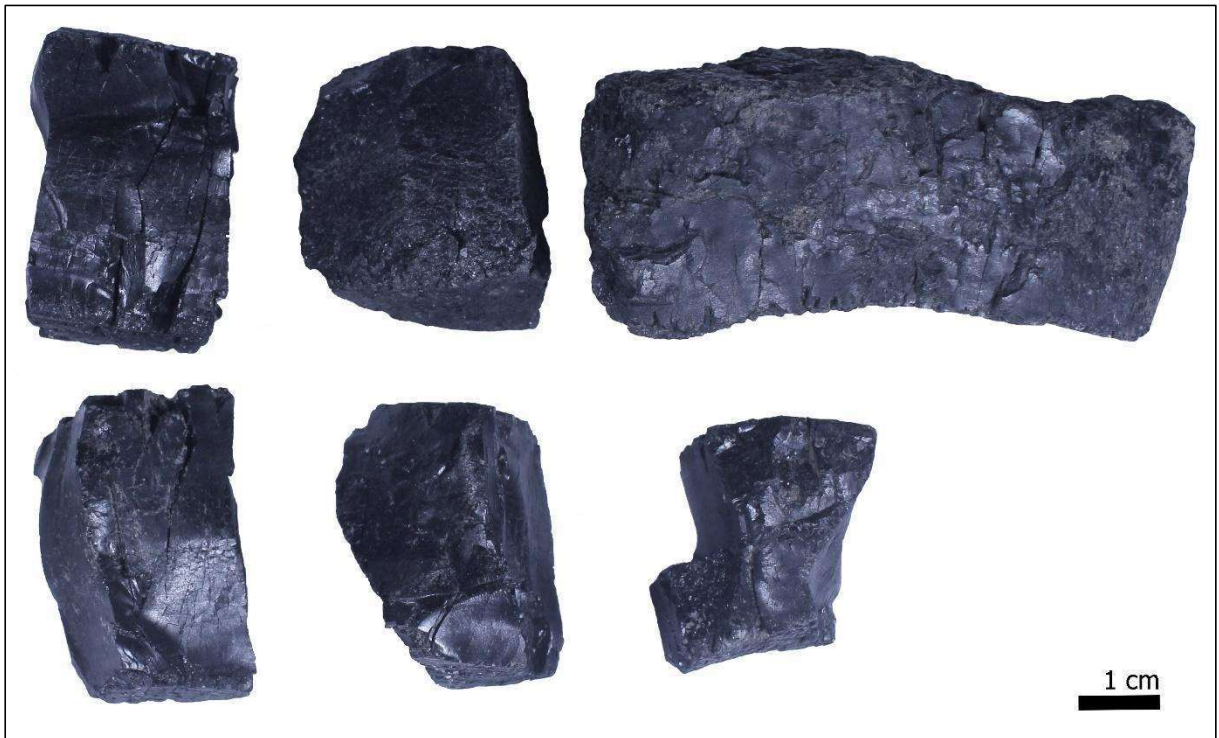
Alguns estudos, como Kemp et al. (2014) e Tobim et al. (2012), indicam que, mesmo com indícios de baixas temperaturas, existiam períodos de intervalos de clima temperado quente. Bowman et al. (2013), através de estudos com palinórfos da Ilha Seymour também indicam um aquecimento antes do final do Cretáceo e início do Paleógeno, sendo, de acordo com Wilf et al. (2006), possivelmente um evento global.

Estes indícios de temperatura mais elevada podem ter contribuído para o estabelecimento destes ecossistemas dos quais as plantas e insetos associados coexistiam e deixaram vestígios de suas interações preservadas. O clima durante o Cretáceo Superior foi o mais quente durante todo o Fanerozoico (HUBER et al., 2018). Isso pode ter sido um ponto importante para o estabelecimento destas florestas na Península Antártica, como também para o desenvolvimento das Angiospermas no continente durante este período.

6.1 MACRO-CHARCOAL

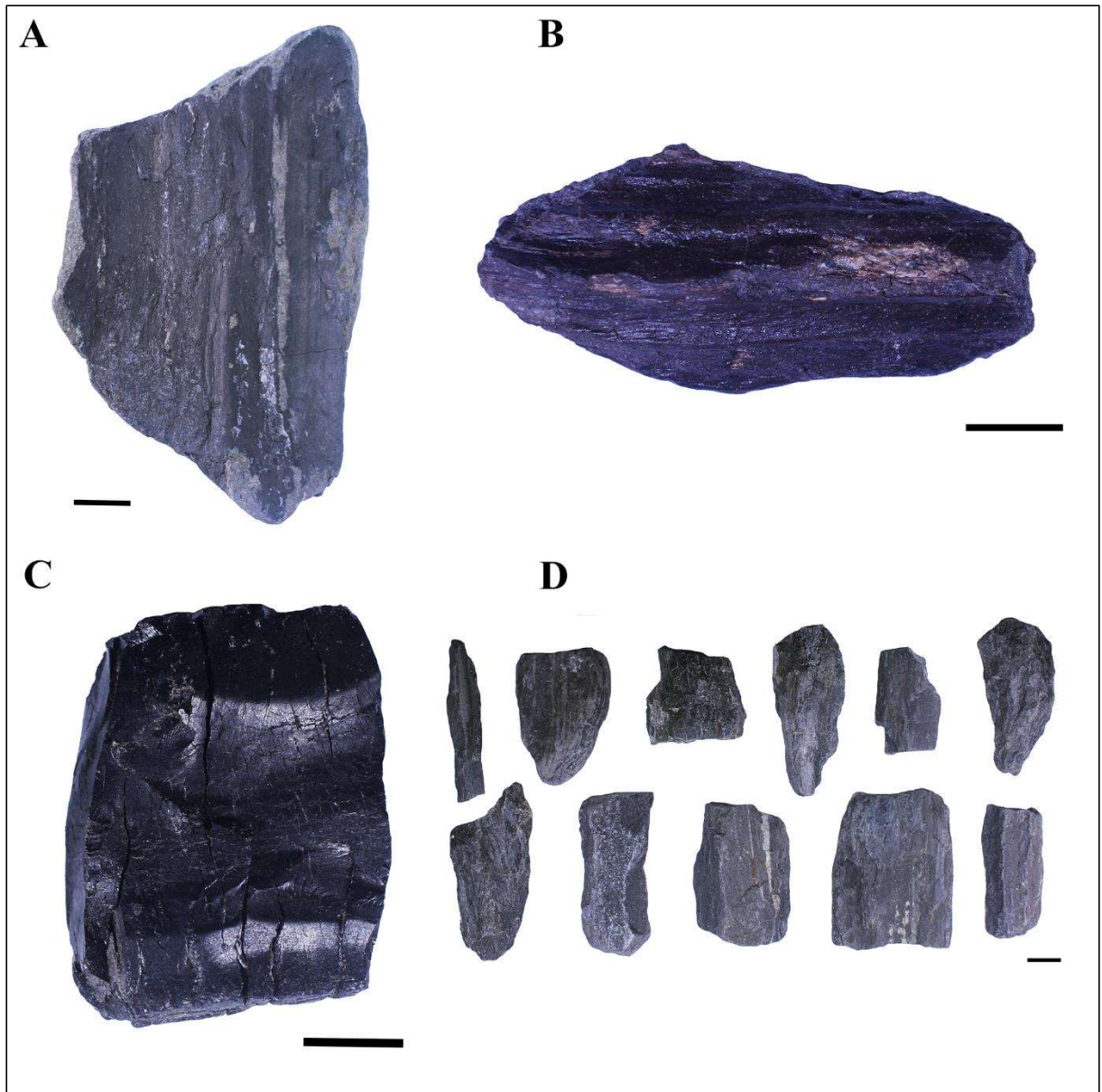
Foram analisados 6 fragmentos de carvão macroscópico coletados na ilha Nelson. As amostras foram extraídas mecanicamente de camadas de tufitos, acima das camadas de arenito e folhelhos onde se preservaram as impressões foliares. O material apresenta algumas das características descritas por Jones e Chaloner (1991) e Scott (2000; 2010) para a definição de carvão macroscópico, como cor preta, brilho sedoso e detalhes anatômicos preservados, (Figura 15). Uma característica incomum do material é o fato de não manchar ao toque, uma das propriedades comuns de amostras de *macro-charcoal*, mas esse fato não impediu a observação das estruturas anatômicas que comprovam que o material sofreu queima antes de fossilizar. O material analisado nesta tese apresenta variedade preservacional, desde pequenos fragmentos isolados até fragmentos incorporados à matriz rochosa e fragmentos silicificados (Figura 16 A-D).

Figura 15 - Fragmentos de *macro-charcoal* isolados, coletados em Rip Point, ilha Nelson. Nas amostras, é possível observar cor e brilho, características típicas deste material.



Fonte: Autor.

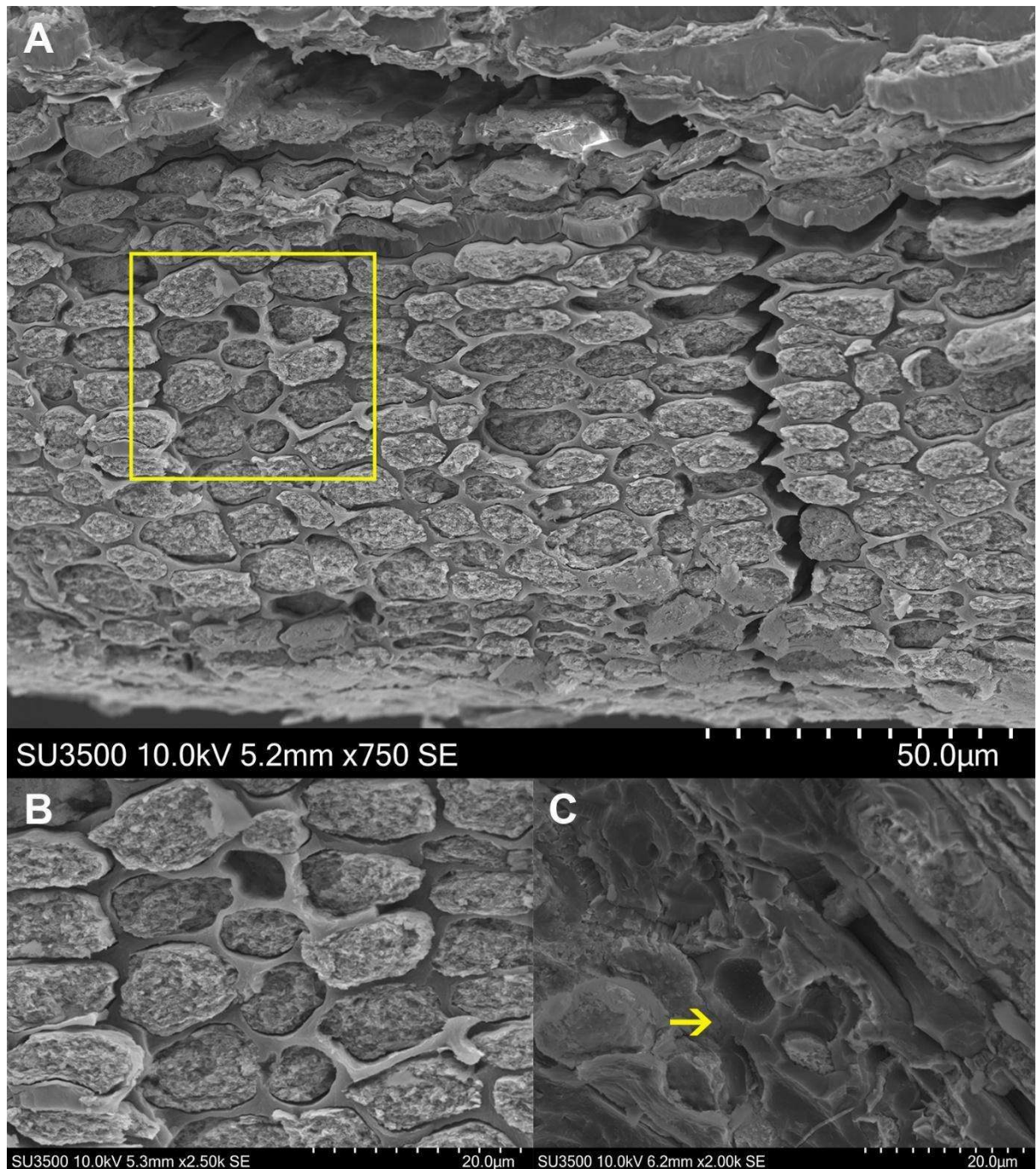
Figura 16 - Diferentes modos de preservação do *macro-charcoal* proveniente da ilha Nelson. A) carvão preservado na matriz rochosa. B) fragmento isolado de carvão silicificado. C) carvão isolado da matriz rochosa. D) fragmentos silicificados incorporados na rocha. Barras de escala: 1 cm.



Fonte: Autor.

As análises de microscopia eletrônica de varredura permitiram a visualização das paredes celulares homogeneizadas nas amostras de *macro-charcoal* (Figura 9), o que comprova a ocorrência de paleoincêndios vegetacionais na Ilha Nelson. Certamente, esses incêndios provocaram temperaturas próximas a 300°C, resultando no nível de homogeneização observado nas amostras (ver Figura 17) (OSTERKAMP et al., 2017).

Figura 17 - Paredes homogeneizadas nas amostras de *macro-charcoal* da Ilha Nelson. A) Visão geral das paredes homogeneizadas. B) detalhe das paredes homogeneizadas marcadas em “A” (quadrado amarelo). C) Detalhe aproximado mostrando homogeneização das paredes, sem a presença da lamela média (seta amarela).

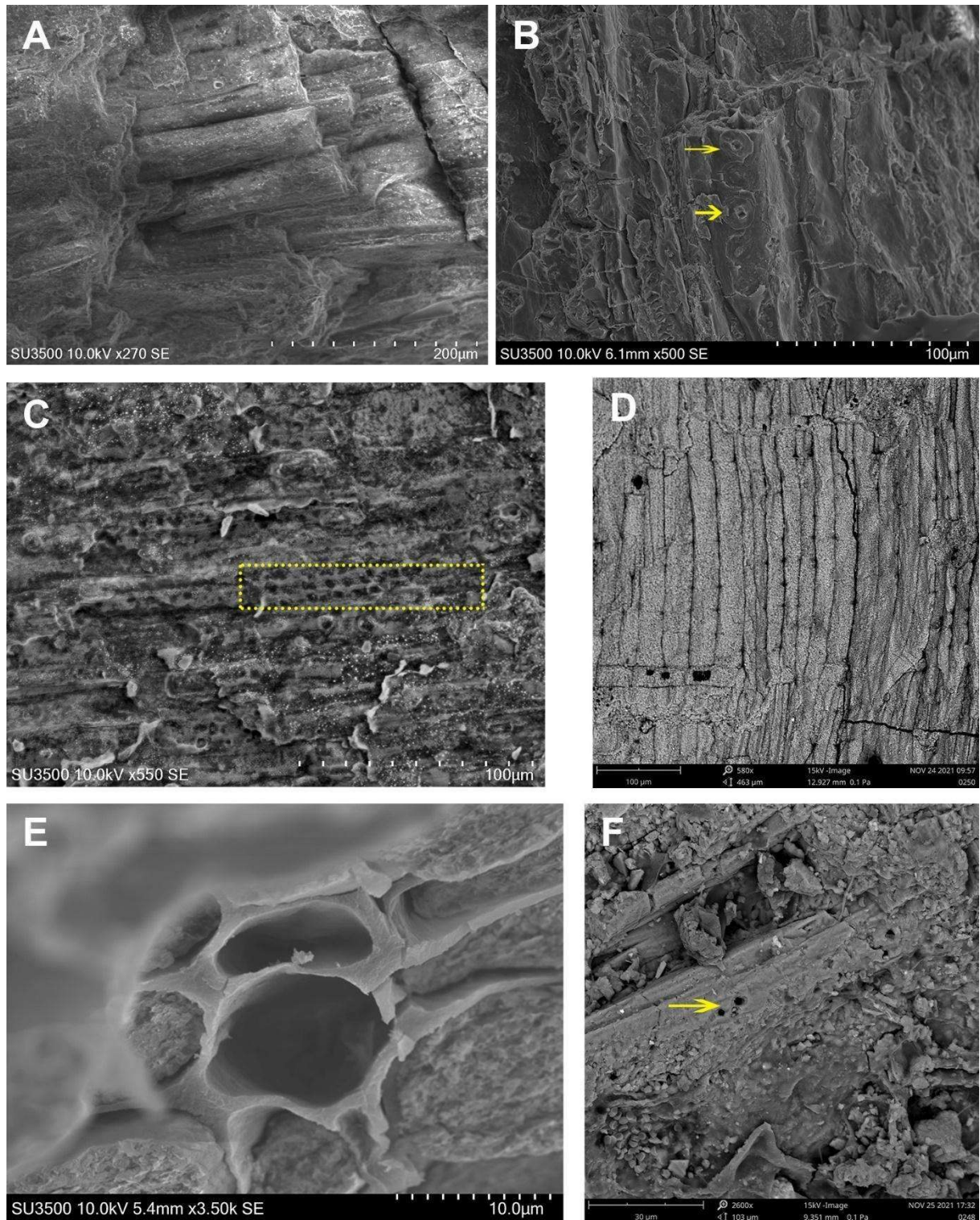


Fonte: Autor.

As amostras estudadas são pequenas, não ultrapassando 5 cm, e em geral, fragmentadas e quebradiças. Foi possível observar algumas estruturas anatômicas comuns ao *macro-charcoal*, além das paredes homogeneizadas, tais como traqueídes (Figura 18 A), pontoações (Figura 18 B), raios seriados (Figura 18 C) e células em campo cruzado (Figura 18 D). Também

foram observadas paredes celulares homogeneizadas (Figura 18 E) e pontoações em traqueídes (Figura 18 F).

Figura 18 - Outras estruturas identificadas nas amostras de *macro-charcoal*. A) traqueídes. B) pontoações (setas amarelas). C) raios seriados (tracejado amarelo). D) células em campo cruzado. E) detalhe aproximado das paredes homogeneizadas. F) detalhe aproximado de pontoação em traqueídes (seta amarela).



Fonte: Autor.

As estruturas aqui observadas corroboram com trabalhos anteriores para a Península Antártica (e.g., Manfroi et al, 2015; Lima et al, 2021). Tais estruturas possibilitam confirmar a ocorrência de paleoincêndios na Ilha Nelson, bem como permite inferir os eventos de erupções vulcânicas como possíveis fontes de ignição para ocorrência de tais eventos na Península Antártica. Contudo, não se pode apontar o vulcanismo como fonte única possível de gerar incêndios na Antártica, mesmo sendo comum sua influência nos ecossistemas cretáceos na Antártica Ocidental.

Após sua formação, o carvão pode flutuar por algum tempo na coluna d'água, sofrendo pouca abrasão, além de percorrer distâncias maiores antes de ser depositado. Também deve ser levada em consideração que carvões de diferentes tamanhos se comportam de maneiras distintas quando se trata de transporte (NICHOLS et al., 2000). O aspecto preservacional dos carvões de *Rip Point*, sem presença de fragmentos grandes, indica deposição influenciada por fluxos piroclásticos e fluxos de lama, gerados pela combinação de cinzas vulcânicas e chuvas (relativamente comuns em ambientes vulcânicos), que contribuem para a má preservação destes fragmentos de carvão (e.g., MANFROI et al., 2015). A presença de fragmentos carbonizados e permineralizados foi também relatada por Falcon-Lang e Cantrill (2001), indicando que os fragmentos de madeira podem ser carbonizados por fluxos piroclásticos e, em seguida, silicificados. O fato de ser possível a observação das paredes homogeneizadas, pode indicar que esse material foi queimado a temperaturas superiores a 300°, fusionando as paredes celulares (SCOTT, 2010).

De acordo com as estruturas anatômicas observadas podemos inferir uma afinidade conífera para o *charcoal* proveniente de Rip Point, através de comparações com elementos e afinidades taxonômicas já descritos anteriormente para a Península Antártica (MANFROI et al., 2015; LIMA et al., 2021). Os restos vegetais, principalmente fragmentos de madeira (caules e ramos), estão sujeitos a ação de incêndios, especialmente em áreas afetadas por vulcanismo, que pode funcionar como agente de ignição e gerar os resíduos que se preservam como carvão macroscópico (PYNE et al., 1996; SCOTT, 2010). Outro aspecto observado é uma leve compactação das paredes celulares do *charcoal*, talvez provocado por pressões elevadas durante o processo digenético.

Na Península Antártica ocorreram eventos de paleoincêndios em diferentes localidades durante o Cretáceo, como mostra a Tabela 1 que resume os registros de *macro-charcoal* para o Cretáceo da Antártica.

Tabela 3 - Resumo dos registros de *macro-charcol* para o Cretáceo da Antártica.

LOCALIDADE	ESTRATIGRAFIA	IDADE	OBSERVAÇÕES	REFERÊNCIA
Ilha Alexander	Formação Triton Point	Albiano Superior	Fragmentos de madeira de coníferas. Fogo iniciado por vulcanismo.	Falcon-Lang et al. (2001)
Ilha Nelson	Formação Fossil Hill	Campaniano	Madeira de conífera. Incêndios causados por vulcanismo.	Manfroi et al. (2015)
Ilha James Ross	Formação Santa Marta	Campaniano	Afinidade com Araucariaceae. Incêndios causados por vulcanismo.	Lima et al. (2021)
Ilha Rei George	Grupo Península Fields (Price Point)	Campaniano	Afinidade com Podocarpaceae. Vulcanismo como fator de ignição	Manfroi et al. (2023)

Fonte: Autor.

O *macro-charcoal* pode ser preservado próximo à área de ocorrência de incêndios, sendo rapidamente incorporado pelos sedimentos e contribuindo para reconstruções paleoambientais (DUTOIT et al., 2009; SCOTT, 2010). Entretanto, fragmentos de *charcoal* podem ser levados para longe da área de ocorrência de incêndio e depositados em ambientes lacustres e fluviais (ALI et al., 2009). Segundo Nichols et al. (2000), os fragmentos maiores de carvão apresentam maior transportabilidade pela água em comparação com fragmentos menores. Os carvões aqui analisados são amostras macroscópicas que foram transportados e depositados em ambiente lacustre por fluxos provocados por eventos vulcânicos, os quais possivelmente deram origem a incêndios e produziram os detritos que formaram o carvão preservado. De acordo com o que já foi descrito sobre a associação entre eventos de vulcanismos e a formação das assembleias, pode-se inferir que os resíduos que deram origem aos carvões fossilizados coletados em Rip Point foram formados por estes eventos (ver figura 19).

Durante o Cretáceo, a atividade vulcânica na Antártica ainda era intensa (BIRKENMAJER, 2001; REGUERO et al, 2013; 2016) gerando os paleoincêndios. Registros anteriores (MANFROI et al, 2015; LIMA et al, 2021) já apontaram erupções vulcânicas como ignição de grandes incêndios que geraram carvão durante o Cretáceo Superior (Campaniano)

nas ilhas Nelson e James Ross, também na Península Antártica. Os registros de carvão fossilizado são determinantes na identificação de paleoincêndios, porém, são muito raros para algumas localidades (HE, 2016). Essa raridade de registros pode ser observada no continente antártico, onde há poucas evidências descritas de *macro-charcoal* até o momento.

O Cretáceo é considerado um período no qual incêndios eram eventos relativamente constantes (SCOTT, 2010; BROWN et al., 2012) e seu registro é bem conhecido (BROWN et al., 2012). Os paleoincêndios ao longo do Cretáceo também foram determinantes na evolução das plantas e na preservação de caracteres anatômicos que comprovam esta evolução (JASPER et al, 2021). O material aqui descrito tem mesma idade e características e confirma a produção de carvão preservado na Antártica, decorrentes da queima de florestas próximas a vulcões.

Determinar as características dos paleoincêndios não é tarefa fácil, pois os regimes de fogo dependem da interação entre os fatores físicos externos e as características da vegetação (SCOTT, 2010). O registro fóssil de *charcoal* fornece apenas a natureza do material queimado e, algumas vezes, a temperatura que o fogo atingiu, estimada pela reflectância do carvão formado (SCOTT, 2010). O material apresenta uma variação preservacional da qual podemos inferir que houve variações nas temperaturas e estruturas queimadas que formaram os depósitos da Ilha Nelson. Todos os registros de *macro-charcoal* citados para o continente antártico indicam erupções vulcânicas como causa dos paleoincêndios, mas existem outras formas pelas quais o fogo pode iniciar, como por exemplo, por raios durante tempestades.

6.3 ASPECTOS TAFONÔMICOS DA PALEOFLORA DAS ILHAS NELSON

Os fósseis coletados na Ilha Nelson são representados por impressões foliares, pequenos fragmentos de compressões de galhos e fragmentos de *macro-charcoal*. A maior parte do material trata-se de fragmentos de folhas preservadas, desconectadas de outros órgãos e com alto grau de compactação. Os fósseis se caracterizam por serem dispersos e não apresentarem orientação preferencial (direção de fluxo). Segundo McDonald e Jefferson (1985) é mais fácil de se observar a orientação de fluxo em uma assembleia através da presença de folhas longas e estreitas. A possível indicação de um fluxo de orientação para o material de *Rip Point* pode ser de difícil análise devido ao fato deste tipo foliar não estar presente e a assembleia ser formada na sua maioria por fragmentos de folhas mais largas que foram misturadas por fluxos de alta energia (Figura 19).

Figura 19 - Imagem mostrando o Padrão disperso dos fitofósseis de *Rip Point*, mostrando a ausência de orientação preferencial do material. Barra de escala: 8cm.



Fonte: Autor.

As impressões foliares estão associadas a restos de galhos e carvão fossilizado, além de microfósseis (esporos e pólenes). As principais características tafonômicas observadas no material de *Rip Point* estão resumidas na Tabela 4.

Tabela 4 - Resumo das principais características tafonômicas observadas nos fósseis de *Rip Point*, Ilha Nelson.

ATRIBUTOS TAFONÔMICOS	ESTADO DO MATERIAL
Táxons presentes	<i>Nothofagus</i> , angiospermas indeterminadas, gimnospermas e pteridófitas
Material associado	Fragmentos de galhos e <i>charcoal</i>
Modo de fossilização	Compressão/impressão/silicificação
Grau de articulação	Isolados e dispersos
Abundância relativa de <i>NOTHOFAGUS</i>	Alta
Abundância relativa de plantas associadas	Muito baixa
Quebra/fragmentação	Muito alta
Orientação	Sem orientação preferencial
Rocha matriz	Arenito/tufito

Fonte: Autor.

O fato de plantas apresentarem tecidos com diferentes graus de resistência à degradação e, por suas partes se desconectarem com determinada frequência e facilidade, é comum que se formem assembleias compostas apenas por um órgão vegetal, como folhas, sementes ou caules (SPICER, 1989). No caso dos fitofósseis aqui analisados a prevalência na assembleia é de folhas (cerca de 90% dos fósseis) que formam o principal componente e quase exclusivo dos depósitos da Ilha Nelson. Destas, grande parte é composta por folhas identificadas como pertencentes ao gênero *Nothofagus*.

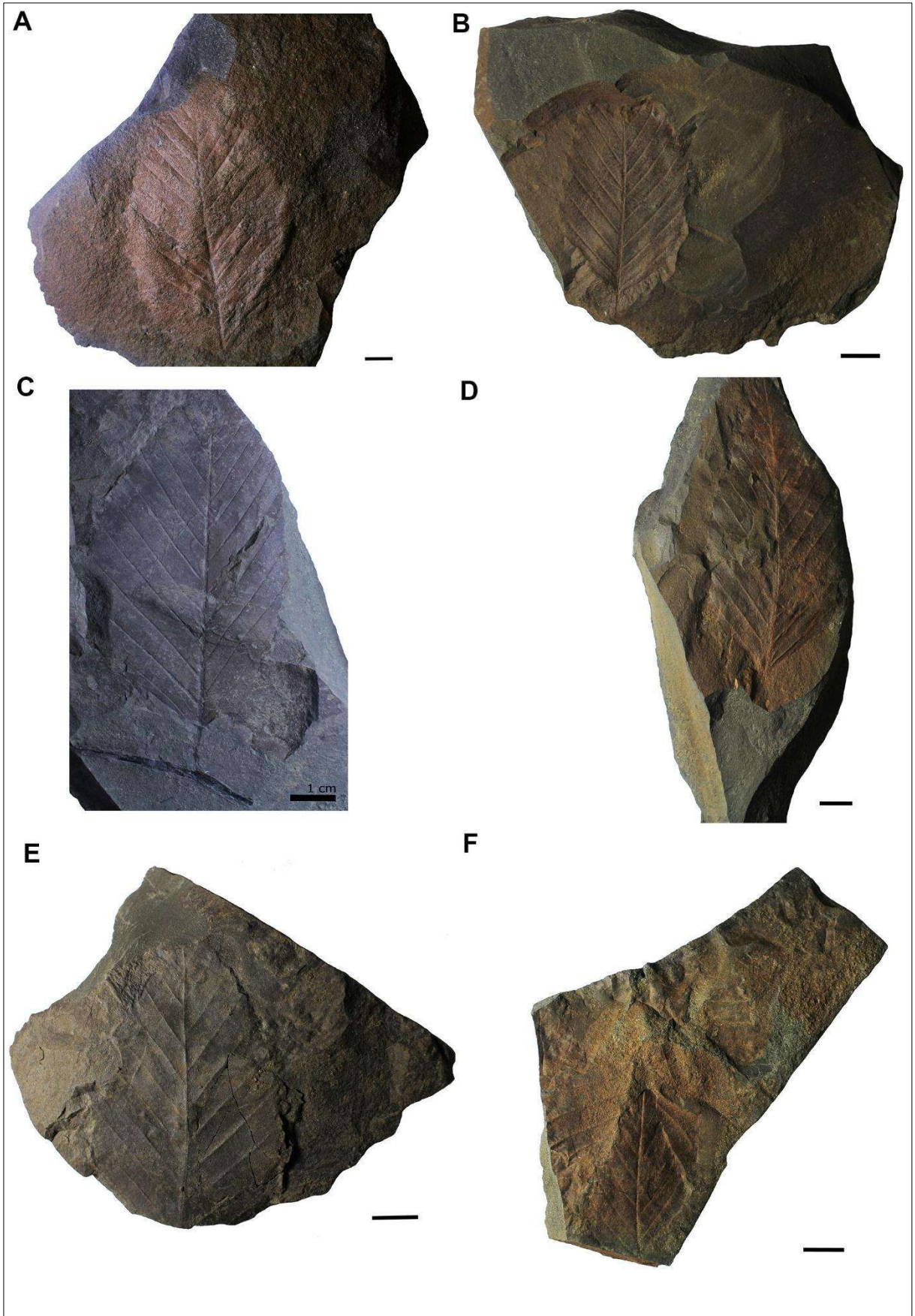
A maior parte das folhas preservou-se de forma incompleta, com caracteres diagnósticos a níveis específicos (morfológicos/taxonômicos) destruídos pelos processos tafonômicos. As folhas estudadas aqui são de diferentes formas, desde alongadas, arredondadas, dobradas a triangulares. Este padrão indica, por exemplo, que outros fatores que influenciam no transporte, tais como o vento, não foram diretamente determinantes na formação dessa assembleia fossilífera. Uma vez que, em virtude da energia eólica atuante ao longo do processo de transporte, a forma e/ou a densidade das folhas influenciam, de maneira direta, a seleção e a distância percorrida por esse tipo de bioclastos.

Segundo Spicer e Parrish (1986), a presença de folhas inteiras e enroladas em arenitos é uma característica que indica uma assembleia formada por folhas frescas (recém retiradas/caídas) de plantas decíduas. Tal observação pode ajudar na interpretação do material aqui analisado, constituído, embora em menor número, por folhas completas e quase completas. Essa característica pode indicar que a serrapilheira soterrada era formada por grande parte de material novo (recém caídas), que se acumulava pela presença de plantas decíduas, representadas principalmente por *Nothofagus*.

Segundo Spicer (1991), estes materiais recém caídos, tanto folhas isoladas como fragmentos ou galhos inteiros, podem entrar em um ambiente fluvial ou lacustre por eventos traumáticos como tempestades ou inundações. Podemos inferir, portanto, que os eventos que envolvem as erupções vulcânicas (queda de material em suspensão, fluxos piroclásticos e de lama) também influenciaram no transporte e entrada de material no ambiente deposicional.

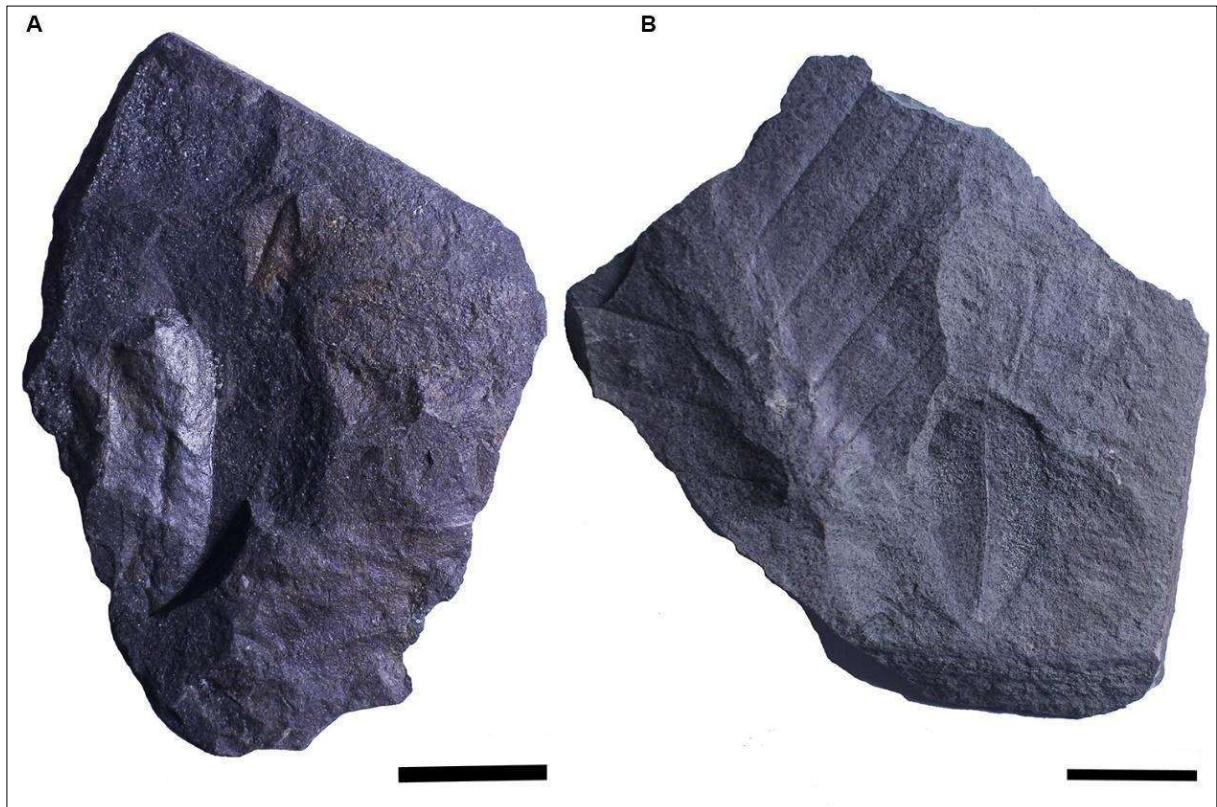
Comumente o gênero *Nothofagus* apresenta espécies decíduas e estas folhas tendem a ser mais leves, podendo ser carregadas a maiores distâncias, aumentando as chances de preservação, permitindo explicar que a grande diferença na quantidade de fósseis deste gênero em relação a outras formas na assembleia seja em razão de seletividade, por densidade e/ou forma, no sistema deposicional. A maior representatividade de *Nothofagus* dentre os fitofósseis possibilitou a presença de espécimes com uma melhor qualidade de preservação e, diferentemente da maioria das impressões foliares, apresentam-se completas ou quase completas, com caracteres morfológicos como base, ápice e margem foliar ainda preservados (Figura 20), possibilitando identificar afinidades taxonômicas com táxons descritos em outras localidades. Em raríssimos espécimes a folha foi preservada peciolada e conectada ao ramo (Figura 20 C). O padrão de tamanho das folhas de *Rip Point* sugere uma floresta madura estabelecida, pela maior representatividade de folhas grandes.

Figura 20 - Folhas de *Nothofagus* da Ilha Nelson com caracteres de ápice, base ou margem preservados. Barras de escala: 1cm.



Em outras formas foliares que apresentam caracteres morfológicos diferentes, principalmente tamanho, forma e aspecto coriáceo, podem sofrer menor degradação mecânica (Figura 21). Estas folhas, além de serem mais facilmente dispersas, são mais resistentes à degradação/decomposição e ao encharcamento.

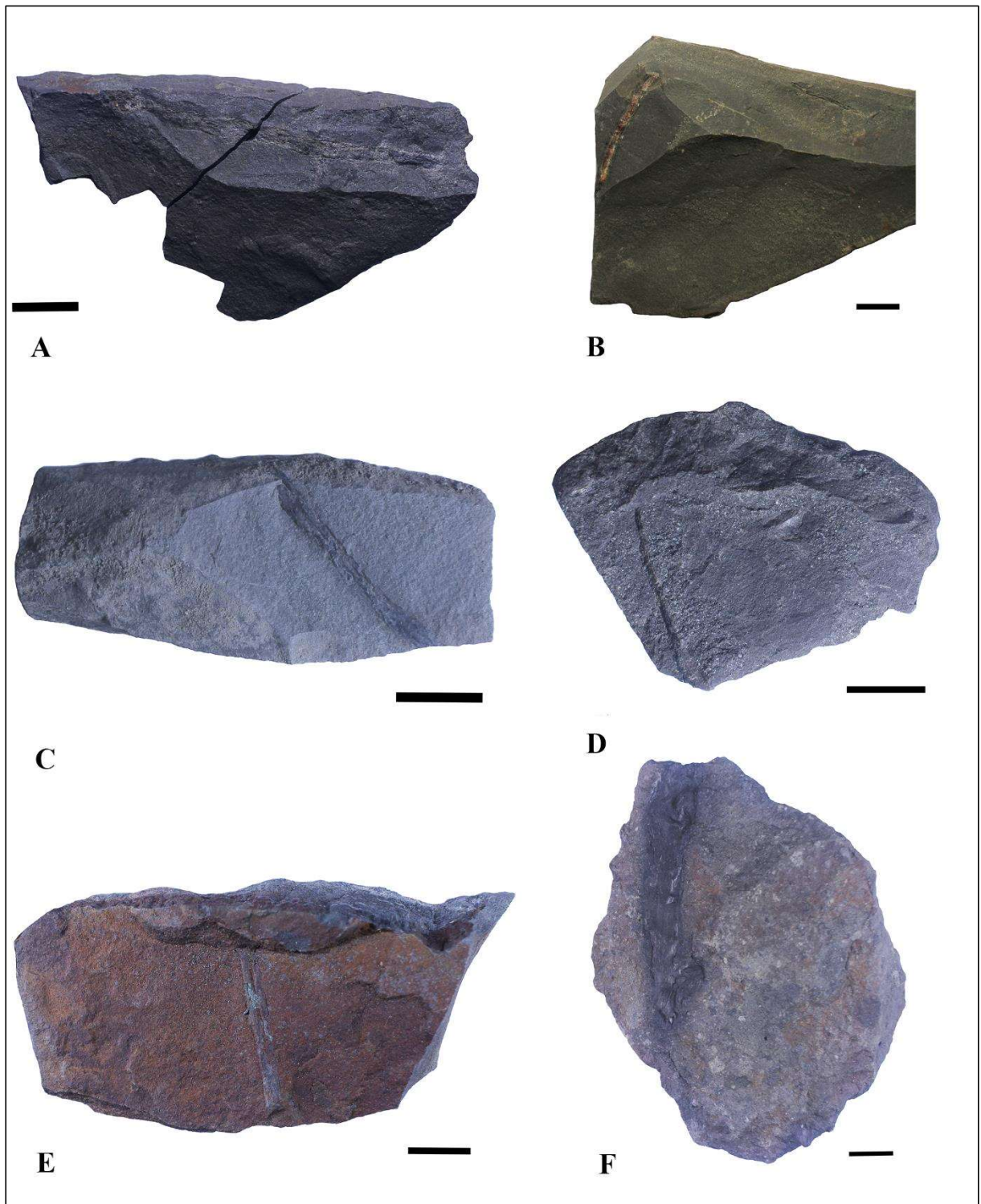
Figura 21 - Folhas não relacionadas ao gênero *Nothofagus*, provenientes da Ilha Nelson, preservadas sem grandes perdas de caracteres. Barra de escala: 1 cm.



Fonte: Autor.

Os galhos fossilizados são representados por pequenos fragmentos e apresentam formas diferenciadas de preservação, apresentando-se na forma de compressões, não carbonificadas e carbonificadas. Os fragmentos de galhos apresentam baixa prevalência em comparação com as folhas e são representados apenas por pequenos fragmentos finos, sem galhos maiores ou outros fragmentos de caules (Figura 22). Estes fósseis provavelmente foram depositados simultaneamente, sendo preservados de diferentes formas devido às distintas composições e resistência à degradação que cada parte vegetal apresenta.

Figura 22 - Fragmentos de galhos provenientes da Ilha Nelson preservados como compressão e carbonização. Barras de escala: 1 cm.



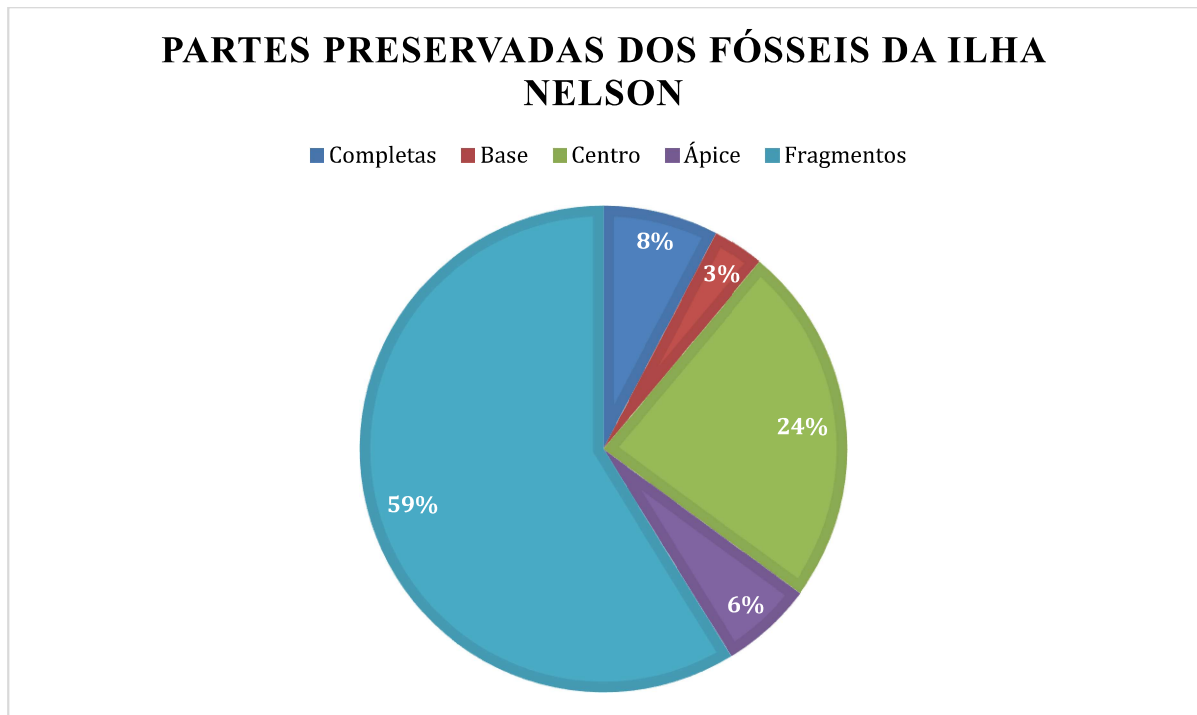
Fonte: Autor.

De maneira geral, as folhas e galhos representam elementos autóctones/parautóctones, que podem ser transportados por processos eólicos, pela água, por processos fisiológicos (abscisão) e por influência de fluxos piroclásticos causados por processos vulcânicos (SPICER,

1991; SCOTT, 2010; BROWN, 2012). A partir das características observadas, sugere-se que o material é proveniente de uma serrapilheira formada no solo da floresta, abastecido por processos de abscisão foliar. O alto grau de fragmentação pode ser fruto do processo de transporte, que mesmo por curta distância pode ter causado danos, tornando o material fragmentado, dificultando a preservação de folhas completas e conectadas. As quebras irregulares e angulares podem ser fruto de transporte por fluxo turbulento (SPICER, 1991).

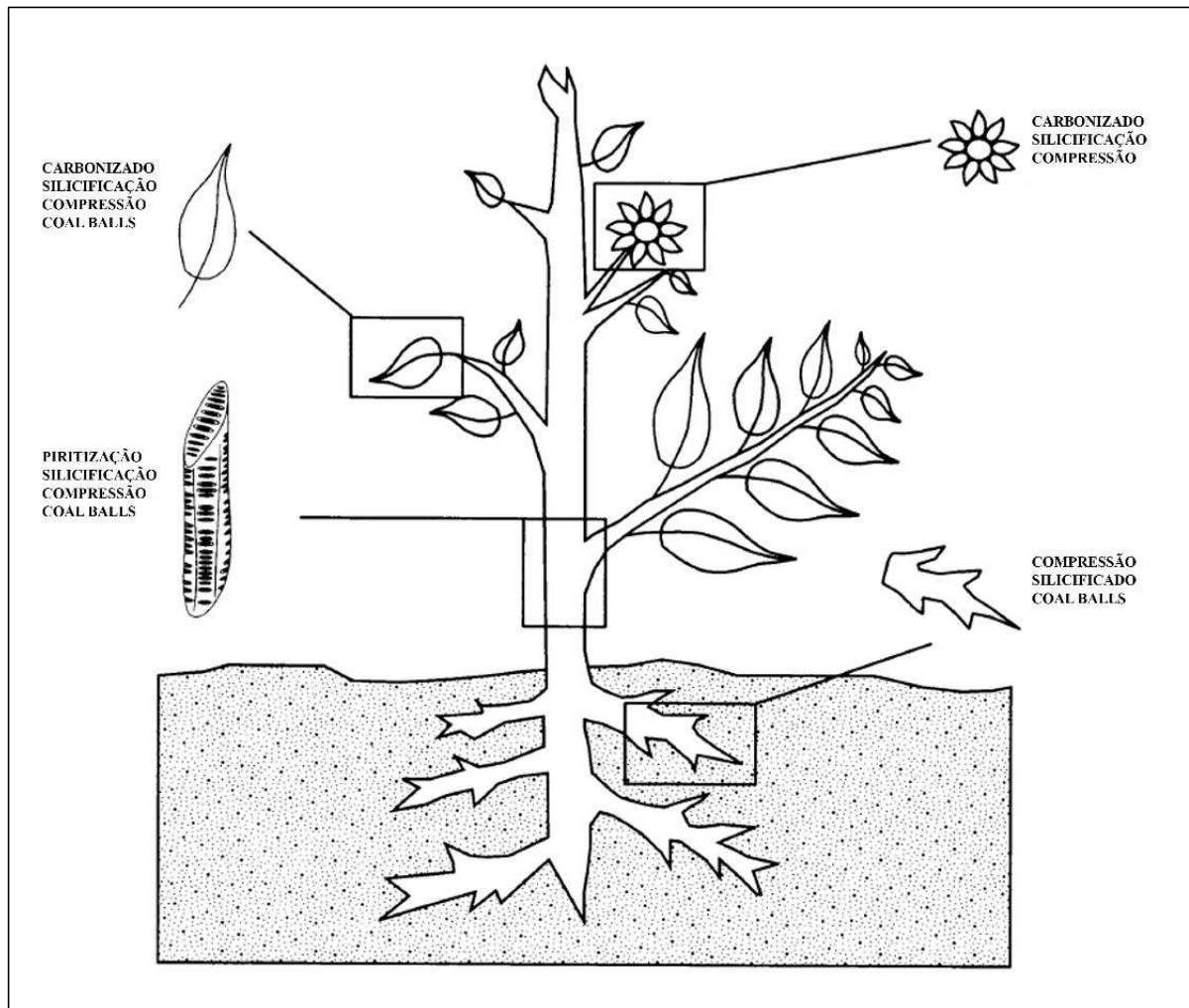
Os fósseis apresentam variedade de órgãos vegetais preservados, com prevalência de folhas, que são os órgãos vegetais com maior potencial de preservação e com maior registro fóssil (SPICER, 1991), associadas a fragmentos de galhos e carvão macroscópico. Dessa forma, compondo, uma tafoflora formada por diferentes partes vegetais que apresentam diferentes comportamentos diante de fatores tafonômicos distintos. A figura 23 mostra a relação entre as principais partes preservadas das plantas e os modos de preservação de cada parte.

Gráfico 3 - Percentual de partes preservadas nas impressões foliares da Ilha Nelson, evidenciando a maior quantidade de fragmentos fossilizados.



Fonte: Autor.

Figura 23 - Exemplo dos principais órgãos vegetais e as principais vias tafonômicas associadas ao registro fóssil de fitofósseis.



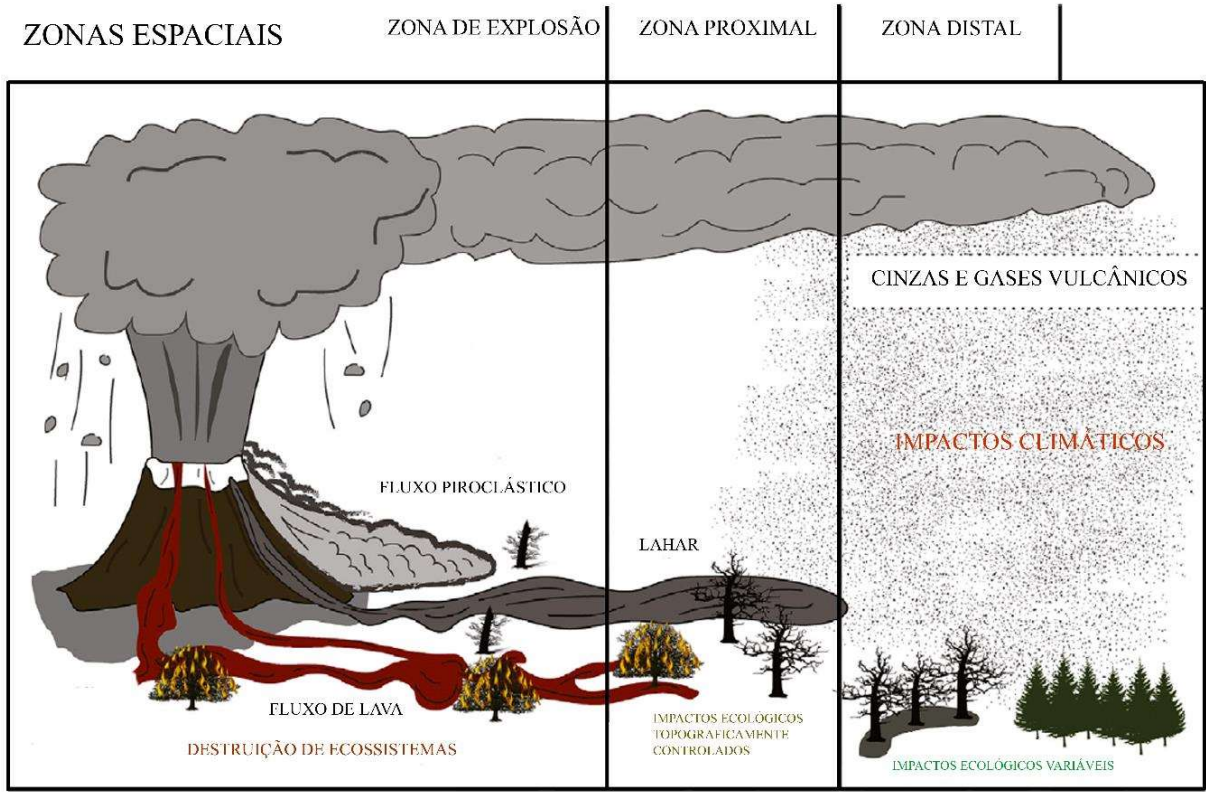
Fonte: Modificado de Locatelli et al. (2014).

Fatores ambientais também estão correlacionados com o grau de preservação de fragmentos vegetais. Como se tratava de um ambiente de alta energia e eventos deposicionais frequentes, isso pode explicar a baixa qualidade de preservação destes fósseis. Segundo Ferguson (1985), características do limbo foliar, como tamanho da folha e espessura da cutícula se relacionam diretamente com o grau de preservação. Algumas características das folhas de *Nothofagus*, conforme as analisadas por Ferguson (1985), podem explicar o seu processo de fossilização e a maneira como se preservaram. O seu formato em forma de “V” ajuda na dispersão e suas folhas lignificadas podem sofrer maior transporte. Estes aspectos podem ter contribuído para a perda de estruturas de ápice, base e margem durante o transporte destas folhas pela água até sua deposição final.

Segundo Wing et al. (1995), outros fatores extrínsecos influenciam o registro paleobotânico, destacando-se entre os principais a energia do meio, a frequência dos eventos

deposicionais e a quantidade de sedimentos acumulados. De maneira geral, os fósseis coletados na Ilha Nelson apresentam-se muito fragmentados, independente da parte vegetal analisada, seja folha, fragmentos de galhos ou *charcoal*. Tal aspecto deve estar relacionado ao ambiente deposicional, caracterizado por fluxos piroclásticos, associados a eventos de vulcanismo (Figura 24). Comunidades vegetais são especialmente afetadas por eventos de vulcanismo, principalmente os processos sedimentares e tafonômicos (PEDERNERA et al., 2021; BEHRENSMEYER e HOOK, 1992). Além disso, o vulcanismo modifica a dinâmica de sistemas lacustres, alterando as condições físico-químicas que comprometem a biodiversidade (SPICER, 1991; BEHRENSMEYER e HOOK, 1992; PEDERNERA et al, 2021).

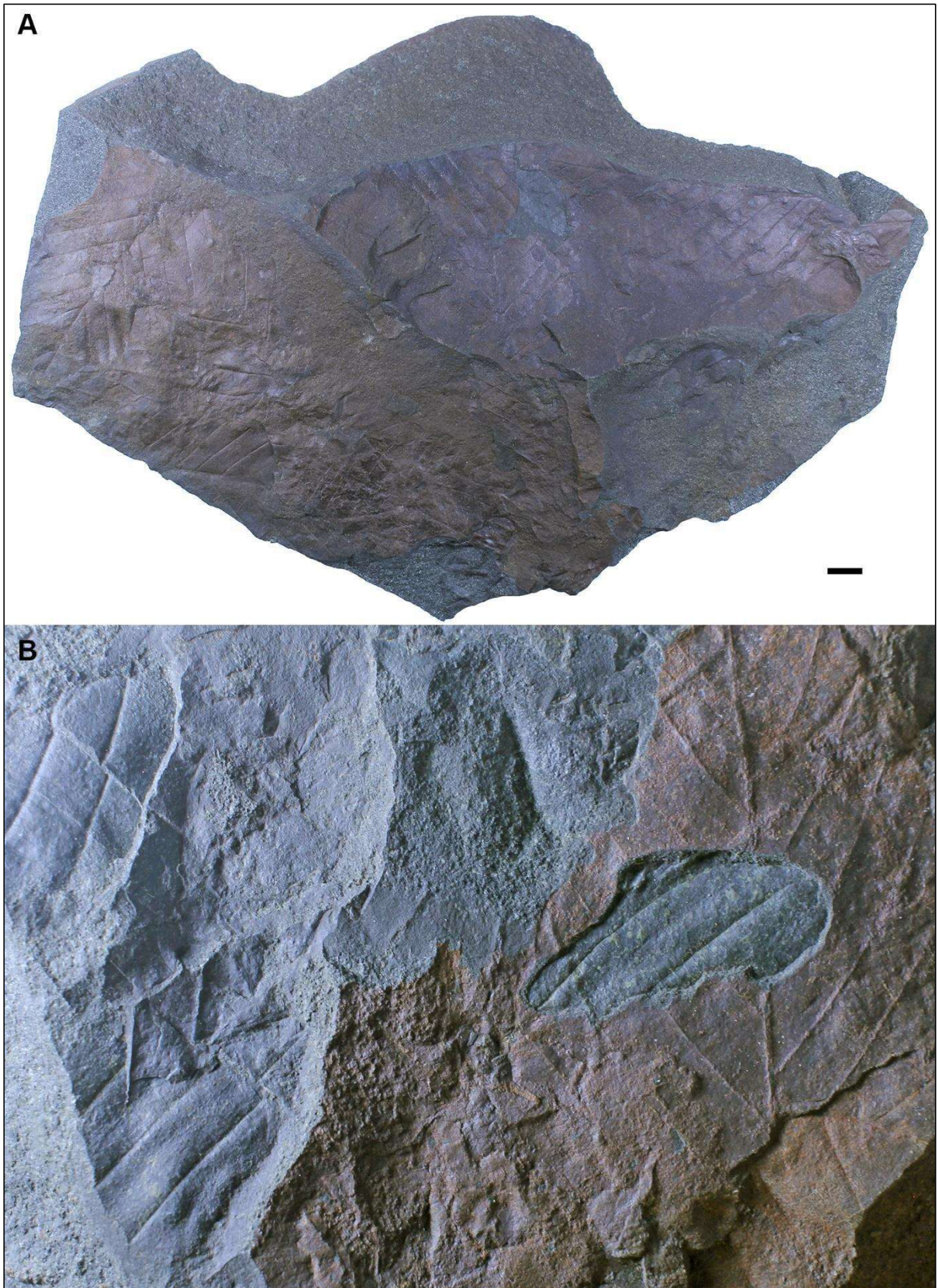
Figura 24 - Esquema mostrando a associação entre o vulcanismo, sua extensão espacial e os impactos causados nos ecossistemas e na preservação dos fitofósseis.



Fonte: Modificado de Peny e Egan (2017).

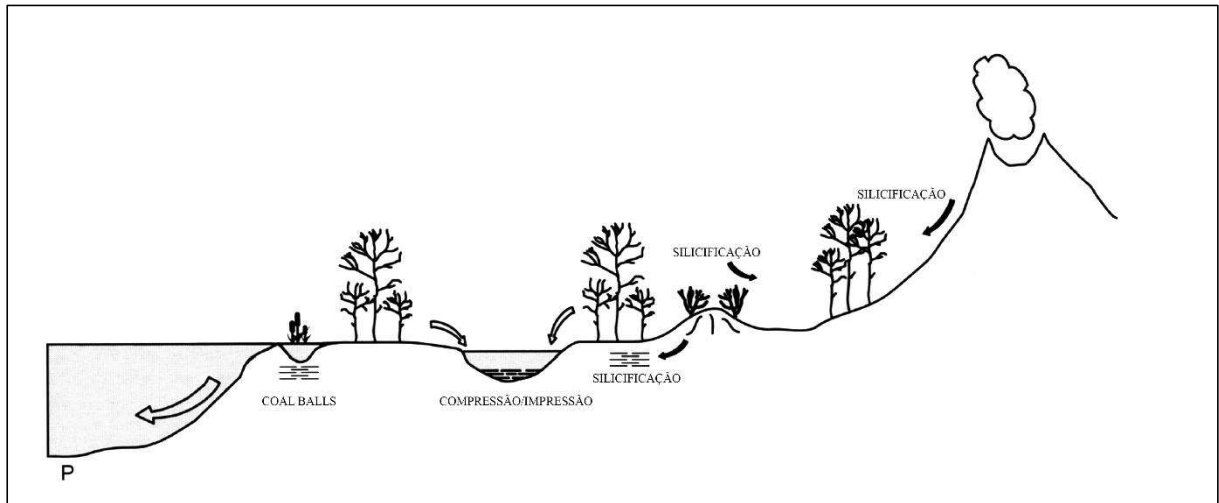
O material de *Rip Point* certamente teve influência de fluxos piroclásticos de alta energia, o que indica que o material estava na zona de explosão ou na zona proximal (Figura 19). Tal posicionamento, onde esse efeito pode ser causado em plantas, pode ser constatada também pela presença de *macro-charcoal* e restos de galhos carbonizados, frutos de incêndios em áreas próximas a explosões vulcânicas, que sofrem também o efeito de fluxo de lava. Os aspectos deposicionais indicam intervalos de deposição curtos, formando finas camadas, contendo impressões foliares (Figura 25 A, B). As impressões, compressões e galhos eram soterrados por fluxos intensos que arrastavam todo o material acumulado no solo da floresta para corpos de água próximos como representado nas figuras 24 e 26.

Figura 25 - Imagens do material preservado na ilha Nelson. A) Aspecto preservacional da acumulação de folhas. B) Detalhe mostrando a espessura fina entre as camadas contendo as folhas fossilizadas.



Fonte: Autor.

Figura 26 - Paisagem hipotética mostrando diferentes ambientes deposicionais e vias tafonômicas associadas. Setas claras indicam transporte de órgãos vegetais. Setas pretas indicam transporte de sílica. P = piritização.



Fonte: modificado de Locatelli et al. (2014).

Provavelmente as folhas acumuladas no solo foram transportadas por fluxos de alta energia, que provocaram a perda de caracteres morfológicos (ápice, margem e base), preservando, na maioria dos espécimes a porção central da lâmina foliar e o padrão de venação principal e de distribuição das veias secundárias.

Todos os espécimes de folhas apresentam alto grau de compactação e são preservados por impressão, sem preservação de cutícula ou outra microestrutura, porém em alguns espécimes a preservação quase permite entender melhor sua morfologia. A ausência de caracteres foliares como margem, ápice ou base é comum nas paleofloras da parte ocidental da Península Antártica, devido a sua história relacionada a esses eventos de vulcanismos citados acima (ZASTAWNIAK, 1994; DUTRA e BATTEN, 2000; BASTOS et al., 2012).

7. CONCLUSÃO

Confirmamos a ocorrência de paleoincêndios na Ilha Nelson, Península Antártica, através da identificação de *macro-charcoal*. Esta descoberta contribui com informações paleoambientais para o continente, indicando ocorrências de episódios recorrentes de incêndios vegetacionais para o Cretáceo Superior da Antártica, sugerindo que tais eventos não eram tão raros. Isso contribui para uma melhor compreensão dos paleoincêndios vegetacionais em continentes que formaram o Gondwana, onde há hiatos temporais e espaciais para o Mesozoico.

Os primeiros registros de interação inseto-planta para o Cretáceo do Continente Antártico e as mais antigas da Península Antártica são aqui registrados, adicionando informações paleoecológicas para os ecossistemas Antárticos do Cretáceo, identificando interações entre herbívoros e plantas que ocorriam neste período. Tais interações são as mais antigas identificadas para o gênero *Nothofagus*. Estas informações contribuem para uma melhor compreensão da biota e das relações tróficas. Além disso, as análises destas interações ajudam a inferir a presença de insetos fitófagos na Antártica, já que os registros corporais destes organismos são raríssimos. Também vale destacar a importância no entendimento das relações ecológicas envolvendo o gênero *Nothofagus*, que não conta com grande número de registros com essa temática.

As análises tafonômicas indicam uma deposição em ambiente lacustre, no qual a preservação dos fósseis foi influenciada pelos processos de vulcanismo que eram comuns na região da Península Antártica. Cada parte vegetal que se preservou nos arenitos e lapilitos demonstrou algum tipo de influência preservacional por processos como fragmentação e transporte. Estes processos indicam um ambiente de alta energia, provavelmente influenciado por fluxos piroclástico e fluxos de lama. Tais fluxos seriam responsáveis pelo transporte e deposição do material vegetal acumulado numa serrapilheira, composta quase que exclusivamente por folhas isoladas, não distante do local de origem, formando uma assembleia autóctone/parautóctone, composta de fósseis muito fragmentados.

Também trazemos aqui a identificação preliminar da taoflora Campaniana da Ilha Nelson. O material estudado demonstra a existência de florestas bem diversificadas, dominadas por *Nothofagus*, mas com representantes de outras ordens, evidenciando que as condições ambientais na Península Antártica durante o Cretáceo Superior proporcionaram o estabelecimento de ecossistemas com grande biodiversidade.

8. REFERÊNCIAS

- ALI, A. A., HIGUERA, P.E., BERERON, Y., CARCAILLET, C. Comparing fire-history interpretations based on area, number and estimated volume of macroscopic charcoal in lake sediments. **Quaternary Research** 72, 462–468. 2009.
- ASKIN, R. A. Endemism and heterochroneity in the Late Cretaceous (Campanian) to Paleocene palynofloras of Seymour Island, Antarctica: implications for origins, dispersal and palaeoclimates of southern floras. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 47(1), 107-119. 1989.
- ASHWORTH, A. C., LEWIS, A. R., MARCHANT, D. R., ASKIN, R. A., CANTRILL, D. J., FRANCIS, J. E; WOLFE, A. P. The Neogene biota of the Transantarctic Mountains. **Online Proceedings of the ISAES** (<http://pubs.usgs.gov/of/2007/1047/>) (eds. A. K. Cooper, C. R. Raymond et al.), USGS Open-File Report 2007– 1047, Extended Abstract 071, 4 p. 2007.
- BECK, A. L., LABANDEIRA, C. C. Early Permian insect folivory on a gigantopterid-dominated riparian flora from north-central Texas. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 142(3-4), 139-173. 1998.
- BALE, J. S., MASTERS, G. J., HODKINSON, I. D., AWMACK, C., BEZEMER, T. M., BROWN, V. K., WHITTAKER, J. B. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. **Global change biology**, 8(1), 1-16. 2002.
- BARRAL, A., GOMEZ, B., LEGENDRE, S., LÉCUYER, C. Evolution of the carbon isotope composition of atmospheric CO₂ throughout the Cretaceous. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 471, 40-47. 2017.
- BARREDA, V., PALAMARCZUK, S., MEDINA, F. Palinología de la Formación Hidden Lake (Coniaciano-Santoniano), Isla James Ross, Antártida. **Revista Espanola de micropaleontologia**, 31(1), 53-72. 1999.
- BASTOS, B. L. Flora fóssil do Pontal Rip, Ilha Nelson, Península Antártica: taxonomia e contexto geológico. Dissertação, Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. 2012.
- BASTOS, B. L.; DUTRA, T. L., WILBERGER, T. P., TREVISAN, C. Uma Flora do Final do Cretáceo na Ilha Nelson, Ilhas Shetland do Sul, Península Antártica. **Revista brasileira de paleontologia**. 16(3), 439-462. 2013.
- BASTIAS, J., SPIKINGS, R., RILEY, T., ULIANOV, A., GRUNOW, A., CHIARADIA, M., & HERVÉ, F. (2021). A revised interpretation of the Chon Aike magmatic province: active margin origin and implications for the opening of the Weddell Sea. **Lithos**, 386, 106013.
- BARTON, C. M. The geology of the South Shetlands Islands: III. The stratigraphy of King George Island, British **Antarctic Survey Scientific Reports**, vol. 44, p. 33. 1965.
- BERNER, R. A. Phanerozoic atmospheric oxygen: New results using the geocarbsulf model. **American Journal of Science**, v. 309(7), 603-606. 2009.

- BEHRENSMEYER, A. K. HOOK, R.W. Paleoenvironmental contexts and taphonomic modes in the terrestrial fossil record. In Behrensmeyer, A.K., Damuth, J.D., DiMichele, W.A., Potts, R., Sues, H.D. & Wing, S.L. (eds): The evolutionary paleoecology of terrestrial plants and animals, **University of Chicago Press**, Chicago. 15–136. 1992.
- BIRKENMAJER, K., ZASTAWNIAK, E. Late Cretaceous-Early Tertiary flora of King George Island, West Antarctic: Their stratigraphic distribution and paleoclimatic significance. In: J.A Crame (ed) Origins and Evolution of the Antarctic biota. **The Geological Society** (special publication 47), 227-240p. 1989.
- BIRKENMAJER, K. Tertiary volcanic-sedimentary succession at Admiralty Bay, King George Island (South Shetland Islands, Antarctica). **Studia Geologica Polonica**, 64, 7-65. 1980.
- BIRKENMAJER, K. Lithostratigraphy of the Point Hennequin Group (Miocene volcanics and sediments) at King George Islands, Antarctica. **Studia Geologica Polonica**, 72, 59-73. 1981.
- BIRKENMAJER, K. Mesozoic stratiform volcanic-sedimentary succession and Andean intrusions at Admiralty Bay, King George Island (South Shetlands Islands, Antarctica). **Studia Geologica Polonica** 74, 105-154. 1982.
- BIRKENMAJER, K. Mesozoic and Cenozoic stratigraphic units in parts of the South Shetlands Islands and Northern Antarctic Peninsula (as used by the Polish Antarctic Programmes). **Studia Geologica Polonica**. 118, 5-188, 2001.
- BOMFLEUR, B., SCHNEIDER, J. W., SCHÖNER, R., VIERECK-GÖTTE, L., KERP, H. Fossil sites in the continental Victoria and Ferrar groups (Triassic-Jurassic) of north Victoria Land, Antarctica. **Polarforschung**, 80(2), 88-99. 2011.
- BOSE, M. N., TAYLOR, E. L., TAYLOR, T. N. Gondwana Floras of India and Antarctica. A survey and appraisal. In: T.N. Taylor & E.L. Taylor (eds.) **Antarctic Paleobiology**, Springer Verlag, 118-148. 1990.
- BOWMAN, D. M., BALCH, J. K., ARTAXO, P., BOND, W. J., CARLSON, J. M., COCHRANE, M. A., PYNE, S. J. Fire in the Earth system. **Science**, 324(5926), 481-484. 2009.
- BOWMAN, V. C., FRANCIS, J. E., RIDING, J. B. Late Cretaceous winter sea ice in Antarctica? **Geology**, 41(12), 1227-1230. 2013.
- BOWMAN, V. C., FRANCIS, J. E., ASKIN, R. A., RIDING, J. B., SWINDLES, G. T. Latest Cretaceous–earliest Paleogene vegetation and climate change at the high southern latitudes: palynological evidence from Seymour Island, Antarctic Peninsula. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 408. 26-47. 2014.
- BROWN, S. A., SCOTT, A. C., GLASSPOOL, I. J., COLLINSON, M. E. Cretaceous wildfires and their impact on the Earth system. **Cretaceous research**, 36, 162-190. 2012.

- BURNHAM, R. J. Plant deposition in modern volcanic environments. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 84(3-4), 275-281. 1993.
- BURTON-JOHNSON, A., RILEY, T. R. Autochthonous v. accreted terrane development of continental margins: a revised in situ tectonic history of the Antarctic Peninsula. *Journal of the Geological Society*, 172(6), 822-835. 2015.
- CAO, L. Late Cretaceous palynoflora in King George Island of Antarctica with reference to its palaeoclimatic significance. *Stratigraphy and palaeontology of Fildes Peninsula, King George Island. State Antarctic Committee Monograph*, 3, 76-83. 1994.
- CANTRILL, D. J., POOLE, I. Cretaceous patterns of floristic change in the Antarctic Peninsula. *Geological Society, London, Special Publications*, 194(1), 141-152. 2002.
- CANTRILL, D. J., POOLE, I. Taxonomic turnover and abundance in Cretaceous to Tertiary wood floras of Antarctica: implications for changes in forest ecology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 215, 205-219. 2005.
- CANTRILL, D.J., POOLE, I. The Vegetation of Antarctica Through Geological Time. *Cambridge University Press*, New York, 480 p. 2012.
- CANTRILL, D. J., NICHOLS, G. J. Taxonomy and palaeoecology of Early Cretaceous (late Albian) angiosperm leaves from Alexander Island, Antarctica. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 92(1-2), 1-28, 1996.
- CANTRILL, D. J. Cretaceous to Paleogene vegetation transition in Antarctica. In: *Transformative paleobotany*. Academic Press. p. 645-659. 2018.
- CARRILO, L. R., CERDA, L. Zoophytophages associated with Chilean Nothofagus. *BOSQUE*, 8(2), 99-103. 1987.
- CARVALHO, M. R., WILF, P., BARRIOS, H., WINDSOR, D. M., CURRANO, E. D., LABANDEIRA, C. C., JARAMILLO, C. A. Insect leaf-chewing damage tracks herbivore richness in modern and ancient forests. *PloS one*, 9(5), e94950. 2014.
- CARPENTER, FRANK M. Fossil insects from Antarctica. *Psyche*, v. 76(4). 418-425, 1969.
- CHAPMAN, J. L., SMELLIE, J. L. Cretaceous fossil wood and palynomorphs from Williams Point, Livingston Island, Antarctic Peninsula. *Review of Paleobotany and Palynology*, 74. 163-192. 1992.
- CHRISTENHUSZ, M. J. M., CHASE, M. W. Biogeographical patterns of plants in the Neotropics—dispersal rather than plate tectonics is most explanatory. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 171(1), 277-286, 2013.
- COULSON, R. N., WITTER, J. A. *Forest entomology: ecology and management*. John Wiley & Sons. (1984).

DEUTSCH, C. A., TEWKSBURY, J. J., HUEY, R. B., SHELDON, K. S., GHALAMBOR, C. K., HAAK, D. C., MARTIN, P. R. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(18), 6668-6672. 2008.

LIMA, F. J., SAYÃO, J. M., WEINSCHÜTZ, L. C., FIGUEIREDO, R. G., RODRIGUES, T. M., KELLNER, A. W. Wildfires in the Campanian of James Ross Island: a new macro-charcoal record for the Antarctic Peninsula. *Polar Research*, 40. 2021.

DETTMANN, M. E., JARZEN, D. M. Pollen evidence for Late Cretaceous differentiation of Proteaceae in southern polar forests. *Canadian Journal of Botany*, 69(4), 901-906. 1991.

DETTMANN, M. E. Antarctica: Cretaceous cradle of austral temperate rainforests? *Geological Society, London, Special Publications*, 47(1), 89-105. 1989.

DETTMANN, M.E.; POCKNALL, D.T.; ROMERO, E.J., ZAMALOA, M.C. *Nothofagidites* Erdtman ex Potonie, 1960; a catalogue of species with notes on the palaeogeographic distribution of *Nothofagus* Bl. (Southern Beech). *Paleontological Bulletin of the New Zealand Geological Survey*, 60, 1-79. 1990.

DETTMANN, M. E., & JARZEN, D. M. The Antarctic/Australian rift valley: Late cretaceous cradle of northeastern Australasian relicts. *Review of palaeobotany and palynology*, 65(1-4), 131-144. (1990).

DONOVAN, M. P., WILF, P., LABANDEIRA, C. C., JOHSON, K. R., PEPPE, D. J. Novel insect leaf-mining after the end-Cretaceous extinction and the demise of Cretaceous leaf miners, Great Plains, USA. *PLoS One*, 9(7), 103-542, 2014.

DUSÉN, P. Über die tertiäre Flora der Magellans-länder. **Wissenschaftliche Ergebnisse der Schwedischen Expedition nach den Magellandändern** 1895-1897, 1:87-107. 1899.

DUTRA, T. L. Composição e história da vegetação do Cretáceo e Terciário da ilha Rei George, Península Antártica. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul Tese de Doutorado, 1997.

DUTRA, T. L. Informações Preliminares sobre a tafoflora do Monte Zamek (Baía do Almirantado, Ilha Rei George (Ilhas Shetlands do Sul), Antártica. *Série Científica del INACH*, 39, 31-42. 1989.

DUTRA, T. L., HANSEN, M. A. F., & FLECK, A. (1998). New evidences of wet and mild climates in Northern Antarctic Peninsula at the end of Cretaceous. In *Annual Conference of IGCP Project* Vol. 381, No. 3, p. 1998.

DUTRA, T. L. Paleoflora da ilha 25 de Mayo, Península Antártica: contribuição à paleogeografia, paleoclima e para a evolução de *Nothofagus*. *Asociación Paleontología Argentina*, Publicação Especial, 8, 29-37. 2001.

DUTRA, T. L. Paleofloras da Antártica e sua relação com os Eventos Tectônicos e Paleoclimáticos nas altas latitudes do Sul. *Revista Brasileira de Geociências*, 34(3), 401-410. 2004.

DUTRA, T. L., BATTEN, D. J. Upper Cretaceous floras of King George Island, West Antarctica, and their palaeoenvironmental and phytogeographic implications. **Cretaceous Research**, 21(2-3), 181-209. 2000.

DUTRA, T.L. 2000. *Nothofagus* no norte da Península Antártica (ilha King George, ilhas Shetlands do Sul). II. Paleoceno Superior-Eoceno Inferior. **Revista da Universidade Guarulhos, Geociências**, 5,131-136. 2000.

DUTRA, T.L.; WILBERGER, T.P.; IANNUZZI, R.; SANDER, A.; TREVISAN, C. KERKHOFF, M. A new flora to the Rip Point (Nelson Island, Antarctic Peninsula) Resulting from the XXV Brazilian expedition (2006-2007): age and paleoclimatic inferences. In: **Simpósio Brasileiro sobre pesquisa Antártica**, 15, Instituto de Geociências, USP, São Paulo programa e resumos, 12-13p. 2007.

DUTOIT, T., THINON, M., TALON, B., BUISSON, E., ALARD, D. Sampling soil wood charcoals at a high spatial resolution: a new methodology to investigate the origin of grassland plant communities. **Journal of Vegetation Science**, 20(2), 349-358. 2009.

EFREMOV, J. A. Taphonomy: a new branch of geology. **Pan-Am. Geologist**, v. 74, p. 81-93, 1940.

EKLUND, H., First Cretaceous "flowers from Antarctica. Review of Palaeobotany and Palynology 127, 187-217. 2003.

EKLUND, H., CANTRILL, D. J., FRANCIS, J. E. Late Cretaceous plant mesofossils from Table Nunatak, Antarctica. **Cretaceous Research**, v. 25(2), 211-228, 2004.

ELLIOT, D. The James Ross Basin, northern Antarctic Peninsula. In: Congreso Geológico Chileno, 5, **Comunicaciones**, 39: 226. 1988.

ELLIOT, D. H. Triassic-Early Cretaceous evolution of Antarctica. In: Thomson, M. R. A.; Crame, J. A. & Thomson, J. W. (eds.). **Geological Evolution of Antarctic**. Cambridge University Press, Cambridge (Proceedings of the V International Symposium on Antarctic Earth Sciences, Robinson College, Cambridge, 87, 541-547. 1991.

FALCON-LANG, H. J., CANTRILL, D. J. Leaf phenology of some mid-Cretaceous polar forests, Alexander Island, Antarctica. **Geological Magazine**, 138(1), 39-52. 2001.

FISCH, F. Taxonomia e contexto geológico da tafoflora da ilha Dufayel, ilha King George, Península Antártica. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Dissertação de Mestrado, 140 p. 2009.

SANTOS FILHO, E. B., ADAMI-RODRIGUES, K., DE LIMA, F. J., BANTIM, R. A. M., WAPPLER, T., SARAIVA, A. A. F. Evidence of plant-insect interaction in the Early Cretaceous flora from the Crato Formation, Araripe Basin, Northeast Brazil. **Historical Biology**, 31, 926-937. 2017.

FRANCIS, J. E., ASHWORTH, A., CANTRILL, D. J., CRAME, J. A., HOWE, J., STEPHENS, R., THORN, V. 100 million years of Antarctic climate evolution: evidence from fossil plants. **Antarctica: a keystone in a changing world**, VOLUME: 19-28p. 2008.

FERGUSON, D. K. The origin of leaf-assemblages—new light on an old problem. **Review of Palaeobotany and Palynology**, 46,(1-2), p. 117-188, 1985.

FORBES, M. S., RAISON, R. J., SKJEMSTAD, J. O. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems. **Science of the total environment**, 370(1), 190-206, 2006.

FRIIS, E.M., PEDERSEN, K.R., CRANE, P.R. Cretaceous angiosperm flowers: innovation and evolution in plant reproduction. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology** 232, 251–293. 2006.

GANDOLFO, M. A.; ZAMALOA, M. C. Southern high-latitude plant-insect interactions from the Miocene of Tierra del Fuego, Argentina. **International Journal of Plant Sciences**, 182(6), 523-532, 2021.

GARIBALDI, L. A., KITZBERGER, T., RUGGIERO, A. Latitudinal decrease in folivory within *Nothofagus pumilio* forests: dual effect of climate on insect density and leaf traits? **Global ecology and biogeography**, 20(4), 609-619. 2011.

GASTALDO, R. A., ALAIN. Y. Sediment facies, depositional environments, and distribution of phytoclasts in the Recent Mahakam River delta, Kalimantan, Indonesia. **Palaios**, 7, 574-590, 1992.

GLASSPOOL, I. J.; EDWARDS, D., AXE, L. Charcoal in the Silurian as evidence for the earliest wildfire. **Geology**, 5, 381-383, 2004.

GLASSPOOL, I. J.; SCOTT, A. C. Phanerozoic concentrations of atmospheric oxygen reconstructed from sedimentary charcoal. **Nature Geoscience**, 3,(9), 627-630, 2010.

GOLDBERG, E.D. Black Carbon in the Environment: Properties and Distribution. John Wiley & Sons, New York. 1985.

GREENWOOD, DAVID R. Eocene monsoon forests in central Australia. **Australian Systematic Botany**, 9(2), 95-112, 1996.

GREENWOOD, D. R. Taphonomic constraints on foliar physiognomie interpretations of Late Cretaceous and tertiary palaeoclimate. **Review of Palaeobotany and Palynology**, 71, (1-4), 149-190, 1992.

GREENWOOD, D. R.; DONOVAN, S. K. The taphonomy of plant macrofossils. In **The processes of fossilization**, p. 141-169, 1991.

HAOMIN, L; ZHEKUN, Z. Fossil nothofagaceous leaves from the Eocene of western Antarctica and their bearing on the origin, dispersal and systematics of *Nothofagus*. **Science in China Series D: Earth Sciences**, 50(10), 1525-1535, 2007.

HAYES, P. A., FRANCIS, J. E., CANTRILL, D. J., CRAME, J. A. Palaeoclimate analysis of Late Cretaceous angiosperm leaf floras, James Ross Island, Antarctica. **Geological Society, London, Special Publications**, 258(1), 49-62. (2006).

HARLEY, S. L. The geology of Antarctica. **Geology**, 4, 405. 2009.

HARDY, N. B., GULLAN, P. J., HENDERSON, R. C., COOK, L. G. Relationships among felt scale insects (Hemiptera: Coccoidea: Eriococcidae) of southern beech, *Nothofagus* (Nothofagaceae), with the first descriptions of Australian species of the *Nothofagus*-feeding genus *Madarococcus* Hoy. **Invertebrate Systematics**, 22(3), 365-405. 2008.

HERING, E. M. Life History of the Mining Insect. **In *Biology of the Leaf Miners*. Dordrecht: Springer Netherlands. 54-71. 1951.**

HAWKES D.D. The Geology of the South Shetlands Islands. I. The petrology of the King George Island. **Science Reports Falkland Island Department Survey**, 26, 1-28. 1961.

HICKEY, L. J. Evolutionary significance of leaf architectural features in woody dicots. In: **American Journal of Botany**. Ohio state univ-dept botany 1735 neil ave, columbus, oh 43210: **Botanical soc amer inc**, 469. 1971.

HICKEY, L. J., WOLFE, J. A. The bases of angiosperm phylogeny: vegetative morphology. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, 538-589. 1975.

HILL, R. S. Tertiary *Nothofagus* macrofossils from Cethana, Tasmania. **Alcheringa**, 8(1), 81-86. 1984.

HILL, R. S., and Read, J. A revised infrageneric classification of *Nothofagus* (Fagaceae). **Bot. J. Linn. Soc**, 105, 37-72. 1991.

HILL, R. S. *Nothofagus*: evolution from a southern perspective. **Trends in Ecology & Evolution**, 7(6), 190-194. 1992.

HILL, R. S., M. E. Dettmann. Origin and diversification of the genus *Nothofagus*. In: Veblen. T.T., Hill, R.S. & Read, J. (eds.) *The Ecology and Biogeography of Nothofagus Forests*. **Yale University Press**, New Haven. 11-24. 1996.

HILL, R. S. Biogeography, evolution and palaeoecology of *Nothofagus* (Nothofagaceae): the contribution of the fossil record. **Australian Journal of Botany**, 49, 321-332. 2001.

HILL, R. S., ORCHARD, A. E. Composition and endemism of vascular plants. In *Vegetation of Tasmania*. (Eds J.B. Reid, R. S. Hill, M. J. Brown, and M. J. Hovenden). **Australian Biological Resources Study, Canberra**. pp. 89-124. 1999.

HILL, R. S.; JORDAN, G. J. The evolutionary history of *Nothofagus* (Nothofagaceae). **Australian systematic botany**, 6(2), 111-126, 1993.

HOLZ, M.; SIMÕES, M. G. Elementos fundamentais de tafonomia, Ed. **Universidade, Porto Alegre**, p. 231, 2002.

HOOKE, J. D. Botany of the Antarctic Voyage of H. M. Discovery ships "Erebus" and "Terror" in the years 1831-43. Vol. 2: *Flora Novae-Zelandiae*. Pt. 1, Introductory Essay. **Reeve, London**, pp. 209-223. 1853.

- HUBER, B. T., MACLEOD, K. G., WATKINS, D. K., COFFIN, M. F. The rise and fall of the Cretaceous Hot Greenhouse climate. *Global and Planetary Change*, 167, 1-23. 2018.
- IGLESIAS, A. New Upper Cretaceous (Campanian) Flora from James Ross Island, Antarctica. *Ameghiniana*, 53, 358-374. 2016.
- IMADA, Y., OYAMA, N., SHINODA, K., TAKAHASHI, H., YUKAWA, H. Oldest leaf mine trace fossil from East Asia provides insight into ancient nutritional flow in a plant–herbivore interaction. *Scientific Reports*, 12(1), 5254. 2022.
- JONES, T. P., CHALONER, W. G. Fossil charcoal, its recognition and palaeoatmospheric significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 97(1-2), 39-50. 1991.
- JACKES, F. M., SHI, G., LI, H., WANG, W. An early–middle Eocene Antarctic summer monsoon: evidence of ‘fossil climates’. *Gondwana Research*, 25(4), 1422-1428. 2014.
- JASPER, A., POZZEBON–SILVA, Â., CARNIERE, J. S., UHL, D. Palaeozoic and Mesozoic palaeo–wildfires: An overview on advances in the 21st Century. *Journal of Palaeosciences*, 70(1-2)), 159-172. 2021.
- JORDAN, G. J., R. S. HILL. The phylogenetic affinities of *Nothofagus* leaf fossils based on combined molecular and morphological data. *International Journal of Plant Science* 160, 1177-1188. 1999.
- JORDAN, T. A.; RILEY, T. L R.; SIDDOWAY, C. S. The geological history and evolution of West Antarctica. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(2), 117-133, 2020.
- NIXON, K. C. Origins of Fagaceae. In: Crane PR, Blackmore S.(eds) **Evolution, systematics, and fossil history of the Hamamelidae**, 2, 23-43. 1989.
- NIXON, K. C. In support of recognition of the family Nothofagaceae Kuprianova. **Botanical Society of America, Miscellaneous Publication**, 162, 102. 1982.
- KELLNER, A. W. A.; DUTRA, T. L.; CARVALHO, M. A.; RAMOS, R. R. C.; GRILLO, O. N.; SILVA, H. P.; RIFF, D. ROMANO, P. S. R. First record of fossil leaves from the Keller Peninsula, King George Island, Antarctica. In: CARVALHO, I. S.; CASSAB, R. C. T.; SCHWANKE, C. *et al* (eds.). **Paleontologia: Cenários da Vida**, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 635-644p. 2007.
- KELLOGG, DEREK W.; TAYLOR, EDITH L. Evidence of oribatid mite detritivory in Antarctica during the late Paleozoic and Mesozoic. *Journal of Paleontology*, 78, (6), 1146-1153, 2004.
- KIDWELL, S. M.; FLESSA, K. W. The quality of the fossil record: populations, species, and communities. *Annual Review of Ecology and Systematics*, p. 269-299, 1995.
- KVAČEK, J. & SAKALA. 2011. Late Cretaceous flora of James Ross Island (Antarctica) – preliminary report. *Czech Polar Reports*, 1(2), 96-103.

KVAČEK, J. *Marattiopsis vodrazkae* sp. nov. (Marattiaceae) from the campanian of the Hidden lake Formation, James Ross island, antarctica. **Acta Musei Nationalis Pragae Series, Historia Naturalis**, 70(3), 211-218. 2014.

KVAČEK, J., VODRÁŽKA, R. Late Cretaceous flora of the hidden lake formation, James Ross Island (Antarctica), its biostratigraphy and palaeoecological implications. **Cretaceous Research**, 58, 183-201. 2016.

KEMP, D. B., ROBINSON, S. A., CRAME, J. A., FRANCIS, J. E., INESON, J., WHITTLE, R. J., O'BRIEN, C. A cool temperate climate on the Antarctic Peninsula through the latest Cretaceous to early Paleogene. **Geology**, 42(7), 583-586. 2014.

LABANDEIRA, C. Why did terrestrial insect diversity not increase during the angiosperm radiation? Mid-Mesozoic, plant-associated insect lineages harbor clues. **Evolutionary biology: genome evolution, speciation, coevolution and origin of life**, 261-299. 2014.

LABANDEIRA, C. C. The history of associations between plants and animals. **Plant–animal interactions: an evolutionary approach**, 248, 261. 2002.

LABANDEIRA, C. C. The four phases of plant–arthropod associations in deep time. **Geologica Acta**, 4, 409-438. 2006.

LABANDEIRA, C. C., WILF, P., JOHNSON, K. R., MARSH, F. Guide to insect (and other) damage types on compressed plant fossils. **Smithsonian Institution, National Museum of Natural History**, Department of Paleobiology, Washington, DC. Smithsonian. Inst. Version 3.0. 2007.

LABANDEIRA, C. C. Ecology and evolution of gall-inducing arthropods: The pattern from the terrestrial fossil record. **Frontiers in Ecology and Evolution**, 9, 632-449. 2021.

LARTER, R. D.; BARKER, P. F. Neogene interaction of tectonic and glacial processes at the Pacific margin of the Antarctic Peninsula. **Sedimentation, Tectonics and Eustasy: Sea-Level Changes at Active Margins**, p. 165-186, 1991.

LEPPE, M., MIHOC, M., VARELA, N., STINNESBECK, W., MANSILLA, H., BIERMA, H., JUJIHARA, T. Evolution of the Austral-Antarctic flora during the Cretaceous: New insights from a paleobiogeographic perspective. **Revista Chilena de História Natural**, 85: 369-392. 2012.

LI, J., ZHEN, S. New materials of bird ichnites from Fildes Peninsula of King George Island, Antarctica and their biogeographic significance. *In*: SHEN, Y. (ed.). Stratigraphy and Palaeontology of Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica. Monograph, **Beijing Science Press**, China, 3: 246-257. 1994.

LIMA, F. J., SAYÃO, J. M., DE OLIVEIRA, L. C., WEINSCHÜTZ, L. C., FIGUEIREDO, R. G., RODRIGUES, T. M., KELLNER, A. W. Wildfires in the Campanian of James Ross Island: a new macro-charcoal record for the Antarctic Peninsula. **Polar Research**, 40. (2021).
LINDER, H. P., CRISP M. D. *Nothofagus* and pacific biogeography. **Cladistics**, 11, 5-32. 1995.

- MANFROI, J., DUTRA, T. L., GNAEDINGER, S., UHL, D; JASPER, A. The first report of a Campanian palaeo-wildfire in the West Antarctic Peninsula, **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 418, 12–18. 2015.
- MCCARRON, J. J., LARTER, R. D. Late Cretaceous to early Tertiary subduction history of the Antarctic Peninsula, **J. Geological Society of London**, 155, 255-268. 1998.
- MCQUILLAN, P. B. Nothofagus (Fagaceae) and its invertebrate fauna—an overview and preliminary synthesis. **Biological Journal of the Linnean Society**, 49(4), 317-354. 1993.
- MACCRACKEN, S. A., SOHN, J. C., MILLER, I. M., LABANDEIRA, C. C. A new Late Cretaceous leaf mine *Leucopterosa spirala* gen. et sp. nov. (Lepidoptera: Lyonetiidae) represents the first confirmed fossil evidence of the Cemistominae. **Journal of Systematic Palaeontology**, 19(2), 131-144. (2021).
- MCDONALD, C. M., FRANCIS, J. E., COMPTON, S. G. A., HAYWOOD, A., ASHWORTH, A. C., HINOJOSA, L. F., SMELLIE, J. Herbivory in Antarctic fossil forests: evolutionary and palaeoclimatic significance. Online Proceedings of the 10th ISAES X, edited by A.K. Cooper and C.R. Raymond et al., USGS Open-File Report 2007-1047, Extended Abstract 059, 4 p. 2007.
- MACDONALD, D. I. M., JEFFERSON, T. H. Orientation studies of waterlogged wood: A paleocurrent indicator, **J. Sediment. Petrol**, 55,235-239. 1985.
- MATHIASSEN, P., VIDOZ, F., VALLE, S., OJEDA, V. S., ACOSTA, M. C., IPPI, S., PREMOLI, A. C. Primeros registros de presencia de *Nothofagus nitida* (Nothofagaceae) en Argentina y estimación de su área de distribución potencial. **Bosque (Valdivia)**, 38(3), 467-477. 2017.
- MCLOUGHLIN, S. The breakup history of Gondwana and its impact on pre-Cenozoic floristic provincialism. **Australian Journal of Botany**, 49(3), 271-300. 2001.
- MILLAR, I. L., PANKHURST, R. J., FANNING, C. M. Basement chronology of the Antarctic Peninsula: recurrent magmatism and anatexis in the Palaeozoic Gondwana margin. **Journal of the Geological Society**, 159(2), 145-157. 2002.
- MÖLLER, A. L., KAULFUSS, U., LEE, D. E., WAPPLER, T. High richness of insect herbivory from the early Miocene Hindon Maar crater, Otago, New Zealand. **PeerJ**, 5, 2985. 2017.
- NICHOLS, G.J., CRIPPS, J., COLLINSON, M.E., SCOTT, A.C. Experiments in waterlogging and sedimentology of charcoal: results and implications. **Palaeogeography, Palaeoclimatology Palaeoecology** 164, 43–56. 2000.
- OHLSON, M., TRYERUD, E. Interpretation of the charcoal record in forest soils: forest fires and their production and deposition of macroscopic charcoal. **Holocene**, 10, 519–525. 2000.
- OSTERKAMP, I. C., LARA, D. M. D., GONÇALVES, T. A. P., KAUFFMANN, M., PÉRICO, E., STÜLP, S., JASPER, A. Changes of wood anatomical characters of selected

species of *Araucaria*-during artificial charring-implications for palaeontology. **Acta Botanica Brasilica**, 32, 198-211. 2017.

PAYNE, R. J., EGAN, J. Using palaeoecological techniques to understand the impacts of past volcanic eruptions. **Quaternary International**, 499, 278-289. 2019.

PANTI, C. Southern beech (*Nothofagaceae*) fossil leaves from the Río Turbio formation (Eocene-? Oligocene), Santa Cruz Province, Argentina. **Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales**, 21(1), 69-85. 2019.

PEDERNERA, T. E., MANCUSO, A. C., OTTONE, E. G. The influence of volcanic activity and trophic state on plant taphonomic processes in Triassic lacustrine-deltaic systems of western Gondwana. **Lethaia**, 54(4), 521-539. 2021.

PLUMSTEAD, E. P. Fossil floras o Antarctica. Trans-Antarctic Exped., 1955-1958. **Sci. ReL**, 9:66 and pl. 11, fig. 2. 1962.

POLE, M. S. Cretaceous macrofloras of eastern Otago, New Zealand: Angiosperms. **Australian Journal of Botany**, 40, 169-206. 1992.

POLE, M. *Nothofagus* from the Dunedin Volcanic Group (Mid—Late Miocene), New Zealand. **Alcheringa**, 17(1), 77-90. 1993.

POOLE, I., HUNT, R. J. CANTRILL, D. L. A Fossil Wood Flora from King Georg Island: Ecological Implications for an Antarctic Eocene Vegetation. **Annals of Botany**, 88, 33-54. 2001.

POOLE, I., CANTRILL, D. J. Cretaceous and Cenozoic vegetation of Antarctica integrating the fossil wood record. **Geological Society**, London, Special Publications, 258(1), 63-81. 2006.

PRICE, P. W. Resource-driven terrestrial interaction webs. **Ecological Research**, 17, 241-247. 2002.

PRICE, G. D., NUNN, E. V. Valanginian isotope variation in glendonites and belemnites from Arctic Svalbard: Transient glacial temperatures during the Cretaceous greenhouse. **Geology**, 38(3), 251-254. 2010.

PYNE, S.J., ANDREWS, P.L., LAVEN, R.D. Introduction to Wildland Fire. J. **Wiley and Sons**, New York. 769 pp. 1996.

QUIROGA, M. P., MATHIASSEN, P., IGLESIAS, A., MILL, R. R., PREMOLI, A. C. Molecular and fossil evidence disentangle the biogeographical history of *Podocarpus*, a key genus in plant geography. **Journal of Biogeography**, 43(2), 372-383. 2016.

READ, J., G. S. HOPE. Ecology of *Nothofagus* forests of New Guinea and New Caledonia. In: Kidwe. T.T., Hill, R.S. & Read, J. (eds.) The Ecology and Biogeography of *Nothofagus* Forests, **Yale University Press**, New Haven. 200-256. 1999.

REGUERO, M.A., GOIN, F., HOSPITALECHE, C.A., DUTRA, T.L., MARENSSI, S. Late Cretaceous/Paleogene West Antarctica Terrestrial Biota and its intercontinental affinities. **Springer Briefs in Earth System Sciences South America and the Southern Hemisphere**, 120 p. 2013.

REGUERO, M. A., OLIVERO, E. B., POL, D. Gondwanan perspectives: Cretaceous—Paleogene biota of west Antarctica. **Ameghiniana**, 53(3), 241-244. 2016.

REICHGELT, T., JONES, W. A., JONES, D. T., CONRAN, J. G., LEE, D. E. Diverse and abundant insect herbivory on Miocene Nothofagaceae of the Dunedin Volcano, Otago, New Zealand. **Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments**, 96, 265-279. 2015.

RILEY, T., KNIGHT, K. Age of Pre-Break-Up Gondwana Magmatism. **Antarctic Science**, 13(2): 99-110. 2004.

RILEY, T. R., FLOWERDEW, M. J., PANKHURST, R. J., CURTIS, M. L., MILLAR, I. L., FANNING, C. M., WHITEHOUSE, M. J. Early Jurassic magmatism on the Antarctic Peninsula and potential correlation with the Subcordilleran plutonic belt of Patagonia. **Journal of the Geological Society**, 174(2), 365-376. 2017.

REDFERN, M., SHIRLEY, P., BLOXHAM, M. British plant galls: identification of galls on plants and fungi. **FSC publications**. 2002.

ROMERO EJ, RODRIGUEZ AMENABAR C, ZAMALOA MC, CONCHEYRO G. *Nothofagus* and the associated palynoflora from the late cretaceous of vega Island, Antarctic Peninsula. **Polar Reserach**, 40(3), 227–253. 2019.

REES, P. M., SMELLIE, J. L. Cretaceous angiosperms from an allegedly Triassic flora at Williams Point, Livingston Island, South Shetlands Islands. **Antarctic Science**, 1(3), 239-248. 1989.

RUSSELL, G. B., BOWERS, W. S., KEESING, V., NIEMEYER, H. M., SEVENET, T., VASANTHAVERNI, S., WRATTEN, S. D. Patterns of bioactivity and herbivory on *Nothofagus* species from Chile and New Zealand. **Journal of Chemical Ecology**, 26, 41-56. 2000.

SAKALA, J., & VODRÁŽKA, R. A new species of *Antarctoxylon*: a contribution to the early angiosperm ecosystem of Antarctica during the late Cretaceous. **Antarctic Science**, 26(4), 371-376. 2014.

SCOTT, A.C., The Pre-Quaternary history of fire. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 164, 281–329. 2000.

SCOTT, A. C. Preservation by fire. **Palaeobiology II**, p. 277-280. 2001.

SCOTT, ANDREW C. Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironmental analysis. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 291(1-2), 11-39. 2010.

SCOTT, A. C., SPARKS, R. S. J., BULL, I. D., KNICKER, H., EVERSLED, R. P. Temperature proxy data and their significance for the understanding of pyroclastic density currents. **Geology**, 36(2), 143-146. 2008.

SCOTT, A. C. Forest fire in the fossil record. In: **Fire effects on soils and restoration strategies**. CRC Press, p. 17-54. 2009.

SCOTT, A.C. Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironmental analysis. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 291, 11–39. 2010.

SCOTT, ANDREW C. Observations on the nature and origin of fusain. **International Journal of Coal Geology**, 12(1-4), 443-475. 1989.

SCOTT, A. C. The burning issue. **Nature Geoscience**, 1(10), 643-644. 2008.

SCOTT, A. C., GLASSPOOL, I. J. Charcoal reflectance as a proxy for the emplacement temperature of pyroclastic flow deposits. **Geology**, 33(7), 589-592. 2005.

SCOTT, A. C., JONES, T. P. The nature and influence of fire in Carboniferous ecosystems. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 106(1-4), 91-112. 1994.
SHEN, Y. *Stratigraphy and palaeontology of Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica*. **Science Press**. 1994.

SLATER, B. J., MCLOUGHLIN, S., HILTON, J. Animal–plant interactions in a middle Permian permineralised peat of the Bainmedart Coal Measures, Prince Charles Mountains, Antarctica. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 363, 109-126. 2012.

SLATER, B. J. Fossil Focus: Arthropod-plant interactions. **Palaeontology Online**, 4, 1-17, 2014.

SMELLIE, J. L., PANKHURST, R. J., THOMSON, M. R. A. DAVIES, R. E. S. The geology of the South Shetlands Islands: VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution. **British Antarctic Survey Scientific Reports**, 87, 1-85. 1984.

SPICER, R.A. Changing climate and biota. In: Skelton, P. (Ed.), *The Cretaceous World*. **Cambridge University Press**, Cambridge, pp. 85-163. 2003.

SPICER, R. A. Plant taphonomic processes. **Taphonomy: releasing the data locked in the fossil record**, 9, 71-113. 1991.

SPICER, R. A. The formation and interpretation of plant fossil assemblages. In: *Advances in botanical research*. **Academic Press**, 95-191. 1989.

SPICER, R. A., PARRISH, J. T. Paleobotanical evidence for cool north polar climates in middle Cretaceous (Albian-Cenomanian) time. **Geology**, 14(8), 703-706. 1986.

SWENSON, U., HILL, R. S., MCLOUGHLIN, S. Biogeography of *Nothofagus* supports the sequence of Gondwana break-up. **Taxon**, 50(4), 1025-1041. 2001.

TANAI, T. Phytogeographic and phylogenetic history of the genus *Nothofagus* Bl.(Fagaceae) in the southern hemisphere. **Hokkaido University Faculty of Science Newsletter**, 21(4), 505-582. 1986.

TOSOLINI, A. M. P., CANTRILL, D. J., FRANCIS, J. E. Paleocene flora from Seymour Island, Antarctica: revision of Dusén's angiosperm taxa. **Alcheringa: An Australasian Journal of Palaeontology**, 37(3), 366-391. 2013.

TOSOLINI, A. M. P., CANTRILL, D. J., FRANCIS, J. E. Paleocene high-latitude leaf flora of Antarctica Part 1: entire-margined angiosperms. **Review of Palaeobotany and Palynology**, 285, 104317. 2021.

TOBIN, T. S., WARD, P. D., STEIG, E. J., OLIVERO, E. B., HILBURN, I. A., MITCHELL, R. N., KIRSCHVINK, J. L. Extinction patterns, $\delta^{18}\text{O}$ trends, and magnetostratigraphy from a southern high-latitude Cretaceous–Paleogene section: Links with Deccan volcanism. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 350, 180-188. 2012.

TREVISAN, C. Fósseis de pteridófitas das ilhas King George e Nelson: afinidade taxonômica e importância no contexto deposicional e do clima nas áreas setentrionais da Península Antártica. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Dissertação de Mestrado, 44 p. 2011.

TREVISAN, C., DUTRA, T., IANUZZI, R., SANDER, A., WILBERGER, T., MANRÍQUEZ, L. M. E., ... & LEPPE, M. (2022). *Coniopteris antarctica* sp. nov. (Pteridophyta) and associated plant assemblage from the Upper Cretaceous of Rip Point, Nelson Island, Antarctica. **Cretaceous Research**, 136, 105185.

VAN STEENIS, C. G. G. J. *Nothofagus*, key genus of plant geography, in time and space, living and fossil, ecology and phylogeny. **Blumea**, 19, 65-98. 1971.

VERGARA, O., JEREZ, V. Insectos e infestaciones asociadas al follaje de *Nothofagus antarctica* (Forst) Oerst (Nothofagaceae) en la cuenca del río Baker, Región de Aysén, Chile. **Gayana (Concepción)**, 74(2), 83-93. 2010.

WILF, P., LABANDEIRA, C. C., JOHNSON, K. R., ELLIS, B. Decoupled plant and insect diversity after the end-Cretaceous extinction. **Science**, 313(5790), 1112-1115. 2006.

WILLAN, R. C. R., HUNTER, M. A. Basin evolution during the transition from continental rifting to subduction: Evidence from the lithofacies and modal petrology of the Jurassic Latady Group, Antarctic Peninsula. **Journal of South American Earth Sciences**, 20(3), 171-191. 2005.

WING, S. L., DIMICHELE, W. A. Conflict between local and global changes in plant diversity through geological time. **Palaos**, p. 551-564. 1995.

YANBIN, S. Stratigraphy and Palaeontology of Fields Peninsula, King George Island, Antarctica. Monograph, **Science Press**, 3, 329-348. 1994.

ZASTAWNIAK, E. Tertiary leaf flora from the Point Hennequin Group of King George Island (South Shetlands Islands, Antarctica): **preliminary report**. 1981.

ZASTAWNIAK, E. Upper Cretaceous leaf flora from the Blaszyk Moraine Zamek Formation, King George Island, South Shetlands Islands, West Antarctica. **Acta Palaeobotanica**, 34(2), 119-163. 1994.

ZEUNER, F. E. Jurassic Beetles from Grahamland, Antarctica. **Palaeontology**, v. (4), 407-409. 1959.

ZHIYAN, Z., HAOMIN, L. Some Late Cretaceous plants from King George Island, Antarctica. **Stratigraphy and palaeontology of Fildes Peninsula, King George island, Antarctica. State Antarctic Committee, Monograph**, 3, 85-96. 1994.

ZHOU, Z.Y., LI, H.M. Early Tertiary gymnosperms from Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica. In: Shen, Y.B. (Ed.), **Stratigraphy and Palaeontology of Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica, Science Press, Beijing**, 191-221. 1994a.

APÊNDICE

APÊNDICE A – ARTIGO DE PARTE DOS RESULTADOS DA TESE PUBLICADO NO PERIÓDICO “ANAIS DA ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS” (2023) E INTITULADO: FIRST RECORD OF INSECT-PLANT INTERACTION IN LATE CRETACEOUS FOSSILS FROM NELSON ISLAND (SOUTH SHETLANDS ISLANDS ARCHIPELAGO), ANTARCTICA

Santos Filho, Edilson Bezerra dos; Brum, Arthur Souza Brum da Costa; Souza, Geovane Alves de; Figueiredo, Rodrigo Giesta; Usma, Cristian D.; Ricetti, João Henrique; Trevisan, Cristine; Leppe, Marcelo; Sayão, Juliana Manso; Lima, Flaviana Jorge de; OLIVEIRA, G.R.; Kellner, Alexander Wilhelm Armin. First record of insect-plant interaction in Late Cretaceous fossils from Nelson Island (South Shetlands Islands Archipelago), Antarctica. ANAIS DA ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS, v. 95, p. e20231268, 2023.



PALEONTOLOGY

First record of insect-plant interaction in Late Cretaceous fossils from Nelson Island (South Shetland Islands Archipelago), Antarctica

EDILSON B. DOS SANTOS FILHO, ARTHUR S. BRUM, GEOVANE A. DE SOUZA, RODRIGO G. FIGUEIREDO, CRISTIAN D. USMA, JOÃO HENRIQUE Z. RICETTI, CRISTINE TREVISAN, MARCELO LEPPE, JULIANA M. SAYÃO, FLAVIANA J. LIMA, GUSTAVO R. OLIVEIRA & ALEXANDER W.A. KELLNER

Abstract: Despite the enormous paleobotanical record on different islands of the Antarctic Peninsula, the evidence of insect activity associated with fossilized plants is scarce. Here we report the first evidence of insect-plant interaction from Cretaceous deposits, more precisely from a new locality at the Rip Point area, Nelson Island (Antarctic Peninsula). The macrofossil assemblage includes isolated *Nothofagus* sp. leaf impressions, a common component of the Antarctic paleoflora. Two hundred leaves were examined, of which 15 showed evidence of insect activity, displaying variations in size, shape, and preservation. Two types of interaction damage, galls and mines, were identified. A single specimen retained a circular scar recognized as galling scar, while meandering tracks were considered mines. These traces of herbivore insect activity, correspond to the oldest known record of this type of interaction of West Antarctica and the oldest record of insect-plant interaction in *Nothofagus* sp. reported so far.

Key words: Paleocology, Nelson Island, insect-plant interaction, Cretaceous, Antarctica.

INTRODUCTION

Nowadays, Antarctica is the most inhospitable and isolated continent, protected by the Antarctic Treaty (Santos 2021, Sampaio 2022), but not immune to anthropogenic influence (e.g., Schwanck et al. 2022). Having about 98% of its surface covered by ice, scientific activity in this region sparks the imagination of the public (Kellner 2022) and is increasingly more diverse and complex (e.g., Simões et al. 2022). However, during the Cretaceous, this continent experienced a much warmer environment, supporting temperate forests with floristic assemblages, thriving similar to the present-day ecosystems found in Chile, Australia, and New Zealand (Cantrill & Poole 2012). Once plants

comprise the base of most terrestrial trophic webs and insects are the main herbivores on land, it is expected that these distinct groups of organisms developed some ecological association through their evolutionary histories. The fossil record indicates that such plant-insect associations existed throughout the last 420 million years (Mya), originating in the Devonian or perhaps earlier (Anderson & Trewin 2003, Labandeira 2013, Möller et al. 2017). Thus, insect-plant interactions in the fossil record are identified since plants advanced on land, enabling us to understand the earliest diversification of phytophagous insects, community dynamics, paleoclimate, and the establishment of coevolution between

plants and insects throughout time (Gandolfo & Zamaloa 2021).

Given the importance of insect herbivory in extant ecosystems, there is a need to understand how this ecological relationship operated in the past. Fossil evidence of insect herbivory include incomplete leaf margins damaged by external foliage feeders, leaves perforations made by piercing-and-sucking feeding apparatuses, oviposition and galling processes, seed predation, coprolites into vegetal tissue, among others. The interaction on plant tissue is evidenced by reaction/damage tissues (Van Amerom 1966, Van Ameron & Josten 1973, Van Amerom & Boersma 1971, Scott & Taylor 1983, Labandeira & Phillips 1996, Labandeira & Allen 2007).

Leaf mines are the most easily recognizable structures among all types of damage (Slater et al. 2012). These are produced by larvae of holometabolous insect orders, which consume living parenchyma through its growing instars, inside the leaf of the host plant (Labandeira 2002, 2006, Imada et al. 2022), a habit developed in the Late Triassic (Labandeira 2006, Labandeira & Currano 2013). The subsequent diversification of angiosperms during the Cretaceous resulted in the diversification of phytophagous insect clades and, consequently, an array of extraordinary novel ways to interact and produce mines in plant organs (Stephenson & Scott 1992, Labandeira et al. 1994, Ding et al. 2015, Filho et al. 2017). Leaf mines dug by insects have been extensively described in an array of Cenozoic angiosperms (Crane & Jarzembowski 1980, Wilf et al. 2005, McDonald et al. 2007). Although comprehensive descriptions of leaf miners in Cretaceous angiosperms are documented (Labandeira et al. 1994, Krassilov et al. 2007, Donovan et al. 2014), records of such interactions in plants that inhabited the Gondwanan landmasses are scarce.

Among the Gondwana endemic angiosperm lineages, *Nothofagus* is a basal lineage of Fagales, represented by 43 extant species of trees and shrubs that occur in South America, Australia, Tasmania, New Zealand, New Caledonia, and New Guinea (Swenson et al. 2001). *Nothofagus* first appeared in the Late Cretaceous (McGlone et al. 1996) and is particularly relevant, once its origin and dispersion center seem to be Antarctica, where they are currently extinct (Leppe et al. 2012, Vento et al. 2022). A phylogenetic analysis supports the early diversification of this taxon, as it reveals Paleogene fossil leaves from Patagonia closely related to modern species (Vento et al. 2022). Antarctic *Nothofagus* fossils are represented for all by leaf impressions, but wood fragments, branches, and pollens have been also reported (Hill & Jordan 1993, Hill 2001, Cantrill & Poole 2012).

Despite *Nothofagus* becoming extensively documented in Upper Cretaceous and Lower Paleogene sedimentary sequences of Antarctic (Birkenmajer & Zastawniak 1989, Hunt & Poole 2003, Hayes et al. 2006, Kellner et al. 2007, Cantrill & Poole 2012, Tosolini et al. 2021), their ecological interactions were not examined in detail and comprehensive descriptions of interaction traces associated with these fossils are still sparse (McDonald et al. 2007).

Recent field efforts have yielded dozens of *Nothofagus* leaf specimens from siliciclastic and volcanoclastic Upper Cretaceous Fildes Formation of Nelson Island, at the Antarctic South Shetland Islands. Some exhibit numerous, serpentine, high-relief, channel-like lineation identifiable as mine trace fossils. In this paper we examine and describe these structures, comparing them with trace fossils found in other Cretaceous and Cenozoic plants. This new evidence represents the oldest record of leaf mines of West Antarctica and the oldest record of insect-plant interaction in *Nothofagus*. Therefore, it provides

new data on the Antarctic ecosystem during its separation from Gondwana and reports the interactions between herbivorous insects and the angiosperm *Nothofagus* in higher latitudes.

Geologic background

The fossil plants were collected from a new fossil site that crops out in the Northeastern region of Rip Point on Nelson Island at the South Shetland Islands Archipelago (62°14'18.2"S/ 58°58'58.2"W) (Figure 1). The layers belong to the Fossil Hill Formation and are composed of basalt-andesitic suit of lava, interbedded with siliciclastic (sandstones and silty shales) and volcanoclastic (tuffite) horizons, intruded by coarse breccias. These layers are exposed at sea level and form the rocky coastline being accessible only during low tides periods. The sandstones and silty shales vary from light gray to dark gray and reddish color. All the leaf impressions studied here came from this level and predominantly represent *Nothofagus* sp. Above this horizon lies a decimeter tuffite horizon with abundant compressed fragments of carbonized wood varying from 2 cm to 0.6 m. The tuffite layer is extensively intruded by well-rounded boulder-dominated breccias, generally 0.2 to 0.4 m in diameter. The laterally impersistent nature of these beds, which is recurrent in clastic rocks of Nelson and Fildes Peninsula (Southern King George Island), prevent their assignment to a specific lithostratigraphic unit. However, the lithology is similar to those of the lower and middle members of the Fildes Formation. The floristic association suggests that these levels are of Upper Cretaceous-Lower Paleogene age. Previous studies based on the paleoflora composition have indicated a Campanian age (e.g., Shen 1994, Dutra 1997, Dutra & Batten 2000, Trevisan et al. 2022, Bastos et al. 2012, Manfroi et al. 2015, Lima et al. 2021).

MATERIALS AND METHODS

The materials were collected during the 38th Brazilian Antarctic Expedition by the research team of the PALEOANTAR Project (Lima et al. 2021, Piovesan et al. 2021, Santos et al. 2022, Brum et al. 2022, 2023) on Nelson Island (Figure 2). The field work was carried out between December 2019 and January 2020, totaling 48 days (Figueiredo et al. 2020, Kellner 2020). The survey resulted in 1.5 tons of fossil and geological materials. All fossil plants are housed in the paleobotany collection of Museu Nacional/Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

The paleoflora from this site consist of horsetails (Lycophyta), ferns (Pteridophyta), podocarps, araucarias (Gymnosperms), and *Nothofagus* (Angiosperms). For the present study, only material referable to *Nothofagus*, which is the most predominant fossil plant (Bastos et al. 2012), was considered. About 200 specimens were analyzed under a Stereoscopic Microscope in the Laboratório de Paleontologia of the Universidade Regional do Cariri (URCA). The specimens were measured using a digital caliper and photographs were taken using a Canon EOS 60d digital camera.

Leaf mines were classified following the standard Damage Type System (DT) proposed by Labandeira et al. (2007), which consists of a classification of different types of damage caused by arthropods based on their morphology. The discrimination between insect-inflicted damage and other physical damages, such as those caused by detritivores agents or taphonomic processes, were identified using the following criteria: (1) presence of reaction tissue (an anomalous tissue growth formed by hyperplasia in areas attacked by insects); (2) specificity of a plant taxon or organ to which specific damage can be attributed; and (3) the repetition pattern and shape of damage in specific plant organs

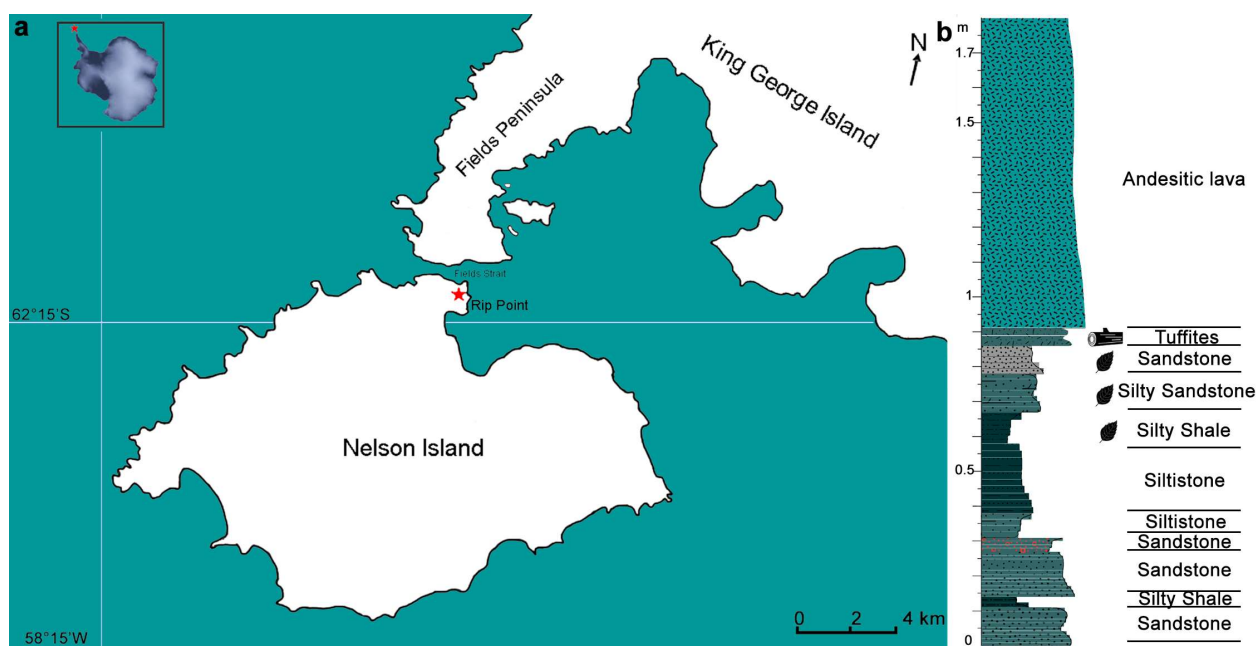


Figure 1. a) Location of the site at Rip Point (Nelson Island) where the specimens were collected. **b)** Stratigraphic profile of the site. The occurrences of tree trunks and leaves are marked in the stratigraphic column. Modified from Trevisan (2011).

(Maccracken et al. 2022). The latter can be evidenced by the presence of mines in leaves, which are usually recognized by their distinctive morphological patterns.

RESULTS

Host plant assemblage

The dense leaf accumulation, devoid of predominant orientations of the *Nothofagus* sp. leaves, indicates that the beds correspond to a leaf aggregation assemblage, presenting a parautochthonous assemblage of deciduous species. The leaf impressions lack organic connections, being mostly represented by incomplete leaf blades. Detailed morphological features are scarce due to poor preservation.

Insect-plant interactions

Out of the 200 leaves examined, 15 show evidence of insect activity, varying in size, shape, and preservation modes. Two types of interaction damage were identified: galls and

mines (Figure 3). Only one specimen preserved a circular scar, identified here as a galling scar. Meandering tracks with unhindered paths were regarded as mines (Table I). These tracks were variable in size, widths, and shapes as described below.

Although mines extend freely through the leaves, crossing secondary and tertiary veins, they rarely cross the main vein. The vascular tissues were not consumed by the phytophagous trackmaker once no reaction tissue or distortions in the crossed leaf venation were observed. The mines maintain a regular width through their trajectory (Table I).

Host plant

The dense accumulation lacking predominant orientations of the *Nothofagus* sp. leaves indicates that the beds correspond to a leaf litter, presenting a parautochthonous assemblage of deciduous species. The leaf impressions lack organic connections, being mostly represented

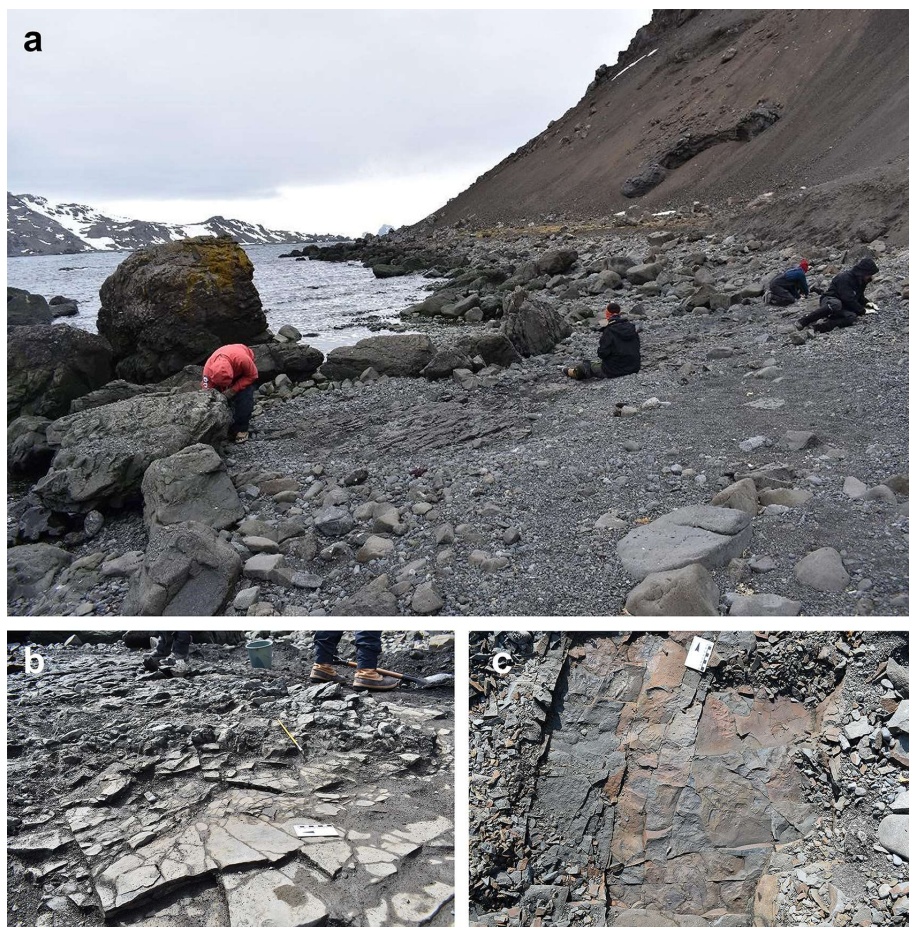


Figure 2. a) Fossil collection site at Rip Point (62°14'18.2\"/>

by incomplete leaf blades. Therefore, due to their preservation, morphological characters are scarce.

Specific descriptions

Specimen 464Pbe (Figure 4a) is a small fragment of a leaf impression (31 x 23 mm), that presents a small serpentine mine measuring 22 mm. It nests between two secondary veins. The specimen 462Pbe (55 x 27 mm) contains a small, slender, and serpentine mine that intersects secondary veins until reaching the leaf margin, measuring 13 mm in length (Figure 4b). In specimen 460Pbe, there is a longer sigmoid mine, measuring 44 mm, starting close to the base, going towards the right margin, crossing the secondary vein in its path. This specimen

also preserves two circular galls between two secondary veins, measuring 3 mm (Figure 3). The specimen 470Pbe (73 x 47 mm) presents a straight mine measuring 1.5 mm in length, crossing secondary veins on the left part of the leaf (Figure 4c). On the right side of the leaf blade, there is a bifurcated mine towards the leaf base, measurements of 20 mm and 12 mm in each bifurcation, respectively.

The specimen 461Pbe (64 x 48 mm) exhibits small mines, one of which forms a complete circle measuring 30 mm in the upper region of the leaf, close to the leaf apex between the secondary veins (Figure 4d). Also, this specimen presents signs of leaf consumption along the mines, which is rare in the fossils analyzed here.

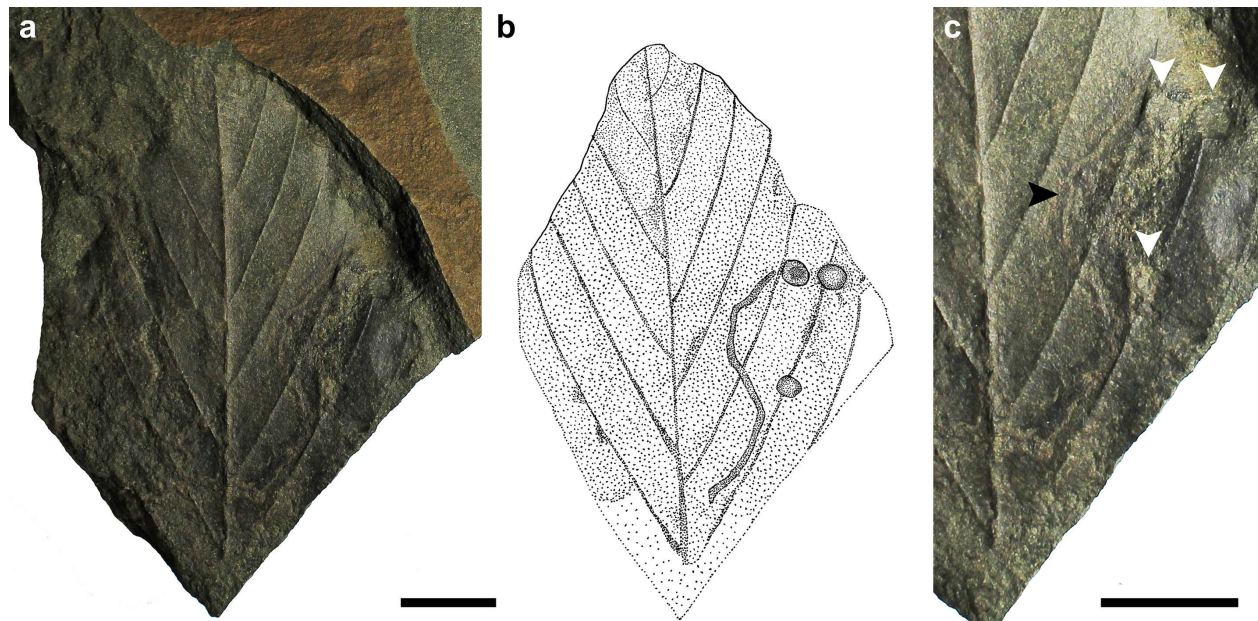


Figure 3. Specimen 460Pbe containing mine and galls. a) Complete view of the specimen. b) Schematic drawing with emphasis on the observed structures. c) Details of the mine and galls. White arrows: galls. Black arrow: mine. Scale: 5 mm.

Table I. Summary of hallmarks on Nelson Island fossils.

Specimen	Type of interaction	DT	Comments
460Pbe	Mine and galls	94	Small, serpentine, between secondary veins. Circular galls between secondary veins and mines
461Pbe	Mine	93	Circular, bifurcated, between secondary veins
462Pbe	Mine	141	Thin, serpentine, between secondary veins
463Pbe	Mine	41	Serpentine, one end curved
464Pbe	Mine	105	Small, serpentine, between secondary veins
465Pbe	Mine	90	Straight, transverse to the secondary veins
466Pbe	Mine	41	Small, crossing secondary veins
467Pbe	Mine	105	Small, curved, between secondary veins
468Pbe	Mine	105	Sinuuous shape, close to the main vein
469Pbe	Mine	41	"V" shaped between secondary veins
470Pbe	Mine	90	Small, transverse to secondary veins
472Pbe	Mine	96	Small, rectilinear, between secondary veins
473Pbe	Mine	41	Small, between secondary veins
474Pbe	Mine	94	Small, serpentine, between secondary veins
475Pbe	Mine	90	Small, serpentine, between secondary veins

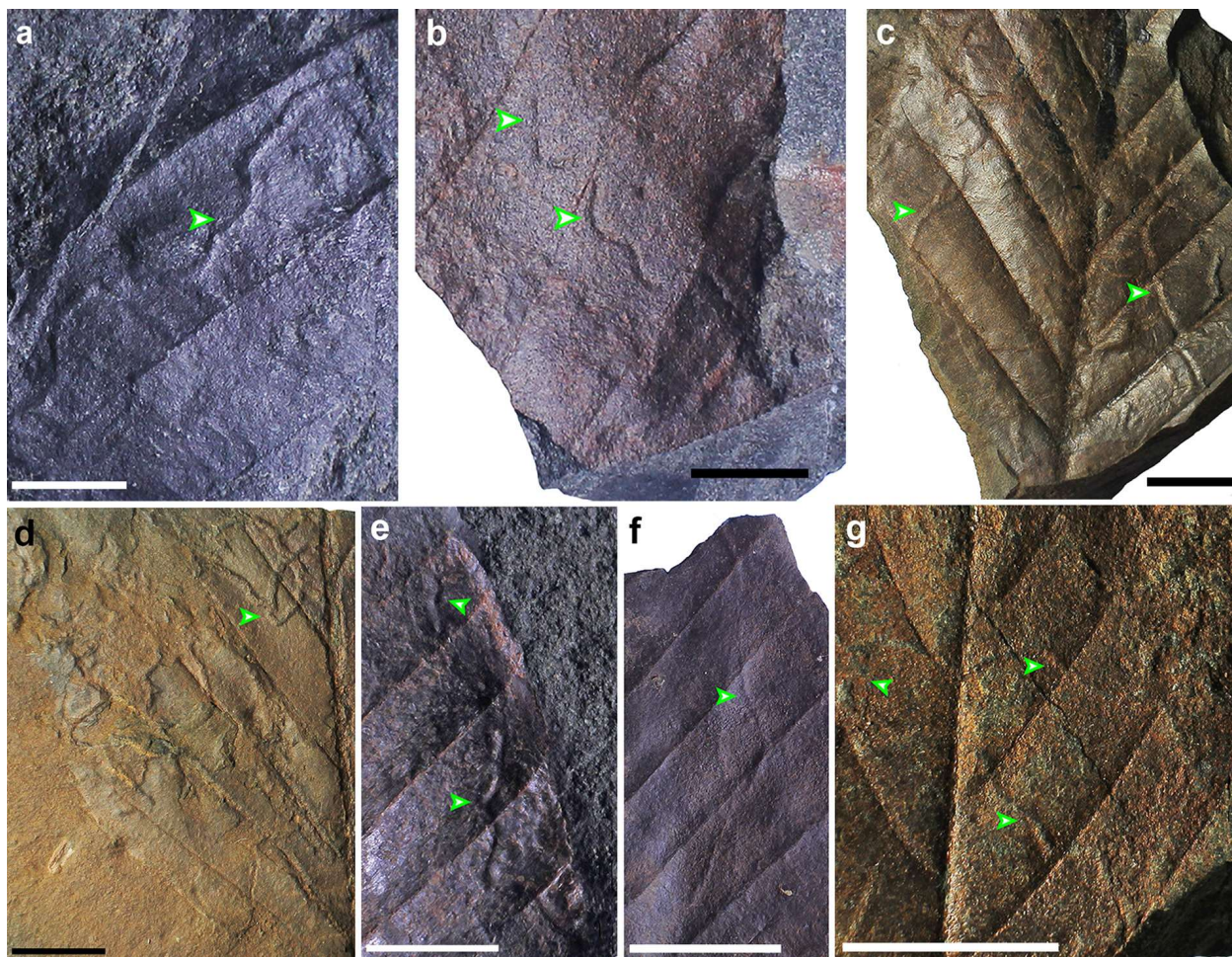


Figure 4. Leaf mines present in *Nothofagus* sp. from Nelson Island (Rip Point): a) Small serpentine mine between secondary veins in specimen 464Pbe (similar to DT 105) (scale: 5 mm); b) Slender serpentine shape crossing secondary veins in specimen 462Pbe (similar to DT 141) (scale: 10 mm); c) Specimen 470Pbe with mines distributed transversally to secondary veins on both sides of the leaf blade (similar to DT 90) (scale: 10 mm); d) Circular bifurcated mine between secondary veins in specimen 461Pbe (similar to DT 93) (scale: 10 mm); e) Serpentine mine, close to the leaf margin, crossing secondary veins and with one of the extremities curves in specimen 463Pbe (similar to DT 41) (scale: 10 mm); f) Straight mine, transversal to the secondary veins in specimen 465Pbe (similar to DT 90) (scale: 10 mm); g) Mine on the center of the leaf, crossing secondary and main vein in specimen 466Pbe (similar to DT 41) (scale: 5 mm).

In the specimen 463Pbe (59 x 36 mm), there is one small serpentine mine, crossing the secondary veins of the leaf and close to the leaf margin, measuring 30 mm of length (Figure 4e). In the specimen 465Pbe (38mm x 3 mm), there is an almost straight mine, crossing transversally three secondary veins from the leaf base towards its apex (not preserved), measuring 25 mm (Figure 4f). In the specimen 466Pbe (39 x 30

mm), two small mines transversal to the main vein are observable, crossing the leaf blade. The upper mine measures 19 mm and the lower one measures 17 mm, both cross the main and secondary veins (Figure 4g), which is uncommon in the remaining material studied here. The specimen 473Pbe (74 x 65 mm) is a fragment of a central leaf impression, with no preserved apex, margin, or base border, in which a serpentine

mine with 21 mm is observed distally, towards the leaf margin, between secondary veins (Figure 5a). In specimen 472Pbe (27 x 38 mm), there is a small straight mine, slightly curved (Figure 5b), measuring 17 mm, crossing two secondary veins. The specimen 475Pbe (70 x 60 mm) presents a serpentiform mine measuring 17 mm between two secondary veins, without crossing the main vein (Figure 5c).

The specimen 474Pbe (43 x 37 mm) presents four short serpentiform mines of varied sizes towards the center of the leaf blade, with sizes between 14 and 15 mm (Figure 5d). The specimen 467Pbe (60 x 44 mm) presents a straight mine with 22 mm, curving in its path, and crossing secondary veins (Figure 5e). The specimen 468Pbe (80 x 53 mm) is the best-preserved leaf impression. It shows some mines along the leaf blade, especially a larger and more visible serpentine one that is 35 mm long and crosses four secondary veins (Figure 4f). The specimen 469Pbe (100 x 80 mm) presents a short, slender "V"-shaped mine, measuring 20 mm, that crosses secondary and tertiary veins (Figure 5g).

DISCUSSION

Insect-plant associations are fundamental aspects in land ecosystems, being indispensable components in food chains and are very sensitive to environmental changes throughout time (Wilf et al. 2006, Donovan et al. 2014). Evidence of insect activity associated with fossilized plants in Antarctic continent are scarce. They correspond to perforations, tunnels, and coprolites found in permineralized peats from the Upper Permian period in the Buckley Formation of the transantarctic mountains, as well as coprolite structures from different deposits and perforation in fragments of roots and stems caused by oribatid mites (Kellogg & Taylor 2004). These records indicate that some

arthropod groups developed associations with Antarctic flora since the Paleozoic.

Slater (2014) identified other evidence of insect-plant interactions that include feeding of leaf margin, oviposition scars, and galls in *Glossopteris* sp. leaves from the Permian from the Prince Charles Mountains, East Antarctica. Additionally, there are reports of mines, galls, skeletonization, and leaf margin consumption in leaf impressions and compressions of Nothofagaceae and Cunoniaceae from Eocene deposits from the King George and Seymour islands (McDonald et al. 2007). There were no records of Cretaceous insect-plant interactions, particularly within the *Nothofagus* genus, until the present study.

The interactions identified on Nelson Island are represented primarily by leaf mines, with one specimen showing evidence of galls. Miner insects consist of an extremely specialized feeding behavior, resulting from larvae feeding action. Mines protect the insect from predation and dehydration through the construction of tunnels in the plant tissue (Möller et al. 2017). Eggs are deposited by adult insects in the leaf tissue where the larvae feed and develop inside the parenchyma of the plant, forming varied tracks (Hering 2013). Nowadays, miner insects belong to the Diptera, Coleoptera, and Hymenoptera orders (Liu et al. 2015). The leaf mines described here vary in shape and size and possess little variation in thickness. In comparison to the study by McDonald et al. (2007) developed in King George and Seymour islands, the mines found on Nelson Island are more frequent even with a much smaller sample size. There are also differences in the sizes and shapes and in the designation of DTs, which were not observed in other Antarctic localities. Up to now only one study described damage belonging to functional groups (McDonald et al. 2007), also present in the material analyzed here.

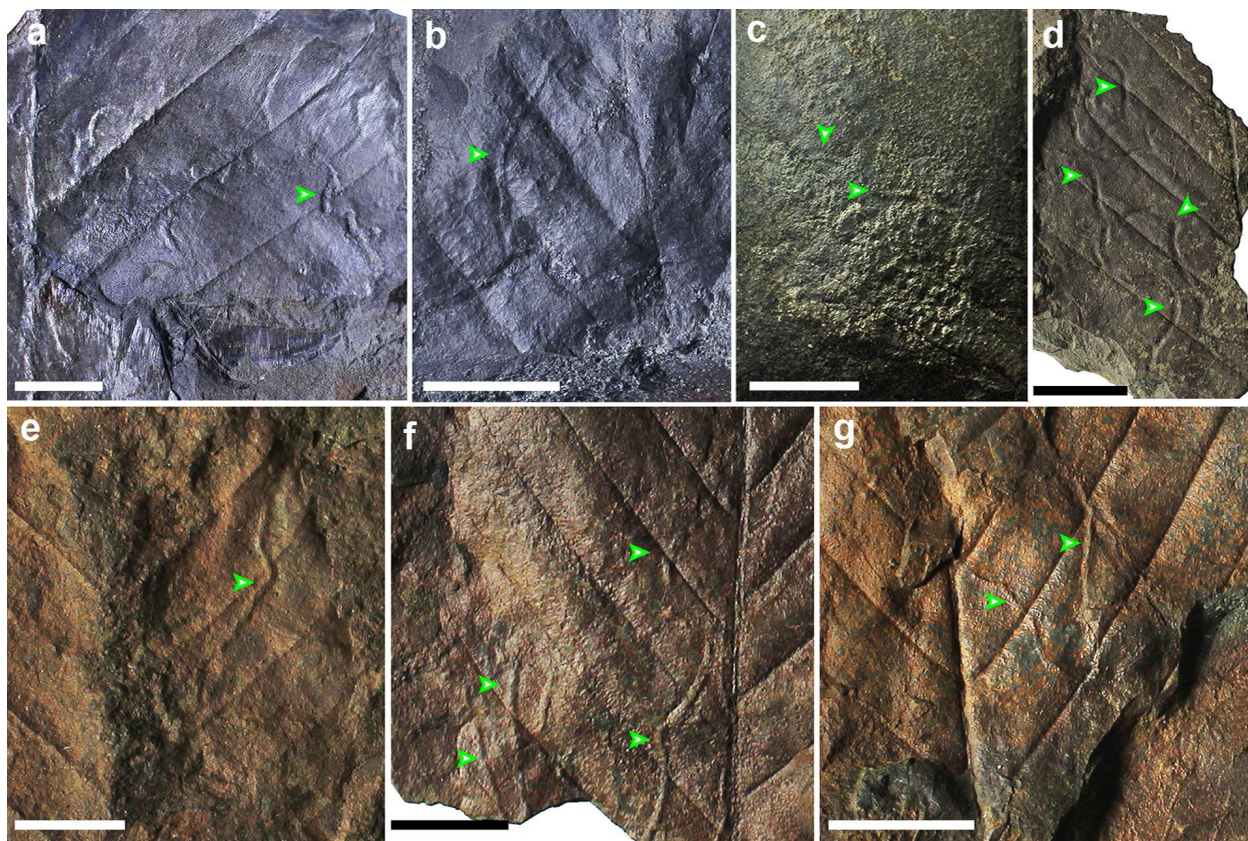


Figure 5. Leaf mines identified in fossil leaves: a) Small mine that crosses a secondary vein in specimen 473Pbe, similar to DT 41; b) Straight, small, crossing secondary veins in specimen 472Pbe, similar to DT 96; c) Small mine between secondary veins in specimen 475Pbe, “S”-shaped, similar to DT 90; d) In specimen 474Pbe, four small deeper mines, with serpentine shape, between secondary veins (similar to DT 94); e) Small, “L”-shaped mine, between secondary veins in specimen 467Pbe, similar to DT 105; f) In specimen 468Pbe, transversal to the secondary veins, one bigger, close to the main vein, and another a little smaller, close to the margin, similar to DT 105; g) Small “V”-shaped mine, crossing secondary veins, slender, similar to DT 41, in specimen 469Pbe. Scale bars: 10 mm.

Galls are formed as a result of a physiological reaction that induces abnormal growth in the host plant tissue, which provides protection and food resources for the developing larvae (Labandeira & Li 2021, Xiao et al. 2022). They represent a type of interaction with high specificity, enabling its identification due to distinct color or shapes (McDonald et al. 2007). The galls described here are small circular structures located in the interveinal spaces of *Nothofagus* sp. leaf, close to a leaf mine. These gall marks are present in specimen 460Pbe, and show the same general morphological features as the galls described

by McDonald (2009: Figure 3.15 a, c, d), Reichgelt (2015: Figure 5b), and Donovan et al. (2018, Figure 3).

The Upper Cretaceous associations on Nelson Island may indicate a relatively lower diversity of herbivore insects in the paleocommunity preserved in Nelson Island, restricted to mines and galls. In plant-insect associations found in the Eocene of King George and Seymour Islands, DTs consist of feeding on leaf margins, galls, mines, and skeletonization (e.g., McDonald et al. 2007). The associations analyzed here suggest a relatively low diversity

of herbivorous insects in the paleocommunity of Nelson Island. It can be demonstrated by the low number of DTs, which is also observed in the Eocene of King George and Seymour Islands (McDonald et al. 2007). This contrasts with other localities worldwide, such as the Miocene of New Zealand, where *Nothofagus* sp. fossils exhibit a remarkable variety of damage types (Möller et al. 2017). Additionally, Miocene *Nothofagus* sp. from New Zealand also shows higher herbivory rates (Möller et al. 2017), in comparison to the Cretaceous (this study) and Eocene paleocommunities of Antarctica (McDonald et al. 2007). A comparison between the two Antarctica sites with records of interaction between arthropods and *Nothofagus* sp. show that fossils from the Eocene of King George Island exhibit a higher number of DTs, including feeding in the leaf margin, galls, mine and skeletonization. The fossil record from the Cretaceous of Nelson Island is restricted to mines and galls, suggesting low herbivory diversity in Antarctica leaves during the Upper Cretaceous, or even between the Cretaceous and Eocene. However, the limited number of studies on insect-plant interactions could have contributed to the low diversity observed. Differences in the number of leaves damaged by insects may be explained by environmental disruptions, ecological changes, or even by fossil preservation (Möller et al. 2017). Taphonomic and depositional factors could also account for the scarcity of leaves with preserved damages on Nelson Island, and perhaps also in King George and Seymour islands.

According to McQuilan (1993), *Nothofagus* sp. can host up to 30 herbivorous species and, throughout evolutive time, corresponding to several species of invertebrate herbivores (Russel et al. 2000). The study of phytophagous (groups of insects that develop interactions with plants) associated with *Nothofagus* sp. are scarce, both in fossils and extant species.

According to Carrillo & Cerda (1987), the number of phytophagous insect species in the current species of *Nothofagus* sp. in Chile could reach 125, corresponding to Coleoptera, Hemiptera and Lepidoptera, including defoliators, wood, seeds, and sap eaters. However, Diptera are also among the main phytophagous insect groups related to *Nothofagus antarctica* (Oerst 1871). In addition, considering the time interval considered by the authors, the abundance of all these taxonomic groups does not change significantly across different collection periods (Vergara & Jeres 2010).

The main invertebrates associated with perennial Nothofagaceas in New Zealand include Coleoptera, Lepidoptera, Diptera, Phasmatodea, and Acari, with the majority found among the Lepidoptera. Most Nothofagaceae species host at least 4 species of defoliator herbivores, as reported by Reichgelt et al. (2015). According to the authors, current perennial Nothofagaceae are efficient producers of food defensive chemicals, turning their leaves hard to consume. However, in deciduous species, the production of defensive chemicals to inhibit the action of herbivores is less efficient. The latter also presents less leaf mass per unit area (Reichgelt et al. 2016).

External leaf feeding marks, skeletonization, and galls were identified, with an absence of other functional groups. According to Reichgelt et al. (2016), the main clade of mining insects is the Coleoptera, which, along with Lepidoptera and Diptera, could be possible agents of leaf damage. Attributing mines to a specific insect taxon is subject to many limitations, especially in the Antarctic fossil record, which rarely preserves animal body fossils. This lack of knowledge about the Cretaceous entomofauna makes a taxonomic attribution of the insects responsible for the structures observed here very difficult. The few numbers of fossilized leaves with miner

may indicate a low diversity of herbivore insects. According to Carvalho et al. (2014), the amount of damage can indicate the presence of herbivore insects even when their fossils are absent. Donovan et al. (2018) verified a decrease in the biodiversity of insect-plant associations from the Cretaceous to the Paleocene. For Antarctica, an increase in the diversity of damage types can be observed from the Cretaceous to the Eocene. Insect fossils in Antarctica are documented from the Permian to the Miocene, but records are rare. Zeuner (1959) reported the presence of an isolated elytra with no further taxonomic identification in Hope Bay (Jurassic). Carpenter (1969) described homopteran wings preserved with plant fragments from the Permian of the Theron Mountains (Plumstead 1962) and an Odonata from the Jurassic of South Victoria Land, as well as a nymph from the Permian in the Mount Glossopteris Formation. An almost complete body fossil of Blattodea, as well as preserved elytra and traits, were reported by Bomfleur et al. (2011).

Despite the low number of insect fossils in Antarctica, these records indicate the presence of phytophagous insects, justifying the occurrence of these types of damage on the leaves.

Climatic factors could have exerted strong limitations to the existence of herbivores, and taphonomic/depositional factors could have been relevant in the expressivity of these records, both of arthropod fossils and evidence of insect-plant interactions. According to Kemp et al. (2014) and Tobin et al. (2012), even with signs of low temperatures, there were periods of warm temperate climate in Antarctica. Through studies with palynomorphs from Seymour Island, Bowman et al. (2013) suggested the increase in temperature before the end of the Cretaceous and the beginning of the Paleogene, what might have been a global event (Wilf et al. 2006). These indicators of higher temperatures could have

contributed to the establishment ecosystems in which plants and associated insects coexisted and left traces of their preserved interactions.

CONCLUSION

Fossil specimens can be altered due to different reasons, that include (but are not limited to) to the processes involved in their preservation. The material from Nelson Island studied here shows the same kind of preservation reported on other leaves from Antarctica (e.g., McDonald et al. 2007), that differ from some exceptional preservation known from a few other deposits (e.g., Xiao et al. 2022). Nonetheless, based on the comparisons with specimens from other regions and based on the identification procedures commonly used to identify insect-plant interactions (e.g., Labandeira et al. 2007), we can confidently rule out that these structures represent taphonomic artifacts.

The present study represents the oldest record of insect-plant interaction of West Antarctica, documented from Cretaceous deposits of Nelson Island. The insect activity in assemblages dominated by *Nothofagus* sp. demonstrates that, besides being a significant component of Cretaceous ecosystems, this angiosperm genus was also an important host for herbivore insects. *Nothofagus* has already been extensively studied from a systematic and paleoenvironmental point of view, but so far did provide limited paleoecological information concerning insect interactions.

Comparisons between the number of analyzed leaves and the quantities of damages suggest a low diversity of herbivores. If other factors such as taphonomy and environmental changes (e.g., temperature change) can be accounted for this low diversity cannot be established at this point. The material analyzed here reveals insights and contribute to the

understanding of the insect-plant interactions happened in Cretaceous paleocommunities present in this important austral continent.

Acknowledgments

We thank the Marinha do Brasil for providing logistical support during the fieldwork conducted as part of the OPERANTAR activities when these and other fossils were collected by the PALEOANTAR team. Thatiany Batista (Universidade Regional do Cariri, Crato) is thanked for helping with the pictures that illustrate the present article, and Renan Bantim (Universidade Regional do Cariri, Crato) for assisting with the figures and comments in the initial version of the ms. We thank two anonymous reviewers for their comments that greatly improved this ms. The results of this study are the sole responsibility of the authors. This study was funded by the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq #313461/2018-0, #406779/2021-0 and CNPq/PROANTAR 442677/2018-9 to AWAK, #314222/2020-0 to JMS, #406902/2022-4 INCT PALEOVERT to GRO, FJL, JMS and AWAK) and Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES/PROANTAR 88887.336584/2019-00 to EBSF and ASB).

REFERENCES

- ANDERSON LI & TREWIN NH. 2003. An Early Devonian arthropod fauna from the Windyfield cherts, Aberdeenshire, Scotland. *Palaeontology* 46: 467-509.
- BASTOS BL, DUTRA TL, WILBERGER P & TREVISAN C. 2012. Uma flora do final do Cretáceo na Ilha Nelson, Ilhas Shetland do Sul, Península Antártica. *Rev Bras de Paleontolog* 16(3): 441-464.
- BIRKENMAJER K & ZASTAWNIAK E. 1989. Late Cretaceous-Early Tertiary flora of King George Island, West Antarctic: Their stratigraphic distribution and paleoclimatic significance. In: Crame JA (Ed) *Origins and Evolution of the Antarctic biota*. Geol Soc, 227-240 p. (special publication 47).
- BOMFLEUR B, SCHNEIDER JW, SCHÖNER R, VIERECK-GÖTTE L & KERP H. 2011. Fossil sites in the continental Victoria and Ferrar groups (Triassic-Jurassic) of north Victoria Land, Antarctica. *Polar Res* 80(2): 88-99.
- BOWMAN VC, FRANCIS JE & RIDING JB. 2013. Late Cretaceous winter sea ice in Antarctica? *Geology* 41(12): 1227-1230.
- BRUM AS, ELUTÉRIO LHS, SIMÕES TR, WHITNEY MR, SOUZA GA, SAYÃO JM & KELLNER AWA. 2023. Ankylosaurian body armor function and evolution with insights from osteohistology and morphometrics of new specimens from the Late Cretaceous of Antarctica. *Paleobiology* 1-22.
- BRUM AS, SIMÕES TR, SOUZA GA, PINHEIRO AE, FIGUEIREDO RG, CALDWELL MW, SAYÃO JM & KELLNER AWA. 2022. Ontogeny and evolution of the elasmosaurid neck highlight greater diversity of Antarctic plesiosaurs. *Palaeontology* 65(2): e12593.
- CANTRILL DJ & POOLE I. 2012. *The Vegetation of Antarctica Through Geological Time*. Camb Univ Press, New York, 480 p.
- CARPENTER FM. 1969. Fossil insects from Antarctica. *Psyche* 76(4): 418-425.
- CRANE PR & JARZEMBOWSKI EA. 1980. Insect leaf mines from the Palaeocene of southern England. *J of Nat His* 14(5): 629-636.
- CARRILLO LL & CERDA RL. 1987. Zoofitófagos en *Nothofagus* chilenos. *Bosque* 8(2): 99-103.
- CARVALHO MR, WILF P, BARRIOS H, WINDSOR DM, CURRANO ED, LABANDEIRA CC & JARAMILLO CA. 2014. Insect leaf-chewing damage tracks herbivore richness in modern and ancient forests. *PLoS ONE* 9(5): e94950.
- DING Q, LABANDEIRA CC, MENG Q & REN D. 2015. Insect herbivory, plant-host specialization and tissue partitioning on mid-Mesozoic broadleaved conifers of Northeastern China. *Palaeogeogr, Palaeoclimatol, Palaeoecol* 440: 259-273.
- DONOVAN MP, IGLESIAS A, WILF P, LABANDEIRA CC & CÚNEO NR. 2018. Diverse plant-insect associations from the latest Cretaceous and early Paleocene of Patagonia, Argentina. *Ameghiniana* 55(3): 303-338.
- DONOVAN MP, WILF P, LABANDEIRA CC, JOHNSON KR & PEPPE DJ. 2014. Novel insect leaf-mining after the end-Cretaceous extinction and the demise of Cretaceous leaf miners, Great Plains, USA. *PLoS ONE* 9(7): e103542.
- DUTRA TL. 1997. *Composição e história da vegetação do Cretáceo e Terciário da ilha Rei George, Península Antártica*. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul Tese de Doutorado.
- DUTRA TL & BATTEN DJ. 2000. Upper Cretaceous floras of King George Island, West Antarctica, and their palaeoenvironmental and phytogeographic implications. *Cretac Res* 21(2-3): 181-209.
- FIGUEIREDO RG ET AL. 2020. Explorando as florestas perdidas da Antártica. *Informativo APECS-Brasil* 11: 29-30.
- FILHO EBS, ADAMI-RODRIGUES K, LIMA FJD, BANTIM RAM, WAPPLER T & SARAIVA AAF. 2017. Evidence of plant-insect interaction in the Early Cretaceous flora from the Crato

Formation, Araripe Basin, Northeast Brazil. *Hist Biol* 31(7): 926-937.

GANDOLFO MA & ZAMALOA MC. 2021. Southern high-latitude plant-insect interactions from the Miocene of Tierra del Fuego, Argentina. *Int J Plant Sci* 182(6): 523-532.

HAYES PA, FRANCIS JE, CANTRILL DJ & CRAME JA. 2006. Palaeoclimate analysis of Late Cretaceous angiosperm leaf floras, James Ross Island, Antarctica. *Geol Soci, London, Special Publications* 258(1): 49-62.

HERING EM. 2013. Biology of the leaf miners. *Spr Sci Busi Med*, 3 p.

HILL RS. 2001. Biogeography, evolution and palaeoecology of *Nothofagus* (Nothofagaceae): the contribution of the fossil record. *Aust J Bot* 49(3): 321-332.

HILL RS & JORDAN GJ. 1993. The evolutionary history of *Nothofagus* (Nothofagaceae). *Aust Syst Bot* 6(2): 111-126.

HUNT RH & POOLE LEI. 2003. Revising Palaeogene West Antarctic climate and vegetation history in light of new data from King George Island. In: Wing SL, Gingerich ED, Schmitz B & Thomas E (Eds) *Causes and Consequences of Globally Warm Climates in the Early Paleogene*. *Geol Soc Am, Spe Pap* 369: 395-412.

IMADA Y, OYAMA N, SHINODA K, TAKAHASHI H & YUKAWA H. 2022. Oldest leaf mine trace fossil from East Asia provides insight into ancient nutritional flow in a plant-herbivore interaction. *Sci Rep* 12(1): 5254.

KELLNER AWA. 2020. Ilha Nelson: paraíso das plantas fósseis da Antártica. *Ciênc Hoje On-Line* 368, Rio de Janeiro, RJ, Brasil (<http://cienciahoje.org.br/artigo/ilha-nelson-paraíso-das-plantas-fósseis-da-antártica/>).

KELLNER AWA. 2022. Research in Antarctica - challenging but necessary. *An Acad Bras Cienc* 94: e202294S1. DOI 10.1590/0001-3765202202294S1.

KELLNER AWA, DUTRA TL, CARVALHO, MA, RAMOS RRC, GRILLO ON, SILVA HP, RIFF D & ROMANO PSR. 2007. First record of fossils leaves from the Keller Peninsula, King George Island, Antarctica. *Carvalho Paleontologia: Cenários de Vida*. Editora Interciência 627-635.

KELLOGG DW & TAYLOR EL. 2004. Evidence of oribatid mite detritivory in Antarctica during the late Paleozoic and Mesozoic. *J Paleontol* 78(6): 1146-1153.

KEMP DB, ROBINSON SA, CRAME JA, FRANCIS JE, INESON J, WHITTLE RJ & O'BRIEN C. 2014. A cool temperate climate on the Antarctic Peninsula through the latest Cretaceous to early Paleogene. *Geology* 42(7): 583-586.

KRASSILOV V, SILANTIEVA N, HELLMUND M & HELLMUND W. 2007. Insect egg sets on angiosperm leaves from the Lower Cretaceous of Negev, Israel. *Cretac Res* 28(5): 803-811.

LABANDEIRA CC. 2002. The history of associations between plants and animals. *Plant-animal interactions: an evolutionary approach* 248: 261.

LABANDEIRA CC. 2006 The four phases of plant-arthropod associations in deep time. *Geol Acta* 4(4): 409-438.

LABANDEIRA CC. 2013. A paleobiologic perspective on plant-insect interactions. *Curr Opin Plant Biol* 16(4): 414-421.

LABANDEIRA CC & ALLEN EG. 2007. Minimal insect herbivory for the Lower Permian Coprolite Bone Bed site of north-central Texas, USA, and comparison to other Late Paleozoic floras. *Palaeogeogr, Palaeoclimatol, Palaeoecol* 247(3-4): 197-219.

LABANDEIRA CC & CURRANO ED. 2013. The fossil record of plant-insect dynamics. *Annu Rev Earth Planet Sci* 41: 287-311.

LABANDEIRA CC, DILCHER DL, DAVIS DR & WAGNER DL. 1994. Ninety-seven million years of angiosperm-insect association: paleobiological insights into the meaning of coevolution. *PNAS* 91(25): 12278-12282.

LABANDEIRA CC & LI L. 2021. The history of insect parasitism and the Mid-Mesozoic Parasitoid Revolution. In *The Evolution and Fossil Record of Parasitism: Identification and Macroevolution of Parasites* (p. 377-533). Cham: Springer International Publishing.

LABANDEIRA CC & PHILLIPS TL. 1996. Insect fluid-feeding on Upper Pennsylvanian tree ferns (Palaeodictyoptera, Marattiales) and the early history of the piercing-and-sucking functional feeding group. *Ann Entomol Soc Am* 89(2): 157-183.

LABANDEIRA CC, WILF P, JOHNSON KR & MARSH F. 2007. Guide to insect (and other) damage types on compressed plant fossils. Smithsonian Institution, National Museum of Natural History, Department of Paleobiology, Washington, DC, 85p.

LEPPE M, MIHOC M, VARELA N, STINNESBECK W, MANSILLA H, BIERMA H, CISTERNA K, FREY E & JUJHARA T. 2012. Evolution of the Austral-Antarctic flora during the Cretaceous: New insights from a paleobiogeographic perspective. *Rev Chil Hist Nat* 85(4): 369-392. DOI 10.4067/S0716-078X2012000400002.

LIMA FJ ET AL. 2021. Wildfires in the Campanian of James Ross Island: a new macro-charcoal record for the Antarctic Peninsula. *Polar Res*, 40.

- LIU WD, DAI XH & XU JS. 2015. Influences of leaf-mining insects on their host plants: A review. *Collect Bot* 42: e005.
- MACCRACKEN SA, MILLER IM, JOHNSON KR, SERTICH JM & LABANDEIRA C. 2022. Insect herbivory on *Catula getty* gen. et sp. nov. (Lauraceae) from the Kaiparowits Formation (Late Cretaceous, Utah, USA). *PLoS ONE* 17(1): e0261397.
- MANFROI J, DUTRA TL, GNAEDINGER S, UHL D & JASPER A. 2015. The first report of a Campanian palaeo-wildfire in the West Antarctic Peninsula. *Palaeogeogr, Palaeoclimatol, Palaeoecol* 418: 12-18.
- MCDONALD CM. 2009. Herbivory in Antarctic fossil forests and comparisons with modern analogues in Chile (Doctoral dissertation, University of Leeds).
- MCDONALD CM, FRANCIS JE, COMPTON SGA, HAYWOOD A, ASHWORTH AC, HINOJOSA LF & SMELLIE J. 2007. Herbivory in Antarctic fossil forests: evolutionary and palaeoclimatic significance. Online Proceedings of the 10th ISAES X, A.K. Cooper and C.R. Raymond et al., USGS Open-File Report 2007-1047, Extended Abstract 059, 4 p.
- MCGLONE MS, MILDENHALL DC & POLE MS. 1996. History and paleoecology of New Zealand *Nothofagus*. The ecology and biogeography of *Nothofagus* forests, 25-82 p.
- MCQUILLAN PB. 1993. *Nothofagus* (Fagaceae) and its invertebrate fauna: an overview and preliminary synthesis. *Biol J Linn Soc* 49(4): 317-354.
- MÖLLER AL, KAULFUSS U, LEE DE & WAPPLER T. 2017. High richness of insect herbivory from the early Miocene Hindon Maar crater, Otago, New Zealand. *Peer J* 5: e2985.
- PIOVESAN EK, CORREIA FILHO OJ, MELO RM, LACERDA LD, DOS SANTOS RO, PINHEIRO AP, COSTA FR, SAYÃO JM & KELLNER AWA. 2021. The Campanian-Maastrichtian interval at The Naze, James Ross Island, Antarctica: microbiostratigraphic and paleoenvironmental study. *Cretac Res* 120: 104725.
- PLUMSTEAD EP. 1962. Fossil floras o Antarctica. *Trans-Antarctic Exped., 1955-1958. Sci Rep* 9:66, vol 2.
- REICHGELT T, JONES WA, JONES DT, CONRAN JG & LEE DE. 2016. Diverse and abundant insect herbivory on Miocene *Nothofagaceae* of the Dunedin Volcano, Otago, New Zealand. *Palaeobiodivers Palaeoenvir* 96: 265-279.
- REICHGELT T, KENNEDY EM, CONRAN JG, MILDENHALL DC & LEE DE. 2015. The early Miocene paleolake Manuherikia: vegetation heterogeneity and warm-temperate to subtropical climate in southern New Zealand. *Journal of Paleolimnol* 53: 349-365.
- RUSSELL GB, BOWERS WS, KEESING V, NIEMEYER HM, SEVENET T, VASANTHAVERNI S & WRATTEN SD. 2000. Patterns of bioactivity and herbivory on *Nothofagus* species from Chile and New Zealand. *J Chem Ecol* 26: 41-56.
- SAMPAIO DP. 2022. Diplomatic culture and institutional design: Analyzing sixty years of Antarctic Treaty governance. *An Acad Bras Cienc* 94: e20210539. DOI 10.1590/0001-3765202220210539.
- SANTOS A ET AL. 2022. Paleoenvironment of the Cerro Negro Formation (Aptian, Early Cretaceous) of Snow Island, Antarctic Peninsula. *An Acad Bras Cienc* 94: e20201944.
- SANTOS LEF. 2021. Constitutionality analysis of amendments to the Protocol on Environmental Protection on the Antarctic Treaty Annexes. *An Acad Bras Cienc* 94: e20210385. DOI 10.1590/0001-3765202120210385.
- SCHWANCK F, SIMÕES JC, HANDLEY M, MAYEWSKI PA & BERNARDO R. 2022. Anthropogenic trace elements (Bi, Cd, Cr, Pb) concentrations in a West Antarctic ice core. *An Acad Bras Cienc* 94: e20210351. DOI 10.1590/0001-3765202220210351.
- SCOTT AC & TAYLOR TN. 1983. Plant/animal interactions during the Upper Carboniferous. *Bot Rev* 49: 259-307.
- SHEN Y. 1994. Subdivision and correlation of Cretaceous to Paleogene volcano-sedimentary sequence from Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica. Stratigraphy and palaeontology of Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica. State Antarctic Committee, Science Press, Monograph 3: 1-36.
- SIMÕES JC, CARTES ML & SAYÃO JM. 2022. Forty years of Brazilian Antarctic research: A tribute to Professor Antonio Carlos Rocha-Campos. *An Acad Bras Cienc* 94: e20220493. DOI 10.1590/0001-3765202220220493.
- SLATER BJ. 2014. Fossil Focus: Arthropod-plant interactions. *Palaeontology Online* 4: 1-17.
- SLATER BJ, MCLOUGHLIN S & HILTON J. 2012. Animal-plant interactions in a middle Permian permineralised peat of the Bainmedart Coal Measures, Prince Charles Mountains, Antarctica. *Palaeogeogr, Palaeoclimatol, Palaeoecol* 363: 09-126.
- STEPHENSON J & SCOTT AC. 1992. The geological history of insect-related plant damage. *Terra Nova* 4(5): 542-552.
- SWENSON U, HILL RS & MCLOUGHLIN S. 2001. Biogeography of *Nothofagus* supports the sequence of Gondwana break-up. *Taxon* 50(4): 1025-1041.
- TOBIN TS, WARD PD, STEIG EJ, OLIVERO EB, HILBURN IA, MITCHELL RN & KIRSCHVINK JL. 2012. Extinction patterns, and magnetostratigraphy from a southern high-latitude Cretaceous-Paleogene section: Links with Deccan volcanism. *Palaeogeograp, Palaeoclimatol, Palaeoecol* 350: 180-188.

TOSOLINI AMP, CANTRILL DJ & FRANCIS JE. 2021. Paleocene high-latitude leaf flora of Antarctica Part 1: entire-margined angiosperms. *Review Palaeobot Palynol* 285: 104317.

TOSOLINI AMP, CANTRILL DJ, KORASIDIS VA & FRANCIS JE. 2023. Palaeocene high-latitude leaf flora of Antarctica Part 2: Tooth-margined angiosperms. *Rev Palaeobot Palynol* 314: 104895.

TREVISAN C. 2011. Fósseis de pteridófitas das ilhas King George e Nelson: afinidade taxonômica e importância no contexto deposicional e do clima nas áreas setentrionais da Península Antártica. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Dissertação de Mestrado, 44 p. (Unpublished).

TREVISAN C, DUTRA T, IANUZZI R, SANDER A, WILBERGER T, MANRÍQUEZ LME & LEPPE M. 2022. *Coniopteris antarctica* sp. nov. (Pteridophyta) and associated plant assemblage from the Upper Cretaceous of Rip Point, Nelson Island, Antarctica. *Cret Res* 136: 105185.

VAN AMEROM HWJ. 1966. *Phagophytichnus ekowskii* nov. ichnogen. & nov. ichnosp., eine Missbildung infolge von Insektenfrass, aus dem Spanischen Stephanien (Provinz Leon). *Leidse Geologische Mededelingen* 38(1): 181-184.

VAN AMEROM HWJ & BOERSMA M. 1971. A new find of the ichnofossil *Phagophytichnus ekowskii* van Amerom. *Geologie en Mijnbouw* 50(5): 667-670.

VAN AMEROM HWJ & JOSTEN KH. 1973. Gibt es Cecidien im Karbon bei Calamiten und Asterophylliten. In *Compte Rendu Septieme Congres International de Stratigraphie e de Géologie du Carbonifere*. Van Acken, Krefeld, Germany, 63-83 p.

VENTO B, AGRAIN F & PUEBLA G. 2022. Ancient Antarctica: the early evolutionary history of *Nothofagus*. *Hist Biol* 1-11.

VERGARA O & JEREZ V. 2010. Insectos e infestaciones asociadas al follaje de *Nothofagus* Antarctica (Forst) Oerst (Nothofagaceae) en la cuenca del río Baker, Región de Aysén, Chile. *Gayana (Concepción)* 74(2): 83-93.

WILF P, JOHNSON KR, CUNEO NR, SMITH ME, SINGER BS & GANDOLFO MA. 2005. Eocene plant diversity at Laguna del Hunco and Río Pichileufú, Patagonia, Argentina. *Ame Natur* 165(6): 634-650.

WILF P, LABANDEIRA CC, JOHNSON KR & ELLIS B. 2006. Decoupled plant and insect diversity after the end-Cretaceous extinction. *Science* 313(5790): 1112-1115.

XIAO L, LABANDEIRA CC & REN D. 2022. Insect herbivory immediately before the eclipse of the gymnosperms: The Dawangzhangzi plant assemblage of Northeastern China. *Insect Science* 29(5): 1483-1520.

ZEUNER FE. 1959. Jurassic Beetles from Grahamland, Antarctica. *Palaeontology* 1(4): 407-409.

How to cite

SANTOS FILHO EB ET AL. 2023. First record of insect-plant interaction in Late Cretaceous fossils from Nelson Island (South Shetland Islands Archipelago), Antarctica. *An Acad Bras Cienc* 95: e20231268. DOI 10.1590/0001-3765202320231268.

*Manuscript received on November 17, 2023;
accepted for publication on November 20, 2023*

EDILSON B. DOS SANTOS FILHO¹

<https://orcid.org/0000-0002-9778-7262>

ARTHUR S. BRUM^{2,3}

<https://orcid.org/0000-0003-3927-0318>

GEOVANE A. DE SOUZA^{2,3}

<https://orcid.org/0000-0003-0979-1526>

RODRIGO G. FIGUEIREDO⁴

<https://orcid.org/0000-0002-4304-6434>

CRISTIAN D. USMA⁵

<https://orcid.org/0000-0001-6848-445X>

JOÃO HENRIQUE Z. RICETTI^{6,7}

<https://orcid.org/0000-0003-3142-3869>

CRISTINE TREVISAN⁸

<https://orcid.org/0000-0001-5550-2380>

MARCELO LEPPE⁸

<https://orcid.org/0000-0002-1545-8167>

JULIANA M. SAYÃO³

<https://orcid.org/0000-0002-3619-0323>

FLAVIANA J. LIMA⁹

<https://orcid.org/0000-0001-8602-6508>

GUSTAVO R. OLIVEIRA¹⁰

<https://orcid.org/0000-0002-9871-1235>

ALEXANDER W.A. KELLNER^{3,11}

<https://orcid.org/0000-0001-7174-9447>

¹Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, 50670-901 Recife, PE, Brazil

²Programa de Pós-Graduação em Zoologia, Museu Nacional/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Quinta da Boa Vista, s/n, São Cristóvão, 20940-040 Rio de Janeiro, RJ, Brazil

³Museu Nacional/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Geologia e Paleontologia, Laboratório de Paleobiologia e Paleogeografia Antártica, Quinta da Boa Vista, São Cristóvão, 20940-040 Rio de Janeiro, RJ, Brazil

⁴Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde, Departamento de Biologia, Alto Universitário, s/n, Guararema, 29500-000 Alegre, ES, Brazil

⁵Universidade Federal de Pernambuco, Núcleo de Estudos Geoquímicos, Laboratório de Isótopos Estáveis, NEG-LABISE/CTG, Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, 50740-530 Recife, PE, Brazil

⁶Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Av. Bento Gonçalves, 9500, 91509-900 Porto Alegre, RS, Brazil

⁷Universidade do Contestado, Centro de Pesquisas Paleontológicas, Av. Pres. Nereu Ramos, 1071, 89304-076 Mafra, SC, Brazil

⁸Antarctic and Patagonia Paleobiology Laboratory, Chilean Antarctic Institute-INACH, Lautaro Navarro 1245, Punta Arenas, Chile

⁹Universidade Federal de Pernambuco, Laboratório de Plantas do Gondwana, Centro Acadêmico de Vitória, Rua do Alto Reservatório, s/n, Bela Vista, 55608-680 Vitória de Santo Antão, PE, Brazil

¹⁰Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Biologia, Laboratório de Paleontologia e Sistemática, Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, 52171-900 Recife, PE, Brazil

¹¹Museu Nacional/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Geologia e Paleontologia, Laboratório de Sistemática e Tafonomia de Vertebrados Fósseis, Quinta da Boa Vista, s/n, São Cristóvão, Rio de Janeiro, RJ, Brazil

Correspondence to: **Edilson Bezerra Dos Santos Filho**
E-mail: edilson.bsf@gmail.com

Author contributions

EBSF, GRO and FJL conceived and designed the study. ASB, GAS, RGF and CDU performed fieldwork in the Antarctic Peninsula collecting several fossil plants used in the study. ASB, GAS, RGF, CDU, JHZR, CT, ML, JMS, FJL, GRO and AWAK contributed to the writing and revision. EBSF and ASB performed image editing. All authors reviewed and contributed to the manuscript.

