

GEOVANE AUGUSTO GAIA VIEIRA

**Fitofósseis como marcadores de paleoambientes (ênfase em
paleoclima) do Devoniano da Bacia do Paraná (Brasil).**

BAURU

2021

Geovane Augusto Gaia Vieira

**Fitofósseis como marcadores de paleoambientes (ênfase em
paleoclima) do Devoniano da Bacia do Paraná (Brasil).**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Letras, Assis, para a obtenção do título de Mestre em Biociências (Área de Conhecimento: Caracterização e Aplicação da Diversidade Biológica).

Orientador(a): Marta Pereira Llopart

Co-Orientador(a): Renato Pirani Ghilardi

Bolsista: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Processo 88882.432721/2019-01.

BAURU

2021

V658f Vieira, Geovane Augusto Gaia
Fitofósseis como marcadores de paleoambientes (ênfase em
paleoclima) do Devoniano da Bacia do Paraná (Brasil). /
Geovane Augusto Gaia Vieira. -- Bauru, 2021
81 p. : il., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Faculdade de Ciências, Bauru
Orientadora: Marta Pereira Llopart
Coorientador: Renato Pirani Ghilardi

1. EDS. 2. FTIR. 3. Spongiophyton nanum. 4. Haplostigma.
5. Palaeostigma. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Ciências, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE GEOVANE AUGUSTO GAIA VIEIRA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOCIÊNCIAS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E LETRAS - CÂMPUS DE ASSIS.

Aos 11 dias do mês de junho do ano de 2021, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de GEOVANE AUGUSTO GAIA VIEIRA, intitulada **Fitofósseis como marcadores de paleoambientes (ênfase em paleoclima) do Devoniano da Bacia do Paraná (Brasil)**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Profa. Dra. MARTA PEREIRA LLOPART (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) UNESP/Bauru, Profa. Dra. PAULA ANDREA SUCERQUIA RENDON (Participação Virtual) do(a) UFPE/Recife, Profa. Dra. SILANE APARECIDA FERREIRA DA SILVA CAMINHA (Participação Virtual) do(a) UFMT/Cuiaba. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Profa. Dra. MARTA PEREIRA LLOPART

*Dedico este manuscrito aos meus avós.
“Ainda somos os mesmos e vivemos como os nossos pais”
(Elis Regina)*

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a minha família, principalmente aos meus pais, que sempre me apoiaram e me deram forças para exercer com determinação aquilo que sempre me propus a fazer.

Minha eterna gratidão à Tia Mana e ao Prof. Dr. Tio Antônio por terem me adotado e me auxiliado desde o início da minha trajetória acadêmica até o presente momento.

Agradeço a todos os meus colegas e ex-colegas do LAPALMA. Obrigado, Vibra, por me acolher quando ingressei ao laboratório e obrigado, Felps e Victin, pelos conselhos, ensinamentos e conversas fiadas que reduziram as tensões de cada dia. Acabamos formando um time, não é mesmo?

Agradeço imensamente ao professor Renato, por ter me aceito em seu laboratório, por ter me orientado desde minha iniciação científica e por sempre contribuir para a minha formação acadêmica.

Agradeço à professora Marta, por ter me orientado e dado todo o suporte necessário para a realização deste trabalho. E agradeço às professoras Paula e Silane pelas críticas e contribuições ao meu trabalho e por aceitarem compor a minha banca examinadora.

Agradeço aos Laboratórios Multi-usuários da Faculdade de Ciências, Unesp Bauru, que me permitiram realizar análises cruciais para a elaboração deste trabalho.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pela bolsa concedida. Que a ciência brasileira um dia seja valorizada para que esse apoio se expanda para a maioria dos alunos de pós-graduação.

Obrigado, Van! Pelas frustrações e alegrias compartilhadas à distância, pelas horas de conversa, pelas inúmeras ideias postas e não postas em prática. Obrigado por organizar meus dados e mostrar a serventia deles.

E com muito carinho agradeço à minha companheira, por todo apoio e ajuda direcionados a mim durante o desenvolvimento da minha pesquisa e da minha formação pessoal e acadêmica. Um dia espero retribuir. Obrigado, Yayá! Amo você!

Por fim, minha gratidão a Mônica e Milena (minhaix conterrâneaix de Caixiaix), pelas conversas diárias, repletas de conselhos, reflexões, desabafos, conteúdos acadêmicos e não acadêmicos. Obrigado por tornarem minha pós-graduação mais leve, etecetera e talz. E como diria Tales de Mileto em um dia ensolarado... Obrigado!

VIEIRA, Geovane Augusto Gaia. **Fitofósseis como marcadores de paleoambientes (ênfase em paleoclima) do Devoniano da Bacia do Paraná (Brasil)**. 2021. 81 p. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Biociências). – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências, Bauru, 2021.

RESUMO

Há diversas evidências de uma correlação existente entre fatores paleoclimáticos e a consequente transformação na distribuição, diversidade e morfologia de vegetais paleozoicos. Neste sentido, este trabalho buscou associar caracteres morfológicos de cutículas de plantas devonianas provenientes de duas localidades distintas da porção noroeste da Bacia do Paraná, com o regime climático ocorrido durante as idades em que viveram. Para isso, utilizou-se análises em estereomicroscópio, MEV/EDS e FTIR para explorar detalhes morfológicos e da composição química desses fósseis e, posteriormente, obter dados a respeito das variações paleoambientais e dos ambientes de sedimentação dos táxons estudados, relacionando-os com as condições climáticas e suas possíveis variações. As análises convencionais em estereomicroscópio revelaram dados sobre fragmentação, orientação e distribuição dos talos de *S. nanum*, assim como caracteres morfológicos e ornamentais de *S. nanum* e *Haplostigma* e a má preservação da amostra de *Palaeostigma*. Análises em EDS revelaram a presença de oxigênio e carbono como principais componentes da composição elementar de *S. nanum* e a presença de silício na cutícula e na matriz rochosa. Baseado na ocorrência de *Haplostigma* e de suas características morfológicas, como a filotaxia alterna-espiralada, um clima frio a subártico é atribuído para a porção noroeste da Bacia do Paraná durante o limite Givetiano-Eofrasniano. Ainda para esta porção da bacia, um regime climático temperado ocorria durante o Emsiano Final-Eifeliano, baseando-se na ocorrência de *S. nanum* e nos elementos de silício da matriz rochosa evidenciados em EDS. O elemento carbono está associado à preservação desses fitofósseis por incarbonização, porém, mais processos de fossilização podem estar envolvidos. Um período de turbulência acompanhado de um intervalo de complacência levou à fragmentação e deposição dos restos de *S. nanum*. Sendo assim, as características dessas plantas refletem o paleoclima e o paleoambiente de vida a que estão associadas. A partir disso, pesquisas futuras envolvendo análises em fluorescência de raios X (XRF), microfluorescência de micro raios (μ -XRF) e em difração de raios X poderão integrar os resultados aqui obtidos, fornecendo informações sobre a origem mineralógica do material fitofossilífero, a origem dos elementos que o compõem, os processos envolvidos na fossilização dos fragmentos de *S. nanum*, bem como o paleoambiente de vida desses organismos enigmáticos.

Palavras-chave: EDS. FTIR. *Spongiophyton nanum*. *Haplostigma*. *Palaeostigma*. Paleoambiente.

VIEIRA, Geovane Augusto Gaia. **Phytofossils as markers of paleoenvironments (emphasis on paleoclimate) of the Devonian of the Paraná Basin (Brazil)**. 2021. 81 p. Dissertation (Academic Masters in Biosciences). – São Paulo State University (UNESP), School of Sciences and Languages, Assis, 2021.

ABSTRACT

There is multiple evidence of a correlation between paleoclimatic factors and the consequent transformation in the distribution, diversity and morphology of paleozoic plants. In this sense, this work aimed to associate morphological characteristics of cuticles of Devonian plants from two different locations in the northwestern portion of the Paraná Basin, with the climatic regime that occurred during the ages in which they lived. For that, we used stereomicroscope, SEM/EDS and FTIR analysis to explore morphological details and the chemical composition of these fossils and, later, to obtain data about the paleoenvironmental variations and the sedimentation environments of the studied taxa, relating them with the climatic conditions and their possible variations. Conventional stereomicroscope analysis revealed data on fragmentation, orientation and distribution of *S. nanum* stems, as well as morphological and ornamental characteristics of *S. nanum* and *Haplostigma* and the poor preservation of the *Palaeostigma* sample. Analysis using EDS revealed the presence of oxygen and carbon as the main components of the elemental composition of *S. nanum* and the presence of silicon in the cuticle and in the rock matrix. Based on the occurrence of *Haplostigma* and its morphological characteristics such as alternating-spiral phyllotaxis, a cold to subarctic climate is attributed to the northwestern portion of the Paraná Basin during the Givetian-Eofrasnian limit. Also, for this portion of the basin, a temperate climate regime occurred during the Late Emsian-Eifelian, based on the occurrence of *S. nanum* and the silicon elements of the rock matrix shown by EDS. The carbon element is associated with the preservation of these phytofossils by incarbonization, however, more fossilization processes may be involved. A period of turbulence accompanied by an interval of complacency led to the fragmentation and deposition of the *S. nanum* remains. Thus, the characteristics of these plants reflect the paleoclimate and the paleoenvironment of life with which they are associated. From this, future research involving analysis in X-ray fluorescence (XRF), micro-ray microfluorescence (μ -XRF) and in X-ray diffraction may integrate the results obtained here, providing information on the mineralogical origin of the phytopossyliferous material, the origin of the elements that compose it, the processes involved in the fossilization of the *S. nanum* fragments, as well as the paleoenvironment of life of these enigmatic organisms.

Keywords: EDS. FTIR. *Spongiophyton nanum*. *Haplostigma*. *Palaeostigma*. Paleoenvironment.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1**.....pág. 13
Reconstrução paleogeográfica da Bacia do Paraná de acordo com a paleolatidade de ocorrência da bacia durante o período Devoniano. **A:** Reconstruções paleogeográficas da Bacia do Paraná durante o Emsiano (Devoniano Inferior Final); **B:** Reconstrução paleogeográfica da Bacia do Paraná durante o Devoniano Médio. Adaptado de: Witzke, Heckel, 1988; Isaacson, Sablock, 1990; Isaacson, Diaz Martinez, 1994.
- Figura 2**.....pág. 22
Amostra fitofossilífera onde os fragmentos de *S. nanum* estão inseridos.
- Figura 3**.....pág. 22
Local de coleta dos fitofósseis utilizados neste trabalho.
- Figura 4**.....pág. 23
Exemplar de *Haplostigma* utilizado neste trabalho.
- Figura 5**.....pág. 24
Exemplar de *Palaeostigma* utilizado neste trabalho.
- Figura 6**.....pág. 28
Detalhamento dos fragmentos vegetais presentes no pacote fossilífero, identificados como *Spongiophyton nanum*. **a-f:** talos vegetais recobertos por poros cuticulares. Abreviações: *P* = poros cuticulares; *T* = formato taloide.
- Figura 7**.....pág. 29
Vegetais presentes no pacote fossilífero, identificados como *Spongiophyton nanum*. **A:** talo vegetal com a superfície não recoberta por poros e com uma ramificação dicotômica em sua extremidade; **B:** talo de *S. nanum* apresentando uma “dobra”; **C:** talo apresentando dobramento. Abreviações: *Dc* = dicotomização; *Db* = “dobra”.
- Figura 8**.....pág. 30
A: primeiro tratamento realizado, onde pode-se ver os quadrantes na amostra, bem como os fitofósseis presentes destacados em azul (Dimensões: 14,7 cm de altura e 32,5 cm de comprimento); **B:** segundo tratamento realizado, quando os fitofósseis foram isolados e avaliados individualmente, sendo a seta laranja indicando o Norte geográfico e as barras em verde os talos de *S. nanum*; **C:** terceiro tratamento realizado, quando foi possível reconstituir os fitofósseis, sobrepostos à amostra.
- Figura 9**.....pág. 31
A: Representação de como a amostra foi dividida, sendo estabelecidos 4 quadrantes. A seta laranja indica o Norte geográfico e as barras em verde os talos de *S. nanum*; **B:**

Representação das direções em que os fragmentos podem estar orientados na amostra; **C**: Proporção de fragmentos para cada quadrante, levando em consideração a direção em que estão orientados.

Figura 10.....pág. 32

A-D: Proporção de fragmentos por quadrante levando em consideração o tamanho dos fragmentos e a direção em que estão orientados. **E**: Proporção entre os tamanhos dos fragmentos de acordo com a direção em que estão orientados. Abreviações: *P* - pequeno (fragmentos com 0,5 a 1,5 mm de comprimento); *M* - médio (fragmentos com 1,6 a 3 mm de comprimento); *G* - grande (fragmentos maiores que 5 mm de comprimento).

Figura 11.....pág. 33

Imagens topográficas do espécime 1 de *Spongiophyton nanum*, com poros preenchidos pela matriz rochosa, geradas em MEV.

Figura 12.....pág. 34

Imagens topográficas do espécime 2 de *Spongiophyton nanum*, com poros “vazios” (não preenchidos pela matriz rochosa), geradas em MEV.

Figura 13.....pág. 34

Contornos realizados sobre a morfologia detalhada dos espécimes de *Spongiophyton nanum* em MEV. É possível notar a variação no formato dos poros (*P*) em formas circulares a ovais. **A**. Redesenho realizado sobre o espécime 1 (com poros preenchidos pela matriz rochosa). **B**. Redesenho realizado sobre o espécime 2 (poros não preenchidos pela matriz rochosa). Abreviações: *P* = poros.

Figura 14.....pág. 35

Detalhamento do espécime de *Haplostigma*. As cicatrizes foliares, com formas circulares, se distribuem de maneira regular pelo caule.

Figura 15.....pág. 35

Contornos realizados sobre a morfologia de *Haplostigma*. A reconstrução destaca o formato circular das cicatrizes foliares e a distribuição em espiral pelo caule seguindo um sentido helicoidal, refletindo a filotaxia alterna-espiralada desses caules fósseis.

Figura 16.....pág. 36

Imagens topográficas de cicatrizes foliares de *Haplostigma* geradas em MEV, destacando o formato circular.

Figura 17.....pág. 37

Detalhamento do espécime de *Palaeostigma*. É possível notar o baixo grau de integridade da cutícula preservada.

Figura 18.....pág. 38

Mapeamento elementar de um espécime de *S. nanum*. Símbolos: *C* = carbono; *Al* = alumínio; *Ca* = Cálcio; *Fe* = ferro; *Si* = silício; *O* = oxigênio.

Figura 19.....pág. 38

Mapeamento elementar de um espécime de *S. nanum*. Símbolos: Símbolos: *C* = carbono; *Al* = alumínio; *Ca* = Cálcio; *Fe* = ferro; *Si* = silício; *O* = oxigênio.

Figura 20.....pág. 39

Espectros FTIR obtidos na região 4000-400 cm⁻¹ para *Spongiophyton nanum*. Os grupos químicos estão enumerados e a legenda se encontra na borda direita da imagem.

Figura 21.....pág. 40

Espectros FTIR obtidos na região 4000-400 cm⁻¹ para *Palaeostigma*. Os grupos químicos estão enumerados e a legenda se encontra na borda direita da imagem.

Sumário

1) INTRODUÇÃO	12
2) OBJETIVOS	15
3) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1) Panorama da diversificação das plantas no Devoniano	15
3.2) Tafonomia vegetal e sua relação com a paleoclimatologia	17
3.3) Levantamento morfológico dos vegetais	20
3.3.1) <i>Spongiophyton</i> Kräusel 1954 emend. Chaloner <i>et al.</i> (1974)	20
3.3.2) <i>Haplostigma</i> Seward, 1932 emend. Anderson; Anderson 1985	21
3.3.3) <i>Palaeostigma</i> Kräusel; Dolianiti, 1957	22
4) MATERIAIS E MÉTODOS	223
4.1) Área de estudo	223
4.2) Metodologias aplicadas	25
4.2.1) Estereomicroscópio	25
4.2.2) MEV/EDS	26
4.2.3) FTIR	27
5) RESULTADOS	28
5.1) Descrição morfológica dos vegetais fósseis	28
5.2) Estudos químicos	38
5.2.1) Análises em EDS	38
5.2.2) Análises em FTIR	40
6) DISCUSSÃO	412
7) CONCLUSÃO	489
8) REFERÊNCIAS	501
APÊNDICE A	578
ANEXO A	767
ANEXO B	778
ANEXO C	789
ANEXO D	80
ANEXO E	801

1) INTRODUÇÃO

A presente pesquisa busca evidenciar a interação existente entre a morfologia de vegetais pretéritos com o paleoclima dos períodos em que esses organismos viveram, uma vez que, baseado em estudos morfológicos, biogeográficos, ecológicos e bioestratigráficos de materiais fósseis, é possível inferir a ocorrência de extinções em massa, alterações morfológicas, mudanças na diversidade e como esses eventos se relacionam ao do paleoclima e suas variações.

De acordo com alguns referenciais da área (MCELWAIN, CHALONER, 1995; CHALONER, MCELWAIN, 1997; MCELWAIN, 1998; MATSUMURA, IANNUZZI, BOSETTI, 2015; MCELWAIN *et al.*, 2016), as condições climáticas podem interferir na morfologia e diversidade de organismos fotossintetizantes, provocando até modificações em suas estruturas e distribuição. Há diversas evidências de uma correlação existente entre fatores paleoclimáticos e a consequente transformação na distribuição, diversidade e morfologia de vegetais paleozoicos, principalmente devonianos, revelando o potencial dos fitofósseis em refletir as mudanças paleoclimáticas ocorridas no decorrer do tempo geológico.

McElwain e Chaloner (1995), Chaloner e McElwain (1997) e McElwain (1998) utilizaram a densidade estomática de plantas paleozoicas como *Aglaophyton major* e *Saudonia ornata* (Devoniano Inicial), *Swillingtonia denticulata* (Carbonífero Final) e *Lebachia frondosa* (Permiano Inicial) como *proxies* de CO₂ da paleoatmosfera desses períodos. Os autores inferiram uma elevada concentração de CO₂ atmosférico para o início do Devoniano e uma redução nessa concentração no Carbonífero Final e no início do Permiano.

McElwain e colaboradores (2016) também realizaram estudo semelhante obtendo estimativas precisas de CO₂ atmosférico a partir de estômatos de plantas fósseis, como *Aglaophyton major* e *Asteroxylon mackiei* (Devoniano) e as pteridosperma carboníferas, *Neuropteris ovata* e *Macroneuropteris scheuchzeri*. Ainda, os autores levantaram a necessidade de melhorar a compreensão na relação entre as características morfológicas e anatômicas com taxas de assimilação de carbono vegetal no registro fóssil.

A partir de estudos realizados com fitofósseis provenientes dos afloramentos Itátytyba e Sítio Wolff, ambos localizados no estado do Paraná e pertencentes à Formação São Domingos, Sub-bacia Apucarana (Devoniano da Bacia do Paraná), Matsumura, Iannuzzi e Bosetti (2013, 2015) registraram a ocorrência do gênero *Haplostigma* Seward, 1932, juntamente dos táxons *Spongiophyton* Kräusel 1954 emend. Chaloner *et al.* (1974) e *Palaeostigma* Kräusel; Dolianiti, 1957. Segundo Bosetti *et al.* (2010), os sedimentos

siliciclásticos que compõem os folhelhos devonianos do Paraná foram depositados em ambiente marinho epicontinental que se localizavam em paleolatitudes entre 50° e 60° sul, onde o clima era possivelmente temperado. Durante o Devoniano, uma expansão de *Haplostigma* teria ocorrido em áreas de média à alta latitude, dentro de uma região climática fria, por todo o Gondwana (MATSUMURA, IANNUZZI, BOSETTI, 2015). De acordo com as conclusões de Moisan, Niemeyer e Kerp (2011), as características de *Haplostigma*, como o tamanho (pequeno a médio) e o rápido crescimento, são indícios de uma adaptação ao clima frio-temperado e a altas latitudes, onde há longos períodos anuais de escuridão e, geralmente, apresentam uma baixa diversidade.

A Bacia do Paraná é uma das principais bacias sedimentares paleozoicas existentes no Brasil e engloba territórios do Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai (MILANI *et al.*, 2007). Existem estudos para o Devoniano envolvendo essa bacia, contando com trabalhos estratigráficos (POPP, BARCELLOS-POPP, 1986; ASSINE *et al.*, 1998; BERGAMASCHI, PEREIRA, 2001), sedimentológicos (ASSINE, SOARES, MILANI, 1994; ASSINE, 1999; PEREIRA, 2000), tafonômicos (RODRIGUES, SIMÕES, LEME, 2003; GHILARDI, 2004; ZABINI, 2007), paleobiogeográficos (BOLZON, AZEVEDO, ASSINE, 2002; SCHEFFLER, FERNANDES, 2007) e sistemáticos (LEME *et al.*, 2004; SOARES, SIMÕES, LEME, 2008; COMNISKEY, 2011), porém, com foco no Devoniano Inferior e Médio, dado que não há registro de fósseis marcadores de idade pós-Devoniano Médio para essa bacia sedimentar. Durante o final do Devoniano Inferior (Emsiano), a borda Noroeste da Bacia do Paraná deveria se situar entre 60° e 65° de latitude sul, enquanto a borda leste se localizava entre 70° e 80° de latitude sul (WITZKE, HECKEL, 1988; ISAACSON, SABLOCK, 1990; ISAACSON, DIAZ MARTINEZ, 1994). Durante o Devoniano Médio, a borda noroeste teria se deslocado para latitudes entre 50° e 55° sul e a borda leste para 60 a 65° de latitude sul (ISAACSON, SABLOCK, 1990; ISAACSON, DIAZ MARTINEZ, 1994) (Figura 1).

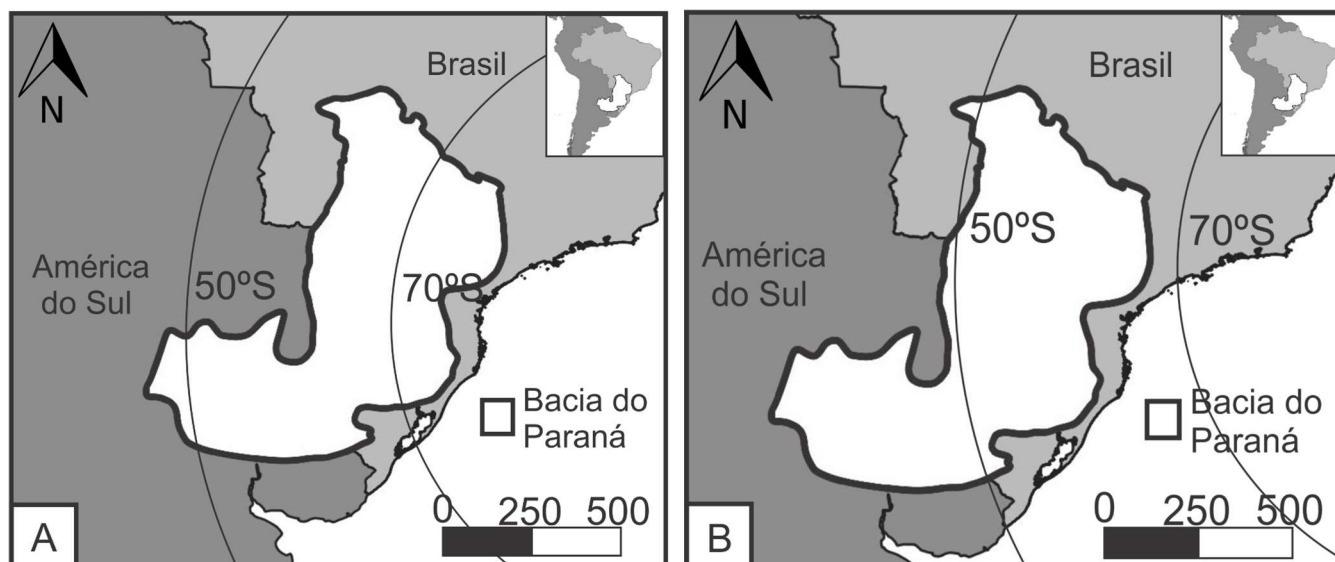


Figura 1. Reconstrução paleogeográfica da Bacia do Paraná de acordo com a paleolatidade de ocorrência da bacia durante o período Devoniano. **A:** Reconstruções paleogeográficas da Bacia do Paraná durante o Emsiano (Devoniano Inferior Final); **B:** Reconstrução paleogeográfica da Bacia do Paraná durante o Devoniano Médio. Adaptado de: Witzke, Heckel, 1988; Isaacson, Sablock, 1990; Isaacson, Diaz Martinez, 1994.

Os estudos paleoclimáticos realizados na Bacia do Paraná se basearam na fauna e flora encontradas em seus afloramentos devonianos e em eventos de transgressão e regressão marinhas evidenciadas por esses fósseis (COPPER, 1977; BOSETTI *et al.*, 2012; HORODYSKI *et al.*, 2014; MATSUMURA, IANNUZZI, BOSETTI, 2015). Estes afloramentos se encontravam entre 60° e 80° de latitude Sul durante o Devoniano, concordando com o clima de baixas temperaturas inferido por meio dos fósseis encontrados nessas rochas.

Na porção brasileira da Bacia do Paraná, houve registros de bivalves bentônicos de tamanhos relativamente grandes que indicaram a ocorrência de climas frios a subárticos equivalentes ao Atlântico Norte atual, durante o Devoniano Superior (COPPER, 1977). Horodyski *et al.* (2014) documentaram que na porção central da Sub-bacia Apucarana (Devoniano da Bacia do Paraná), há registros de uma sucessão de folhelhos pretos de mesma idade do evento Kačák (Eifeliano-Givetiano), onde uma hipóxia global levou à deposição generalizada dessas rochas em fácies hemipelágicas, pelágicas e algumas neríticas. Segundo House (1996, 2002), esse evento está associado a um pico transgressivo que causou diversas extinções estimadas para o Eifeliano, valendo ressaltar que o fenômeno de transgressão marinha é frequentemente vinculado a um clima mais quente (BOSETTI *et al.*, 2012).

E como já citado anteriormente, Matsumura, Iannuzzi e Bosetti (2013, 2015) encontraram exemplares de *Haplostigma* em rochas aflorantes da Bacia do Paraná, cujas

características morfológicas inferem adaptações para um clima frio-temperado, que geralmente ocorre em áreas de altas latitudes.

Levando em consideração o que foi apresentado até aqui, é possível estabelecer uma relação entre as características morfológicas dos vegetais fósseis e o paleoclima do período a que estão associados. Ainda, estes estudos permitem compreender a importância da paleolatidade dos depósitos sedimentares nos quais os fósseis foram encontrados.

Por fim, o fato de que os trabalhos que fazem este tipo de relação a partir de materiais fitofósseis no que diz respeito à porção brasileira da Bacia do Paraná, ainda mais quando nos restringimos a sua borda noroeste, serem escassos também justifica a relevância da presente pesquisa.

2) OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é distinguir detalhes morfológicos de vegetais fósseis passíveis de serem relacionados ao paleoclima, levando em consideração a paleolatidade original de deposição dos estratos do Devoniano Médio da Bacia do Paraná. Para se alcançar o objetivo principal, os objetivos específicos são: 1) Inferir através de análises elementares a validação taxonômica dos táxons; 2) Distinguir dados tafonômicos relacionados a variações ambientais e 3) Relacionar ambientes de sedimentação aos táxons estudados.

3) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1) Panorama da diversificação das plantas no Devoniano

Uma flora centimétrica, com plantas de talos nus, com ramificação dicotômica e com estruturas que liberam esporos no chão, surgiu durante o Siluriano e integrava a biota do início do Devoniano. Essa origem se deu pelo acúmulo de caracteres que favoreceram esse aumento vertical das plantas, como as cutículas, com superfícies recobertas por uma camada cerosa que impede a perda de água e, consequentemente, possibilita a planta a manter uma posição ereta devido à pressão de turgor exercida pelo água no interior dos talos; e os poros ou estômatos, que são cavidades na superfície das plantas que permitem as trocas gasosas; e os esporos, que são estruturas microscópicas associadas à reprodução das plantas (TAYLOR *et al.*, 2009; GENSEL *et al.*, 2020).

No Wenlockiano (Siluriano), aparecem as primeiras células condutoras, que ao longo do Devoniano sofrem diversificação, surgindo os elementos condutores tipo C, G e S (EDWARDS, DAVIES, AXE, 1992; LUCAS *et al.*, 2013; TAYLOR *et al.*, 2009). Neste

período, as plantas com talos verdes fotossintetizantes, nus e com esporângios em suas extremidades viviam em solos encharcados, uma vez que ainda dependiam de água para sua reprodução e nutrição. Dessa forma, essas plantas ainda não possuíam grande porte. Já foi encontrado um fóssil de *Aglaophyton major*, outra espécie riniófita do Devoniano, com presença de micorrizas, evidenciando a ocorrência de associação entre fungos e rizoides de plantas durante esse período (TAYLOR *et al.*, 2009; GENSEL *et al.*, 2020).

Podemos citar exemplos dessas plantas utilizando registros de fósseis vegetais já realizados em terrenos devonianos da Bacia do Paraná. Em localidades da formação Furnas, no município de Jaguariaíva/PR, Gerriene *et al.* (2001) descreveram exemplares de *Cooksonia paranensis*, uma espécie do filo *Rhyniophyta*. Essas plantas possuíam epiderme com estômatos e tubos cilíndricos com as primeiras células condutoras no centro. Esses tubos atuavam como vias que favoreceram o crescimento em tamanho e reprodução e sobrevivência diferenciais dessas plantas no ambiente.

Outros dois grandes grupos de plantas no Devoniano surgiram e passaram a fazer parte da paisagem devoniana: Zoosterophyta e Trimerophyta. Nestes grupos, estão inclusas a *Deheubarthia splendens*, uma espécie de zoosterófita, e a *Pertica varia*, uma trimerófita e a maior espécie de plantas do Devoniano, atingindo até 3 metros (m) de altura (TAYLOR *et al.*, 2009). Assim, partindo das plantas do Siluriano, que atingiam até cerca de 2 centímetros (cm), surgem plantas de até 3 m durante o Devoniano.

Durante o período Devoniano, uma queda maciça no CO₂ atmosférico levou à evolução de folhas com lâminas largas. Assim, os representantes destes dois novos grupos de plantas do Devoniano possuíam enações que auxiliavam na redução da perda de água e no aumento da superfície fotossintética. Dessa forma, passou a haver uma ramificação tridimensional nestes organismos, uma vez que antes eram mais planas. Estas modificações, somadas às alterações na concentração de CO₂ na atmosfera devoniana (BEERLING, ORBORNE, CHALONER, 2001), contribuíram para uma ampliação dos nichos ecológicos a serem ocupados por estas plantas e, ainda, um melhor aproveitamento da energia solar (TAYLOR *et al.*, 2009). Beerling, Osborne e Chaloner (2001) concluíram que uma queda na concentração do CO₂ atmosférico levou à evolução de folhas com lâmina larga.

Durante o Devoniano Inicial a Médio, onde houve um aumento na concentração de CO₂ (BERNER, KOTHAVALA, 2001; SIMON *et al.*, 2007), os microfilos foram favorecidos, enquanto no Devoniano Médio, onde essa concentração foi reduzida (BERNER, KOTHAVALA, 2001; SIMON *et al.*, 2007), os megafilos foram mais beneficiados, em

questão de sucesso reprodutivo e de sobrevivência, por conta da presença e aumento da densidade estomática, vascularização e fisiologia mais complexa.

No final do Devoniano, as primeiras florestas se estabelecem na terra, com o surgimento de novas linhagens de planta, como o *Pseudoporochnus nodosus*, do grupo das cladoxylopsidas, e o *Archaeopteris*, gênero que dominou os ecossistemas do Devoniano Médio ao Frasniano Tardio e que possuíam troncos semelhantes ao das gimnospermas e folhas parecidas com as de samambaias (TAYLOR *et al.*, 2009). Devido suas estruturas serem distintas de todas as plantas que existem atualmente, é considerada uma linhagem extinta. Ainda no Devoniano, surgem as primeiras plantas a produzirem pólen e sementes, como a *Medullosa*, um grupo extinto de pteridospermas. Suas folhas possuíam estruturas que permitiam a liberação de pólen e sementes para o ambiente em distâncias maiores (TAYLOR *et al.*, 2009). Assim, esta característica favoreceu a essas linhagens de planta a colonização de ambientes mais independentes da água do ambiente para reprodução e nutrição. No entanto, seriam ainda ambientes intermediários, próximos da água.

3.2) Tafonomia vegetal e sua relação com a paleoclimatologia

O registro paleobotânico é uma fonte rica de dados tafonômicos, paleoambientais e paleoclimáticos, desde que as condições de formação das assembleias fitofossilíferas sejam avaliadas (FALCON-LANG, MILLER, 2007; NEREGATO, IANNUZZI, 2017; DIMICHELE *et al.*, 2020). Fatores como grau de transporte, variações climáticas e nas condições ambientais, características morfoanatômicas e fisiológicas, características adaptativas e tipo de ambiente de vida e de deposição interferem no grau de integridade dos restos vegetais e na possibilidade de cada indivíduo em ser preservado nas rochas (SPICER, 1981; REX, CHALONER, 1983; SCHEINING, PFEFFERKORN, 1984; FERGUSON, 1985; BURNHAM, SPICER, 1986; DIMICHELE, NELSON, 1989; GASTALDO, 1989; GASTALDO *et al.*, 1989; BURNHAM *et al.*, 1992; BURNHAM, 1993; GUERRA-SOMMER, 1993; FALCON-LANG, MILLER, 2007; NEREGATO, IANNUZZI, 2017; DIMICHELE *et al.*, 2020).

O grau de transporte de diferentes partes das plantas é muito variável e, no caso de cutículas espessas, como as de *Spongiophyton*, que possuem espessuras 4 vezes mais grossas que as de psilófitas primitivas (GUERRA-SOMMER, 1993), são características que promovem maior grau de transporte (NEREGATO, IANNUZZI, 2017). Burnham *et al.* (1992) e Burnham (1993) descobriram que amostras de serapilheira de florestas temperadas tinham maior probabilidade de registrar as espécies-fontes dominantes presentes,

enquanto amostras de florestas tropicais registram menores números de espécie, além de, segundo DiMichele e Nelson (1989), alta heterogeneidade espacial. Desse modo, Burnham (1993) sugeriu que “filtros climáticos” deveriam ser aplicados a estimativas de diversidade de plantas pretéritas.

Na passagem do Pensilvaniano (Carbonífero) para o Permiano, onde o clima da Euramérica tornou-se mais seco, DiMichele *et al.* (2020) apontaram o registro de uma transição de uma flora “paleofítica”, dominada por pteridófitas, para uma flora “mesofítica”, dominada por plantas com sementes, ou seja, com características adaptativas para condições menos úmidas no ambiente. No entanto, os autores levantam a possibilidade de estabelecimento dessa flora tolerante à seca muito antes do Permiano, argumentando que houve a ocorrência de secas sazonais durante o Mississípiano e o Pensilvaniano (Carbonífero) que levou à dispersão das plantas com tolerância à seca em outras áreas da Pangeia.

Além desta variação climática, outras megabiases tafonômicas que interferem no registro paleobotânico são apontadas por DiMichele *et al.* (2020), que justificam a frequência em que os fósseis vegetais são documentados no registro fóssil. A raridade no registro da flora mesofítica (com tolerância às condições de seca) antes do Permiano seria consequência das condições físicas do bioma pantanoso, que favoreciam a própria preservação e representação no registro fóssil, enquanto as condições secas desfavorecem a preservação da flora tolerante à seca, ou seja, por mais que a flora mesofítica esteja dominando no ambiente seco, as chances de preservação no registro fóssil são reduzidas pelas próprias condições ambientais. Ainda, o bioma pantanoso, ou seja, com características adaptativas à umidade, está associado ao carvão, frequentemente coletado durante a extração realizada pelas mineradoras de carvão. Por fim, a seca extensiva do Permiano levou à redução de áreas úmidas e, consequentemente, à redução da representação de plantas paleofíticas (tolerantes a ambiente úmido) no registro fóssil, porém, não interferiu no registro de plantas mesofíticas. Assim, estes autores concluíram que enquanto a expansão ou redução de áreas úmidas impactavam a abundância de plantas paleofíticas e, consequentemente a frequência em que elas aparecem no registro fóssil, a abundância de espécies mesofíticas permaneceu a mesma, pois durante a expansão de áreas úmidas, houve redução na população de plantas tolerantes à seca, e durante a redução das áreas úmidas, as condições não eram favoráveis para a preservação dos organismos.

Assembleias megaflorais de idade langsettiana (Pennsylvania Inicial) foram encontradas em rochas da Formação Lancaster, Saint John, New Brunswick, Canadá. Realizando análises de fácies, Falcon-Lang e Miller (2007) sugeriram a deposição dessas plantas em planícies costeiras tectonicamente influenciadas. Os autores inferiram que florestas de *Cordaites* arbustivos, como *C. borassifolius* Sternberg (Unger) e *C. principalis* (Germar) Geinitz, e de cycadópsidas (pteridospermas), como *Alethopteris discrepans* Dawson e *Laveineopteris loshii* (Brongniart) Cleal *et al.* dominavam a região costeira, enquanto samambaias, esfenopsídeos e licopsídeos, como *Lepidodendron* sp., *Sigillaria* sp. e *Stigmara ficoides* Brongniart, eram raros. Plantas de afinidade incerta também são citadas como elementos composicionais de ambientes de planalto. A Fácies composta por *Cordaites*, segundo estes autores, era formada por pequenos lóbulos de delta, que se aglutinaram para formar uma planície costeira, cujo litoral era dominado por ondas.

Outro exemplo da influência das características adaptativas e do regime climático na distribuição e preservação de plantas é o que ocorreu com *Haplostigma* durante o Devoniano e com táxons herbáceos no geral. As partes de plantas herbáceas geralmente murcham e apodrecem na planta-mãe, de modo que sua preservação ocorre frequentemente em função do enterro rápido por inundações ou cinzas vulcânicas (BURNHAM, SPICER, 1986). Com base nas características morfoanatômicas e fisiológicas dos caules de *Haplostigma*, uma distribuição em áreas de altas latitudes foi atribuída a esse táxon. Segundo Moisan, Niemeyer e Kerp (2011), o porte pequeno a médio e o crescimento rápido desses organismos seriam características que promoveram a tolerância dessas plantas ao regime climático frio-temperado que dominava as regiões de altitudes elevadas durante o Devoniano.

Os tipos de ambientes são outros fatores que influenciam na preservação dos organismos no registro fóssil. Ao entrar em habitat fluvial, seja por transporte eólico ou inundação e erosão da vegetação da margem do rio, os restos vegetais apresentam flutuabilidade diferencial e, portanto, suscetibilidade ao transporte a jusante (FERGUSON, 1985). Os tempos de flutuação variam de algumas horas a várias semanas (SPICER, 1981; FERGUSON, 1985). Folhas com cutículas finas, grande número de estômatos, pouca lignificação ou que sofreram extensa dessecação ou degradação tornam-se rapidamente encharcadas. Assim, as folhas cartáceas tendem a afundar primeiro e as coriáceas por último. No caso de ambiente de diques, a preservação das folhas torna-se vulnerável, uma vez que os restos vegetais são oxidadas por exposição aérea e bioturbação por raízes

(SCHEINING, PFEFFERKORN, 1984; GASTALDO, 1989; GASTALDO *et al.*, 1989; NEREGATO, IANNUZZI, 2017).

Por fim, mudanças significativas na anatomia fóssil também podem ocorrer durante o enterro e a compressão. Em simulações de laboratório, Rex e Chaloner (1983) documentaram a impressão através de características anatômicas em uma superfície para a face oposta, portanto, a presença de características da superfície não é um indicador infalível de que se está olhando para a superfície real de uma amostra. Os autores verificaram também que o ângulo dos espécimes fósseis e as camadas estratigráficas ricas em orgânicos influenciam a fratura e aparência de espécimes de *Calamites*, *Lepidodendron*, *Sawdonia* e *Stigmara*.

3.3) Levantamento morfológico dos vegetais

3.3.1) *Spongiophyton* Kräusel 1954 emend. Chaloner *et al.* (1974)

Os *Spongiophyton* são um gênero extinto de plantas da família Spongiophytaceae Kräusel, Venkatachala (1966) que tiveram uma grande dispersão pelo planeta durante o Devoniano, tendo sido encontrados por diversos pesquisadores em diferentes regiões do mundo (KRÄUSEL, 1954; KRÄUSEL, VENKATACHALA, 1966; BOUREAU, PONS, 1973; CHALONER *et al.* 1974; ZDEBSKA, 1978; GENSEL *et al.* 1991; GUERRA-SOMMER, 1993; GRIFFING *et al.* 2000; MATSUMURA *et al.*, 2013). Atualmente extinto, esse grupo abrange as espécies *S. lenticularis*, *S. nanum*, *S. minutissimum* e *S. articulatum*.

Os fósseis desses vegetais contam com estruturas taloides achatados dorso-ventralmente, de tamanhos diminutos, podendo chegar a 10 mm de largura e 25 mm de comprimento, com eixos ramificados e extremidades arredondadas. Em uma das superfícies, denominada “superfície poral”, há a presença de poros circulares com 200 a 300 µm de diâmetro distribuídos irregularmente. Por fim, os talos de *Spongiophyton* são recobertos por uma cutícula de coloração preta a avermelhada, cuja espessura é três vezes maior na “superfície poral” do que na “superfície não poral”. A união dessas características aponta um hábitat de vida terrestre, com tolerância a ambientes secos. Para Chaloner *et al.* (1974), esses poros podem ter auxiliado nas trocas gasosas entre o interior do vegetal e a atmosfera, representando assim um estágio na evolução dos estômatos. Quanto à presença de cutículas, seria outra evidência de exposição a ambientes que não estão sob a água (GUERRA-SOMMER, 1993).

Para Gensel *et al.* (1991), as cutículas, de composição lipídica, poderiam incluir *Spongiophyton* na linhagem das embriófitas, uma vez que apenas este grupo possui cutículas cutinizadas (de constituição lipídica). Entretanto, as paredes dos tubos, de

constituição parenquimatosa, poderiam indicar um grupo de plantas derivadas de algum clado de algas que tenha se adaptado a um nicho terrestre, possuindo, portanto, uma cutícula resistente.

Jahren *et al.* (2003) chegaram a suportar, através de medições das taxas de isótopos de carbono, que *Spongiophyton* foram organismos liquênicos. A categorização dos espongiófitos como líquens também foi feita por Taylor *et al.* (2004), através de análises em microscópio eletrônico de varredura. Porém, Fletcher *et al.* (2004) demonstraram que os valores das taxas de isótopo de carbono em *Spongiophyton* são similares tanto aos valores isotópicos de líquens como também aos valores isotópicos de hepáticas e musgos (briófitas). Assim, até os tempos atuais, as afinidades de *Spongiophyton* permanecem hipotéticas.

A composição elementar de cutículas de *S. nanum* já foi investigada por Chaloner *et al.* (1974) para estudos taxonômicos, no entanto, tais informações não foram conclusivas para esse fim. Neste estudo, os autores realizaram análises elementares de uma amostra do Devoniano Médio de Gana e identificaram os principais elementos que compõem a cutícula desses organismos e suas respectivas porcentagens (%), registrando 78.4% de carbono, 8.4% de hidrogênio, 2.7% de nitrogênio e o restante (10.5%) de oxigênio.

3.3.2) *Haplostigma* Seward, 1932 emend. Anderson; Anderson 1985

O gênero *Haplostigma* foi descrito pela primeira vez em 1932, no trabalho de Seward (1932) com caules ocorrentes nas camadas do Devoniano Médio-Superior da África do Sul (Grupos Bokkeveld e Witteberg). Este gênero compreende licópsidas de caules lisos, de porte herbáceo, hastes de 5 a 50 mm de diâmetro, raramente bifurcado, portadores de cicatrizes foliares pequenas a grandes, com formato circular a ovalado e em disposição espiralada (helicoidal), com apêndices espinhosos rígidos (SEWARD, 1932, p. 365). Eventualmente, um traço vascular central é evidenciado (SEWARD, 1932 emend. ANDERSON, ANDERSON, 1985, p.89). Esse táxon abrange as espécies *H. irregulare*, *H. furquei* FRENGUELLI 1952, *H. lineare* (WALKOM) MC LONGHLIN & LONG 1994, *H. baldisii* GUTIÉRREZ & ARCHANGELSKY, 1997 e *H. kowiensis* ANDERSON & ANDERSON, 1985.

Por não haver uma definição genérica bem definida, outros trabalhos referiram o táxon *Haplostigma* como um morfogênero para caules de licófitas herbáceas com apêndices espiniformes ocorrentes no Devoniano do Gondwana (PLUMSTEAD, 1967; MCLOUGHLIN, LONG, 1994; GUTIÉRREZ, 1996; GUTIÉRREZ, ARCHANGELSKY, 1997; CINGOLANI *et al.*, 2002; DI PASQUO *et al.*, 2009; MOISAN *et al.*, 2011).

Sendo um gênero endêmico do Gondwana, o *Haplostigma* teria sido bem adaptado ao Sub-reino Afro-Sul Americano (ASA ou SAS), com distribuição restrita a esses terrenos de alta a média latitude dentro de uma zona climática fria e temperada. Esses organismos teriam surgido durante o Emsiano Final e se expandido no Givetiano/Frasniano Inicial (DI PASQUO *et al.*, 2009; MATSUMURA *et al.*, 2015).

Moisan, Niemeyer e Kerp (2011) apontaram que o porte pequeno a médio de *Haplostigma* e o rápido crescimento desses organismos são características adaptativas ao clima frio-temperado e a altas latitudes. Matsumura, Iannuzzi e Bosetti (2015) concluíram que uma expansão desse gênero ocorreu em áreas de média à alta latitude durante o Devoniano.

3.3.3) *Palaeostigma* Kräusel; Dolianiti, 1957

O gênero *Palaeostigma* também pertence à classe das licópsidas e abrange as espécies *P. seawardii* Kräusel & Dolianiti, 1957, *P. gracilis* Anderson & Anderson, 1985 e *P. robusta* Anderson & Anderson, 1985.

Este gênero foi descrito pela primeira vez por Kräusel e Dolianiti (1957), com a apresentação da espécie *P. seawardii*, para designação de restos vegetais ocorrentes nas camadas Picos, Formação Pimenteira, da Bacia do Parnaíba.

Tratam-se de caules sem folhas verdadeiras, raramente bifurcado e recobertos por uma cutícula e com a superfície apresentando poros arredondados a alongados longitudinalmente, distribuídos de forma irregular ou ligeiramente helicoidal, e com numerosos apêndices espiniformes orientados.

Não há considerações ecológicas sobre *Palaeostigma* na literatura pois há poucos estudos que abordaram esse táxon.

O levantamento da morfologia desses vegetais, da sua composição elementar (no caso do gênero *Spongiophyton*) e dos ambientes associados a esses organismos colaboram para uma discussão a respeito dos dados obtidos nas análises elementares e microscópicas de alta resolução e sua aplicação em estudos taxonômicos e tafonômicos.

4) MATERIAIS E MÉTODOS

4.1) Área de estudo

Os exemplares de *S. nanum* estão dispostos em uma amostra (Figura 2) coletada na cidade de Jaciara, Mato Grosso, em afloramento à beira da BR-364 na saída da cidade

para Cuiabá e foi nomeado como “PJ1” ($15^{\circ}56'31.68''\text{S}$ $55^{\circ} 0'56.78''\text{O}$) (Figura 3). Este ponto se refere ao ponto denominado “AJ-03” do trabalho de Ribeiro *et al.* (2019) e a amostra está tombada como “PJ-187” na coleção científica do Laboratório de Paleontologia e Palinologia (PALMA) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) e foi concedida para a realização deste trabalho.

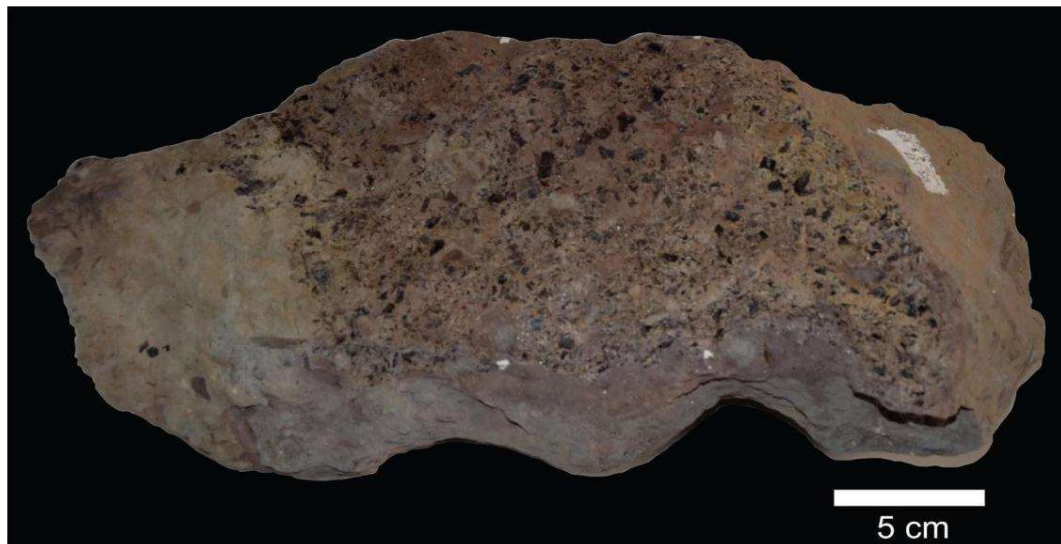


Figura 2. Amostra fitofossilífera onde os fragmentos de *S. nanum* estão inseridos.

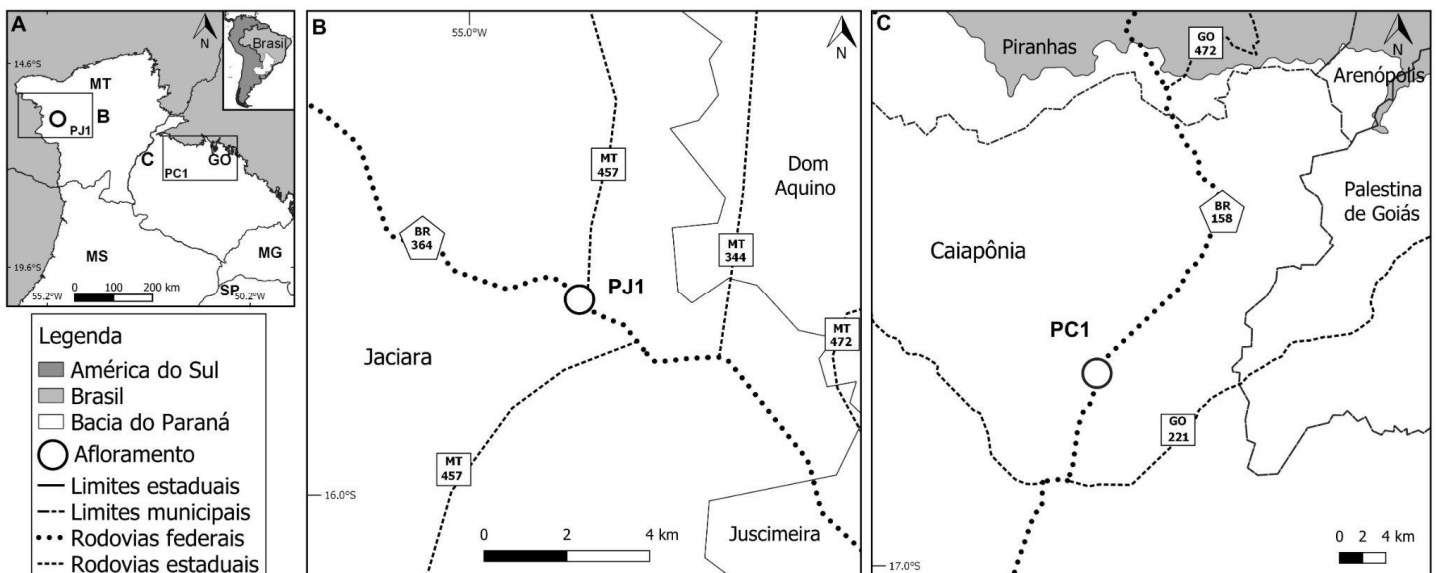


Figura 3. Local de coleta dos fitofósseis utilizados neste trabalho.

A seção estratigráfica em que a amostra de *S. nanum* foi coletada foi elaborada por Ribeiro *et al.* (2019) (Anexo A). A mesma possui uma espessura máxima de aproximadamente 12 m e o afloramento ocorre ao longo de 200 m da rodovia. De modo

geral, a seção compreende alternados pacotes de siltitos, arenitos e lentes conglomeráticas que, segundo Ribeiro *et al.* (2019), compreendem cíclicas sequências de rompimentos de diques marginais deltaicos sob uma planície deltaica. Os vegetais encontrados estão dispersos nas porções medianas do afloramento, em formas lenticulares imersos ora nos arenitos, ora nos conglomerados. A amostra coletada apresenta um bom estado de conservação e não há dados de datação para este material. Porém, ambientes refletidos por sequências sedimentares da seção em que a amostra foi encontrada são similares aos ambientes associados às seções da Unidade 3 do Grupo Chapada (RIBEIRO *et al.*, 2019), de idade Emsiano Final-Eifeliano (GRAHN *et al.*, 2010).

Os exemplares de *Haplostigma* (Figura 4) e de *Palaeostigma* (Figura 5) foram coletados em um afloramento pertencente à Unidade 4 da Grupo Chapada, localizado no município de Caiapônia, Goiás, e foi nomeado como “PC1” (51°46’48.022”O 16°50’40.059”S) (Figura 3). Atualmente, o exemplar está tombado como “CCLP958” na coleção científica do Laboratório de Paleontologia de Macroinvertebrados (LAPALMA).

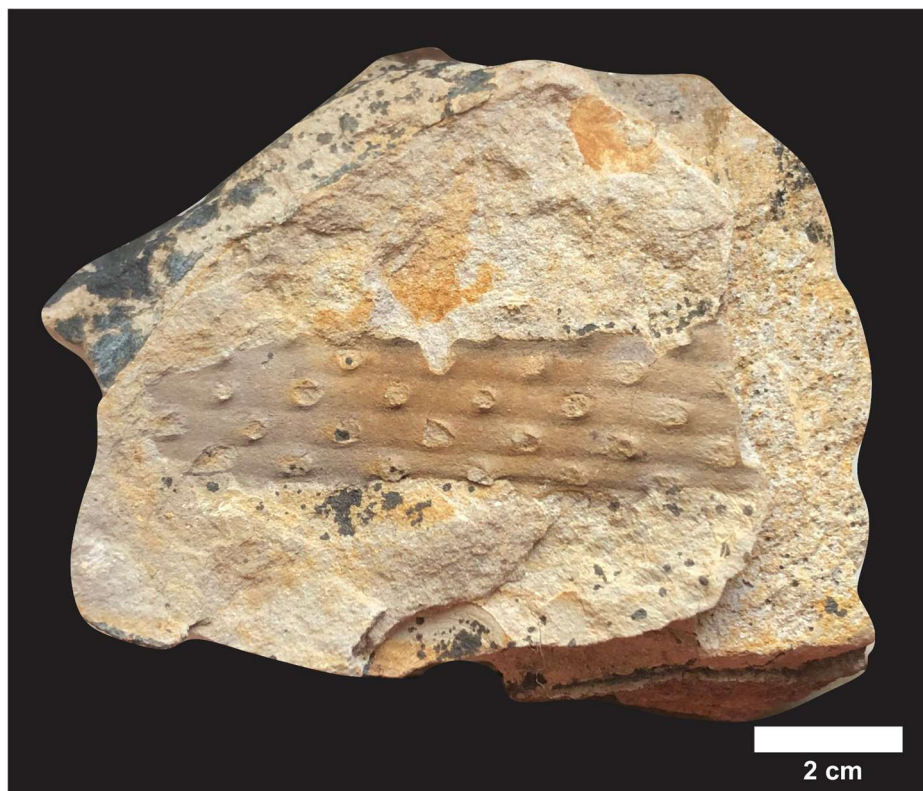


Figura 4. Exemplar de *Haplostigma* utilizado neste trabalho.

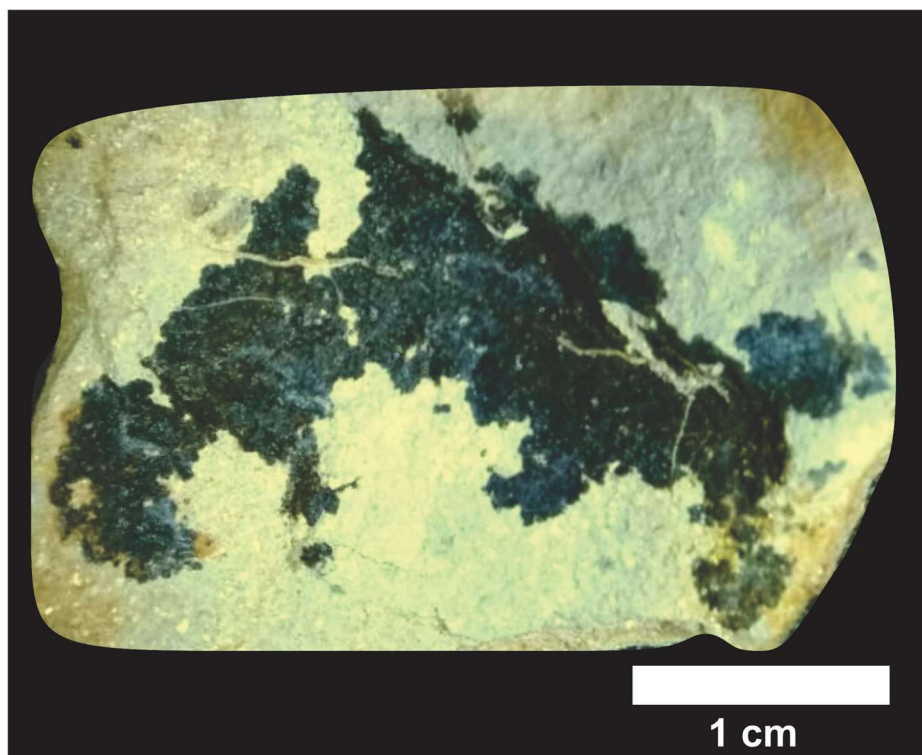


Figura 5. Exemplar de *Palaeostigma* utilizado neste trabalho.

A seção estratigráfica foi elaborada por Carbonaro e Ghilardi (2016) e pode ser consultada no Anexo B. Esta unidade consiste em folhelhos cinza escuros com intercalações de arenitos argilosos e siltitos. Seu contato superior com os diamictitos do Carbonífero do Grupo Itararé é erosivo (ANDRADE, CAMARÇO, 1980; GRAHN *et al.*, 2010). A unidade 4 é correlata com a Formação São Domingos da Sub-bacia Apucarana (MELO, 1988) e o início de sua deposição está relacionado à máxima transgressão marinha ocorrida no início do Givetiano (ASSINE, 2001; GRAHN *et al.*, 2010). De acordo com Grahn *et al.* (2010), as rochas desta unidade possuem idade Givetiano-Eofrasniano.

4.2) Metodologias aplicadas

4.2.1) Estereomicroscópio

Todas as amostras utilizadas neste estudo serão triadas em estereomicroscópio com a finalidade de elucidar detalhes morfológicos não visíveis a olho nu.

Matsumura *et al.* (2017) e Vieira *et al.* (2018), ao utilizar o material oriundo da região de Jaciara-MT, identificaram apenas a presença de *Spongiophyton nanum*. Assim, foram coletados dados relativos a essa espécie (KRÄUSEL, 1954; CHALONER *et al.*, 1974; GUERRA-SOMMER, 1993) para confirmar esse registro monoespecífico e auxiliar nas interpretações tafonômicas.

Para obter detalhes morfológicos das estruturas vegetais presentes na rocha, diferentes pontos da amostra foram fotografados utilizando um estereomicroscópio modelo Leica S8AP0 e mensuradas no programa Leica Application Suite 3.8.0. Esse detalhamento possibilita a observação do grau de preservação dos fósseis vegetais estudados e a identificação de possíveis estruturas não compatíveis com a descrição da única espécie até então identificada (*S. nanum*), além de refletir minimamente a energia ambiental necessária para a formação da concentração fitólita.

Ainda, buscou-se também extrair dados tafonômicos e fazer interpretações a respeito do grau de *time-averaging* presente no pacote por meio da confirmação de dados como registro monoespecífico, análise do sentido de distribuição e de orientação dos fragmentos na amostra e a integridade dos restos vegetais. Assim, é possível obter informações como velocidade do evento de deposição dos sedimentos e energia paleoambiental, o tipo de paleoambiente dos vegetais em questão e reconhecer a fidelidade paleoambiental refletida por esses fitofósseis. Como subsídio para estas interpretações, foi utilizado o capítulo “Tafonomia em Plantas”, elaborado por Neregato e Iannuzzi (2017), e o conteúdo disposto no item 3.2 deste trabalho, onde contém atributos tafonômicos em fósseis vegetais que podem ser utilizados para sustentar as interpretações.

Para a extração de dados, como a energia paleoambiental e o tipo de paleoambiente que teriam levado à formação do depósito fitofossilífero e à maneira em que os fragmentos vegetais estão orientados na amostra, o material fitofossilífero foi fotografado e as imagens foram tratadas no CorelDRAW X8 (64-Bit), facilitando sua mensuração e, desse modo, uma visualização mais detalhada das informações presentes na associação fóssil. Ainda, com a finalidade de facilitar a avaliação da amostra, a mesma foi fracionada em diversos segmentos, sendo estes posteriormente fotografados e as imagens foram sobrepostas para uma boa qualidade das imagens.

4.2.2) MEV/EDS

Partindo do pressuposto de que a análise em microscópio eletrônico de varredura traz detalhes não visíveis de fósseis analisados em microscópio óptico, dois exemplares de *Spongiophyton nanum* foram analisados em MEV acoplado ao espectrômetro de dispersão de raios-X (EDS) a fim de pormenorizar a morfologia desses materiais, além de elucidar a composição elementar das cutículas preservadas em rochas aflorantes no flanco Noroeste da Bacia do Paraná e apontar aspectos relevantes para estudos paleoambientais e ambientes de sedimentação.

Os vegetais foram analisados em Espectrometria de Energia Dispersiva (EDS) acoplado ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca Carl Zeiss modelo EVO LS 15, que permite fazer uma avaliação química qualitativa e semiquantitativa dos elementos composicionais da superfície das amostras.

Os 2 espécimes cuticulares de *Spongiophyton nanum* foram destacados da amostra e fixados no porta-amostra do equipamento através de uma fita adesiva de ouro (Au) que, além da fixação, é utilizado para aumento de condutividade de elétrons.

A composição de cutículas de *S. nanum* já foi investigada por Chaloner *et al.* (1974) para fins taxonômicos. Os autores estudaram uma amostra do Devoniano Médio de Gana e identificaram os principais elementos que compõem a cutícula desses organismos e suas respectivas porcentagens (%), registrando 78.4% de carbono, 8.4% de hidrogênio, 2.7% de nitrogênio e o restante (10.5%) de oxigênio.

4.2.3) FTIR

Estudos de cutículas fósseis em Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) têm contribuído para a caracterização química de fitofósseis devonianos da Bacia do Paraná e auxiliando em buscas de suas afinidades taxonômicas (MATSUMURA, BALZARETTI, IANNUZZI, 2016; MATSUMURA *et al.*, 2018), uma vez que este tipo de análise permite a identificação de grupamentos químicos presentes na composição do material observado.

No trabalho de Matsumura, Balzaretti e Iannuzzi (2016), os autores identificaram padrões composicionais de diferentes espécies do gênero *Spongiophyton* (*S. nanum*, *S. lenticularis*, *S. minutissimum*), permitindo assim a separação taxonômica por meio da análise em FTIR. Foram encontrados diferentes compostos orgânicos para cada espécie de *Spongiophyton* a partir dos espectros obtidos em FTIR, que permitiram, por exemplo, a extração da razão entre metil e metileno e entre carbono com dupla ligação com carbono e carbono com dupla ligação com oxigênio. Segundo os autores, essa diferença não poderia ser atribuída a fatores diagenéticos e pós-diagenéticos por terem sido coletados no mesmo leito fossilífero. Para o gênero *Palaeostigma*, há somente um resumo publicado por Matsumura *et al.* (2018) nos anais do XVI Simposio Argentino de Paleobotânica y Palinología, não havendo na literatura dados detalhados dos espectros obtidos em FTIR para esse gênero. Desse modo, esse tipo de estudo ainda é muito escasso para a macroflora devoniana da Bacia do Paraná.

No presente trabalho, foram realizadas análises em FTIR de cutículas fósseis de *Spongiophyton nanum* e de *Palaeostigma* para obtenção de dados sobre a composição

química desses materiais a partir dos espectros obtidos para cada táxon. As cutículas de *S. nanum* puderam ser destacadas da matriz e maceradas. Já para a cutícula de *Palaeostigma*, o processo de retirada foi por raspagem. Após 24 horas em estufa a 50°C, foi feita a análise dos fitofósseis.

Para a caracterização química por meio dos espectros obtidos em FTIR, foi utilizada uma espécie de “chave de identificação”, elaborada por Lopes e Fascio (2004) para identificar as substâncias orgânicas de acordo com os espectros obtidos no infravermelho, e também as atribuições dos grupos funcionais para cada região de número de ondas estabelecidas por Workman e Weyer (2012). Ambos os métodos de identificação são muito utilizados em trabalhos similares ao desenvolvido aqui e, no caso do segundo, foi utilizado por Matsumura, Balzaretto e Iannuzzi (2016), que estudaram materiais fitofósseis em FTIR.

5) RESULTADOS

5.1) Descrição morfológica dos vegetais fósseis

- ***Spongiophyton nanum***

Nas figuras de *Spongiophyton nanum* produzidas no estereomicroscópio (Figuras 6A-F e 7A-C) foi possível observar as estruturas talóides e cilíndricas, de coloração preta a marrom avermelhado, com tamanhos variando de 1 a 3 mm de largura e de 0,5 a 5 mm de comprimento. A figura 8A-C apresenta os resultados obtidos após a vetorização, mensuração e redesenho das estruturas com os tamanhos mais consideráveis da amostra. Não é observado um padrão na distribuição dos poros sobre a superfície da cutícula, de modo que estão dispostos irregularmente.

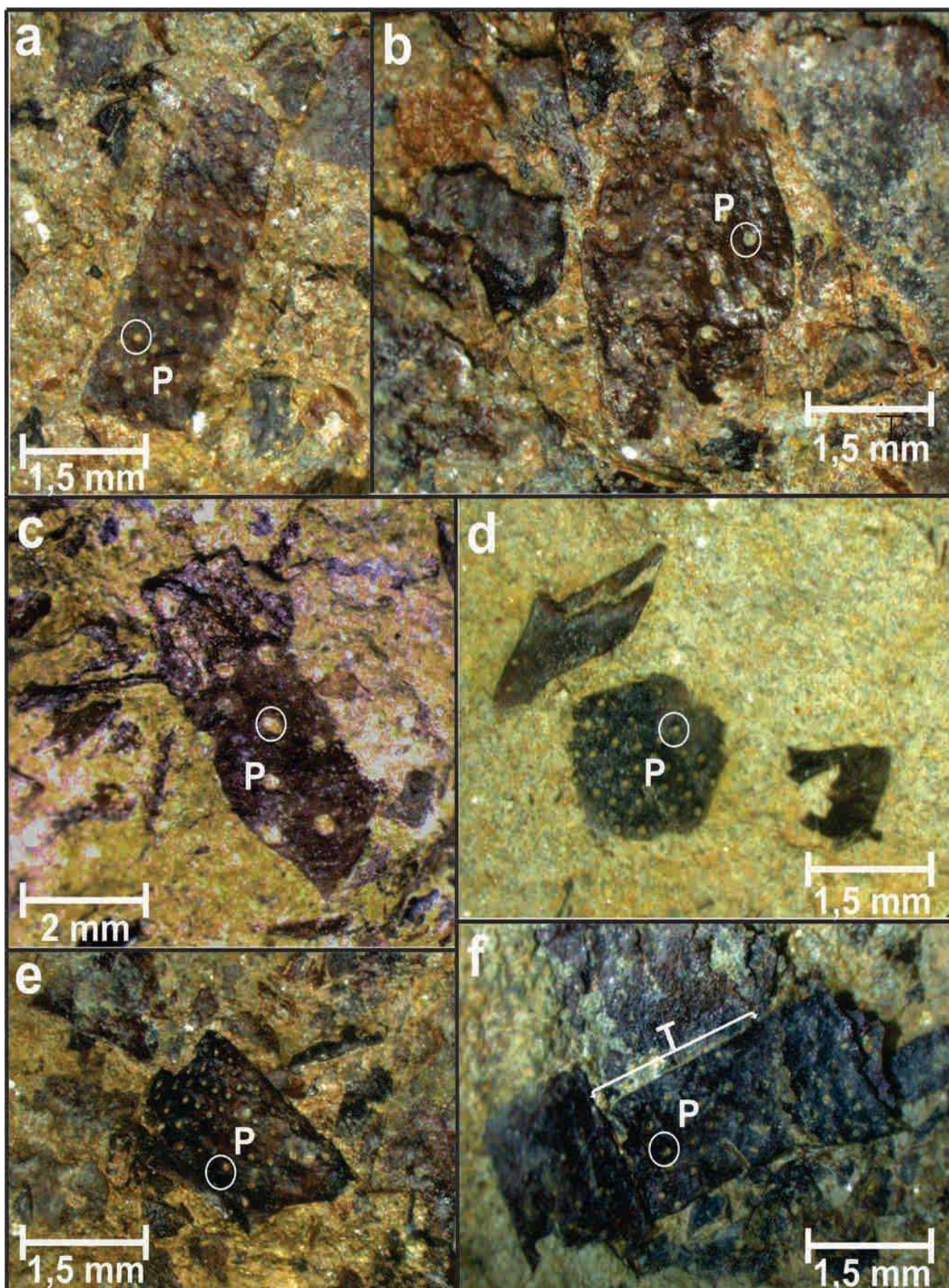


Figura 6. Detalhamento dos fragmentos vegetais presentes no pacote fossilífero, identificados como *Spongiophyton nanum*. **a-f:** talos vegetais recobertos por poros cuticulares. Abreviações: *P* = poros cuticulares; *T* = formato taloide.

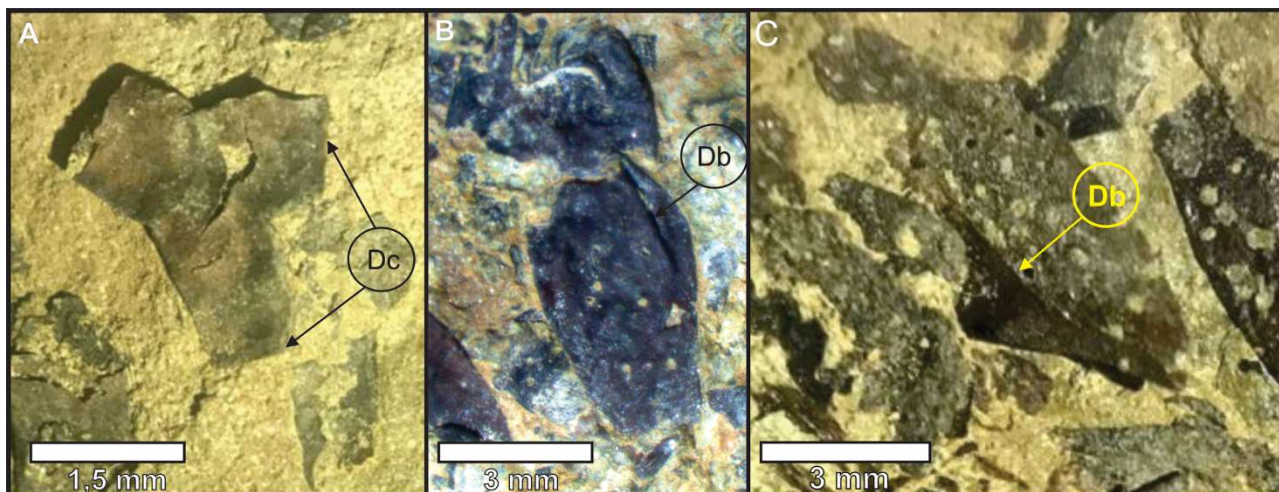


Figura 7. Vegetais presentes no pacote fossilífero, identificados como *Spongiophyton nanum*. **A:** talo vegetal com a superfície não recoberta por poros e com uma ramificação dicotômica em sua extremidade; **B:** talo de *S. nanum* apresentando uma “dobra”; **C:** talo apresentando dobramento. Abreviações: *Dc* = dicotomização; *Db* = “dobra”.

Um dos talos presentes na amostra não apresentou superfície porosa (Figura 7A) e alguns apresentaram dobras (7B-C). Os talos, de maneira geral, se encontram fragmentados e em posição paralela ao plano de acamamento.

De acordo com a figura 8B, os fragmentos estão dispostos de maneira dispersa uns dos outros ou há pequenas concentrações dos mesmos na amostra e não apresentam um padrão de distribuição. Aparentemente há indícios de que alguns fragmentos estiveram conectados durante a vida do organismo e, ao longo do processo de fossilização, acabaram se dissociando (Figura 8C).

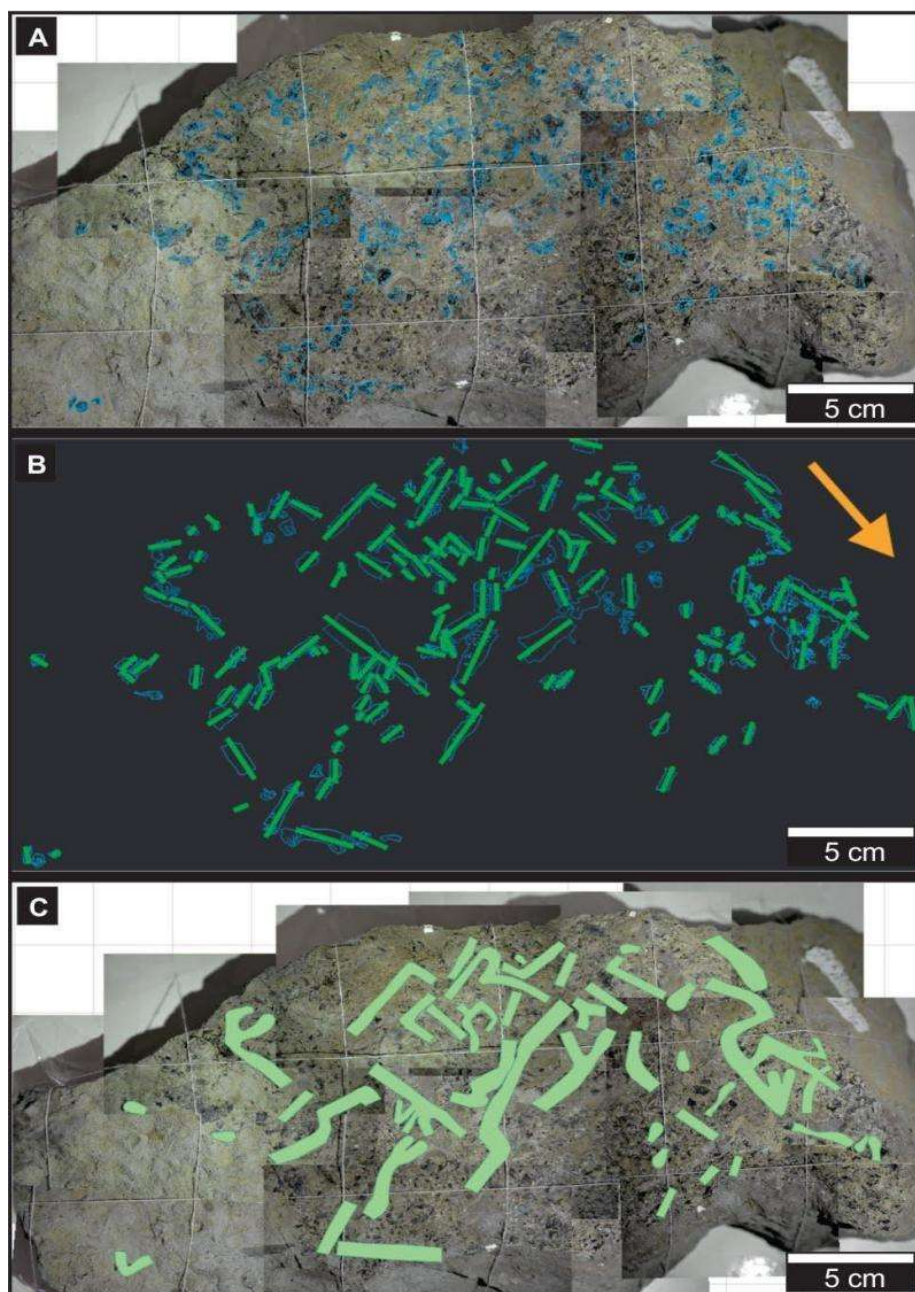


Figura 8. A: primeiro tratamento realizado, onde pode-se ver os quadrantes na amostra, bem como os fitofósseis presentes destacados em azul (Dimensões: 14,7 cm de altura e 32,5 cm de comprimento); **B:** segundo tratamento realizado, quando os fitofósseis foram isolados e avaliados individualmente, sendo a seta laranja indicando o Norte geográfico e as barras em verde os talos de *S. nanum*; **C:** terceiro tratamento realizado, quando foi possível reconstituir os fitofósseis, sobrepostos à amostra.

As figuras 8B e 9A foram geradas a partir da contagem do número de fragmentos com dimensões a partir de 0,5 mm, onde de detalhes dos talos de *S. nanum* já são possíveis de serem observados no microscópio. Foram contabilizados 162 fragmentos de *S. nanum*, distribuídos em 4 quadrantes predeterminados (Figuras 9A-B). Junto das medidas, foram tomadas as direções em que cada fragmento está orientado, categorizando-os em A-D ou em B-C (de acordo com figura 9B).

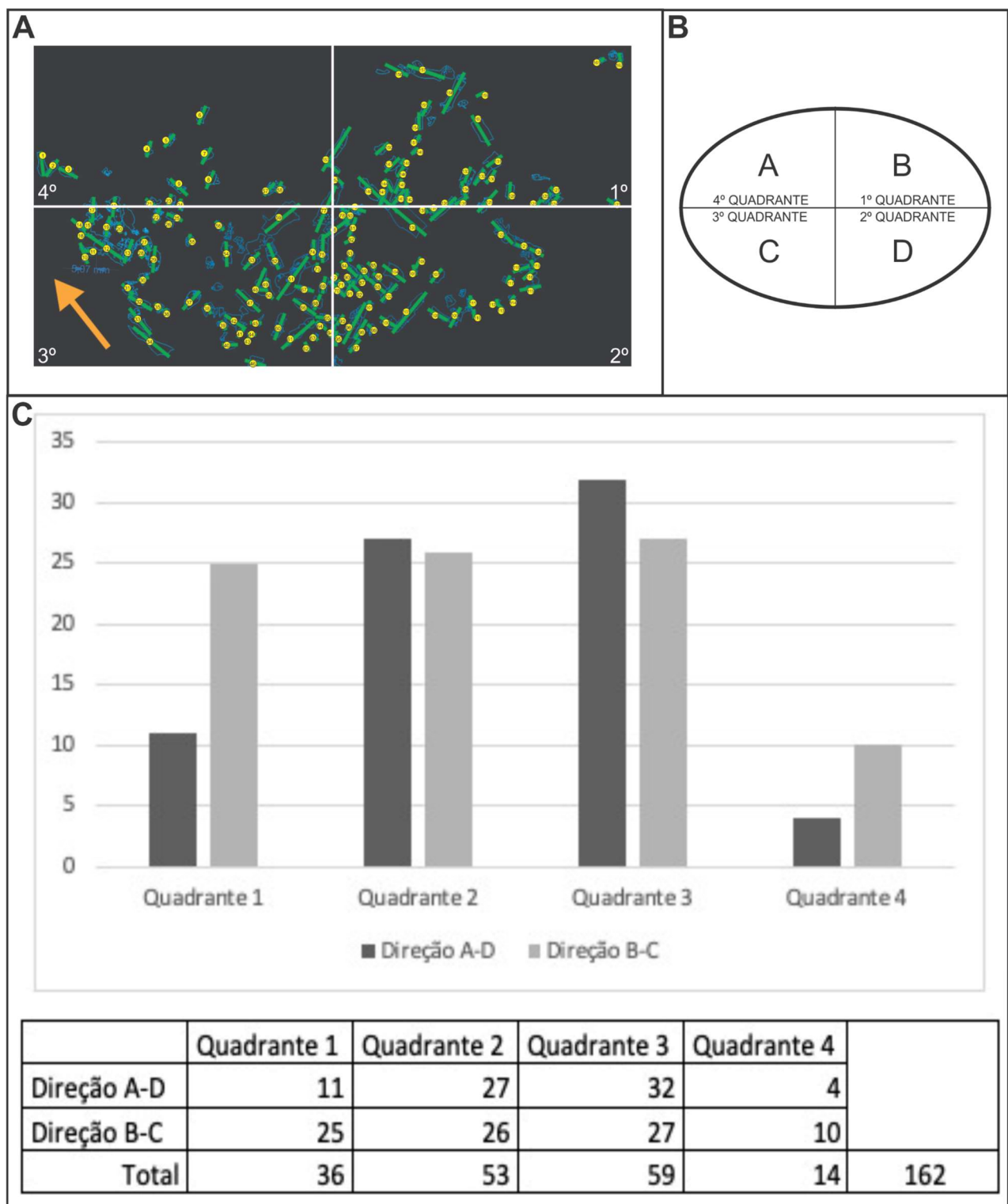


Figura 9. A: Representação de como a amostra foi dividida, sendo estabelecidos 4 quadrantes. A seta laranja indica o Norte geográfico e as barras em verde os talos de *S. nanum*; **B:** Representação das direções em que os fragmentos podem estar orientados na amostra; **C:** Proporção de fragmentos para cada quadrante, levando em consideração a direção em que estão orientados.

Com os dados apresentados na figura 9C, fica mais claro observar a maneira que os fragmentos estão distribuídos na amostra. A proporção de fragmentos com orientação A-D

em relação aos fragmentos com orientação B-C são maiores nos quadrantes 2 e 3. Essa proporção se inverte nos quadrantes 1 e 4, onde há mais fragmentos com orientação B-C.

A figura 10A-E traz dados mais detalhados sobre a distribuição dos fragmentos e sua orientação, levando em consideração a medida de cada um dos talos de tamanhos consideráveis (maior que 0,5 mm de comprimento), categorizando-os em pequeno (P), médio (M) e grande (G). Talos com dimensões entre 0,5 e 1,5 mm foram categorizados como pequenos; aqueles com medidas entre 1,6 e 3 mm foram considerados como médios; e aqueles maiores que 3 mm foram incluídos na categoria grande.

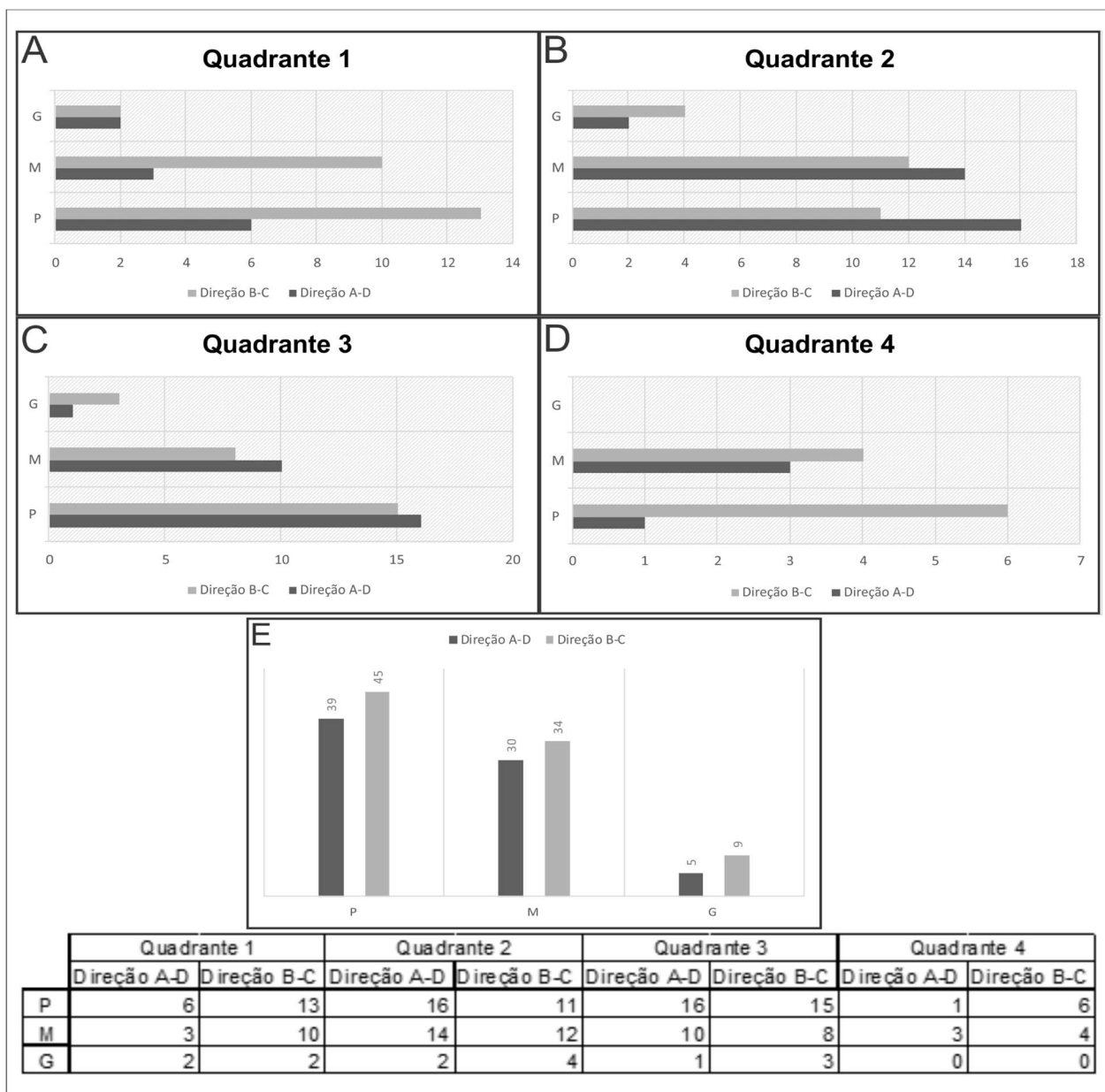


Figura 10. A-D: Proporção de fragmentos por quadrante levando em consideração o tamanho dos fragmentos e a direção em que estão orientados. **E:** Proporção entre os tamanhos dos fragmentos de acordo com a direção em que estão orientados. Legenda: *P* - pequeno (fragmentos com 0,5 a 1,5 mm de comprimento); *M* - médio (fragmentos com 1,6 a 3 mm de comprimento); *G* - grande (fragmentos maiores que 3 mm de comprimento).

Foram contabilizados 14 fragmentos grandes, representando aproximadamente 8,6% do total de fragmentos na amostra. Analisando a figura 10A-E, é possível notar uma maior distribuição de fragmentos médios nos quadrantes 1, 2 e 3. Há também uma tendência desses fragmentos maiores que 3 mm em estarem orientados na direção B-C (Figura 10E). Para a categoria de tamanho médio, foram contabilizados 64 fragmentos, representando cerca de 39,5% do total de fragmentos na amostra. De modo geral, não houve maior ou menor propensão de orientação para os fragmentos de tamanho médio. Porém, analisando os quadrantes separadamente, houve uma tendência de orientação B-C nos quadrantes 1 e 4, enquanto nos quadrantes 2 e 3, a maioria dos fragmentos médios estão orientados na direção A-D. Por fim, foram quantificados 84 fragmentos pequenos, representando aproximadamente 51,9% do total de fragmentos contabilizados na amostra. Há uma tendência geral de orientação na direção B-C desses fragmentos menores. Os fragmentos desta última categoria estão em maiores quantidades em todos os quadrantes, com exceção do quadrante 4, onde apresenta a mesma proporção dos fragmentos médios. Os fragmentos pequenos orientados na direção B-C estão mais presentes no quadrante 1 e 4, enquanto os orientados na direção A-D estão em maiores quantidades nos quadrantes 2 e 3, com ligeira diferença neste último.

Com as imagens topográficas produzidas no microscópio eletrônico de varredura (Figuras 11 e 12), foi possível mensurar as dimensões dos poros presentes na superfície das cutículas e notar uma variação no formato dos mesmos. Alguns poros apresentam um formato circular enquanto outros apresentam forma mais ovalada (Figuras 13) e não há um padrão métrico de distanciamento um dos outros. As dimensões desses poros variam de 100 a 120 μm de diâmetro.

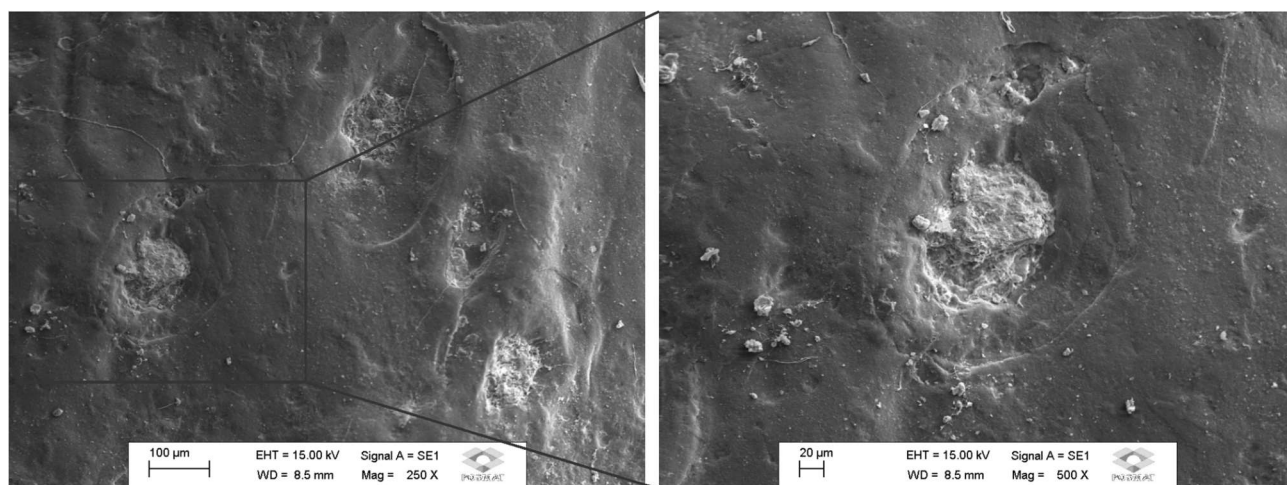


Figura 11. Imagens topográficas do espécime 1 de *Spongiophyton nanum*, com poros preenchidos pela matriz rochosa, geradas em MEV.

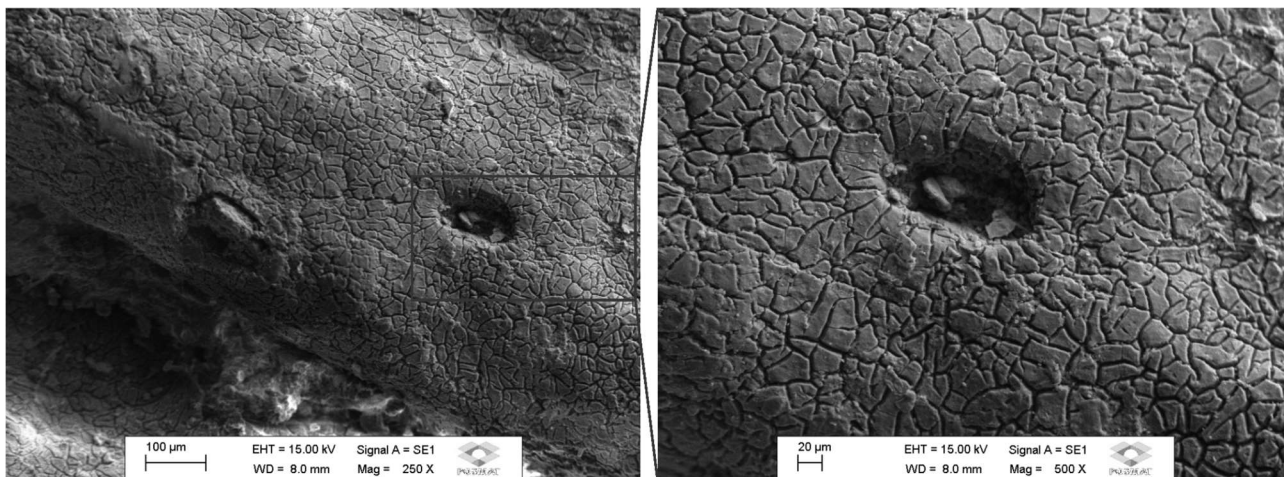


Figura 12. Imagens topográficas do espécime 2 de *Spongiophyton nanum*, com poros “vazios” (não preenchidos pela matriz rochosa), geradas em MEV.

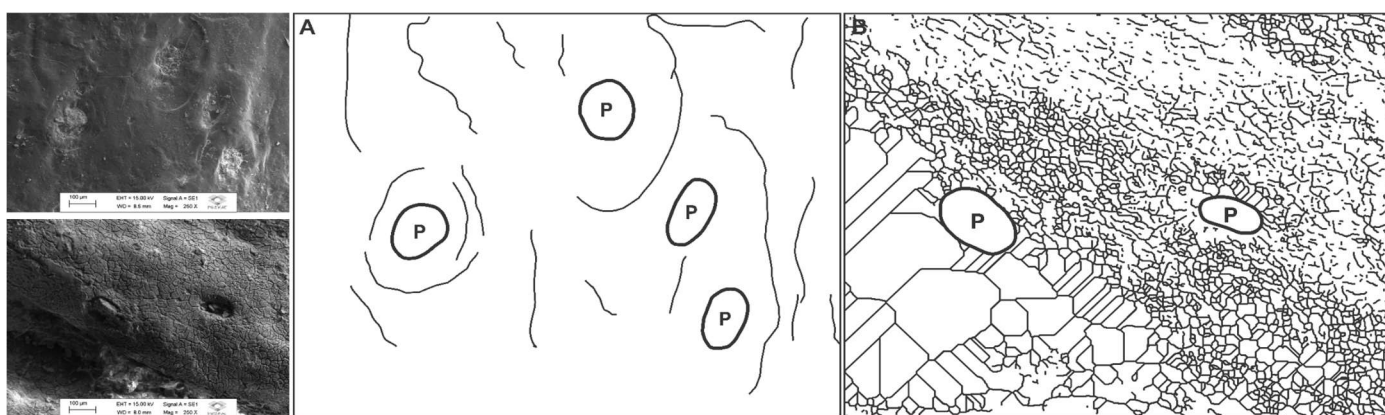


Figura 13. Contornos realizados sobre a morfologia detalhada dos espécimes de *Spongiophyton nanum* em MEV. É possível notar a variação no formato dos poros (*P*) em formas circulares a ovais. **A.** Redesenho realizado sobre o espécime 1 (com poros preenchidos pela matriz rochosa). **B.** Redesenho realizado sobre o espécime 2 (poros não preenchidos pela matriz rochosa). Abreviações: *P* = poros.

- ***Haplostigma***

O caule de *Haplostigma* aqui estudado possui aproximadamente 8 cm de comprimento e apresenta coloração acinzentada e marrom. Cicatrizes foliares estão distribuídas ao longo do caule seguindo um curso helicoidal ao longo do ramo, apresentando uma filotaxia alterna-espiralada (Figuras 14 e 15).



Figura 14. Detalhamento do espécime de *Haplostigma*. As cicatrizes foliares, com formas circulares, se distribuem de maneira regular pelo caule.

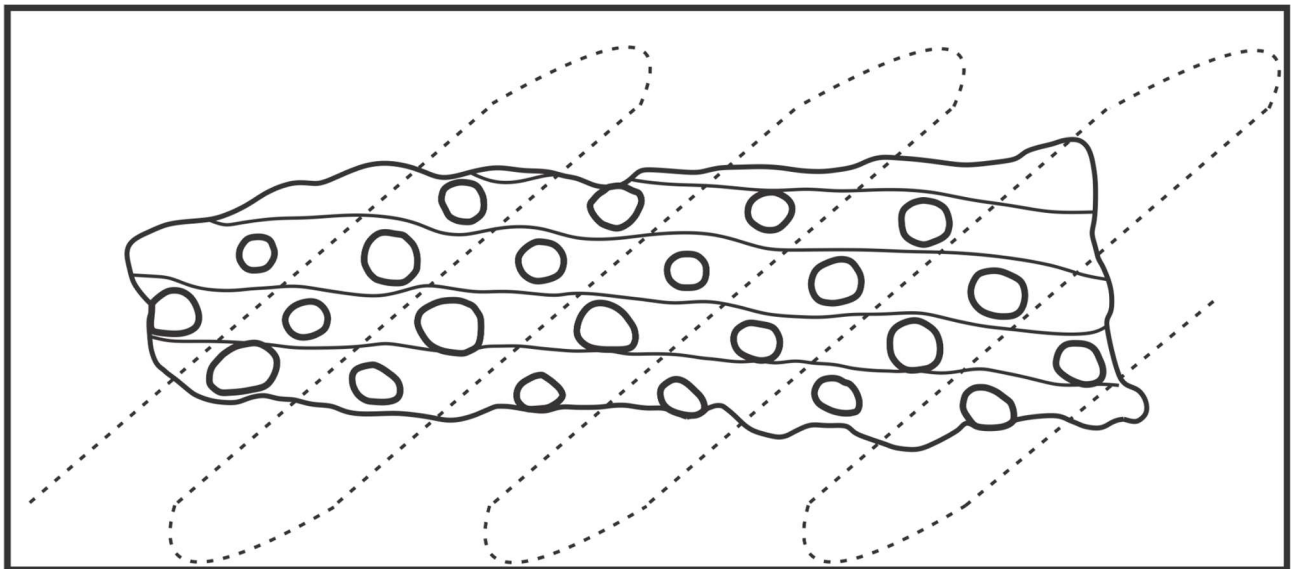


Figura 15. Contornos realizados sobre a morfologia de *Haplostigma*. A reconstrução destaca o formato circular das cicatrizes foliares e a distribuição em espiral pelo caule seguindo um sentido helicoidal, refletindo a filotaxia alterna-espiralada desses caules fósseis.

As imagens topográficas focando em umas das cicatrizes foliares de *Haplostigma* produzida em MEV (Figura 16) permite uma mensuração e observação mais robustas das cicatrizes foliares. Nela, é possível observar que essas cicatrizes possuem formato circular e apresenta dimensões de aproximadamente 1500 μm de diâmetro, relativamente grande se comparado com as dimensões dos poros cuticulares de *S. nanum*.

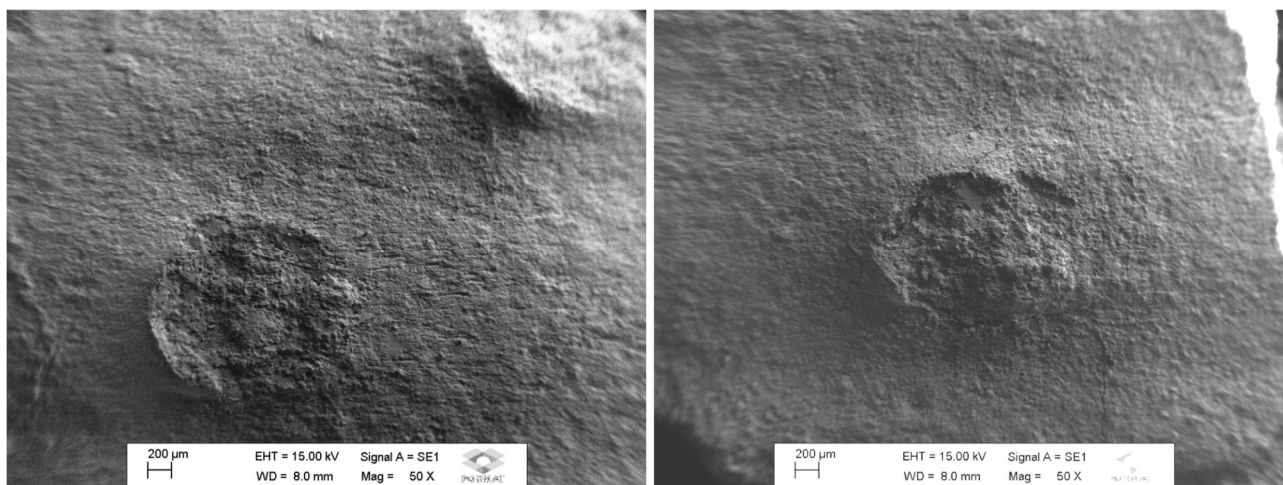


Figura 16. Imagens topográficas de cicatrizes foliares de *Haplostigma* geradas em MEV, destacando o formato circular.

- ***Palaeostigma***

Não foi possível obter imagens microscópicas de alta resolução para o espécime de *Palaeostigma* pois o mesmo estava com baixo nível de preservação e foi submetido à análise em FTIR, que é um método analítico destrutivo. Ainda, o material se encontrava em um grau de fragilidade que impedia a separação da cutícula da matriz rochosa a que estava associada sem que houvesse comprometimento da integridade do material. Para realizar a análise em FTIR, foi necessário um processo de purificação da amostra, onde foram removidas quaisquer partículas sedimentares da matriz rochosa, para que somente a cutícula macerada fosse analisada quimicamente.

Na imagem em estereomicroscópio (Figura 17), é possível notar o baixo grau de integridade da cutícula fóssil. O espécime possui aproximadamente 3,7 cm de comprimento e 0,8 a 1 cm de largura. Pode-se notar a presença de poros ao longo da extensão da cutícula, mas como não foi possível gerar uma imagem de alta definição em MEV, os detalhes dos poros e sua distribuição não puderam ser observados e descritos.

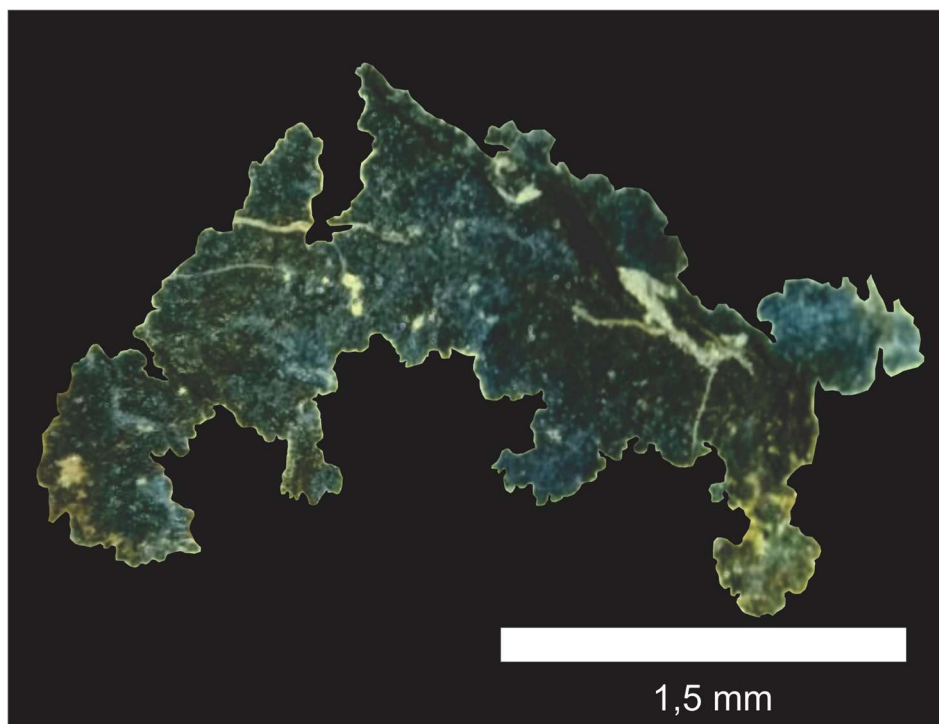


Figura 17. Detalhamento do espécime de *Palaeostigma*. É possível notar o baixo grau de integridade da cutícula preservada.

5.2) Estudos químicos

5.2.1) Análises em EDS

- ***Spongiophyton nanum***

Os principais resultados obtidos em MEV/EDS podem ser consultados no artigo submetido “Devonian macroflora and elementary characterization of the *Spongiophyton nanum* Kräusel emend. Chaloner *et al.* 1974 from the North-Northwest flank of the Paraná Basin” (Disponível no apêndice A).

No mapeamento elementar apresentado pela Figura 18, é possível diferenciar a intensidade na qual os elementos estão distribuídos pela superfície do fitofóssil (espécime 1) e da matriz rochosa que se encontra na região dos poros. O carbono é o único elemento que se restringe somente à área da cutícula. O alumínio, cálcio, ferro, silício e oxigênio estão presentes tanto na cutícula quanto na matriz rochosa, apresentando uma intensidade maior nesta última.

Na Figura 19, é possível somente observar os elementos distribuídos pela superfície da cutícula vegetal do espécime 2, uma vez que os poros do espécime estudado não estão preenchidos pela matriz da rocha. Dessa forma, pode-se observar somente os elementos distribuídos pela cutícula, não havendo diferenças significativas de intensidade de cores na região da cutícula e da região dos poros.

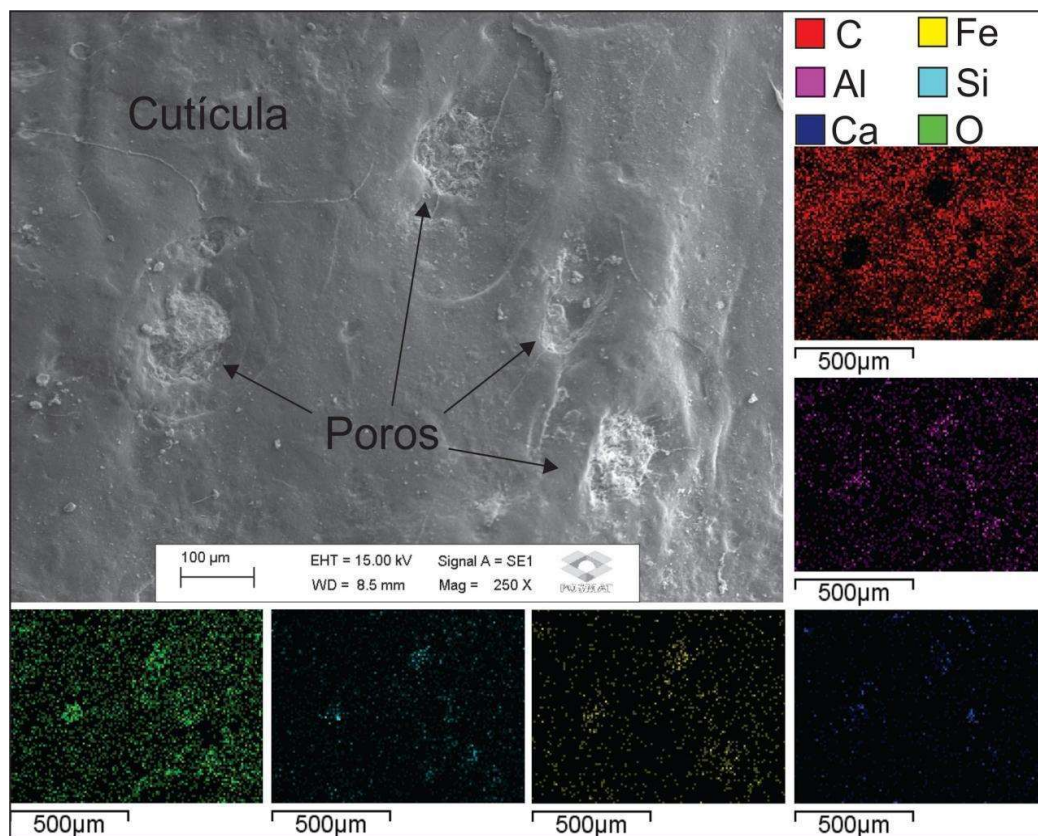


Figura 18. Mapeamento elemental de um espécime de *S. nanum*. Símbolos: C = carbono; Al = alumínio; Ca = Cálcio; Fe = ferro; Si = silício; O = oxigênio.

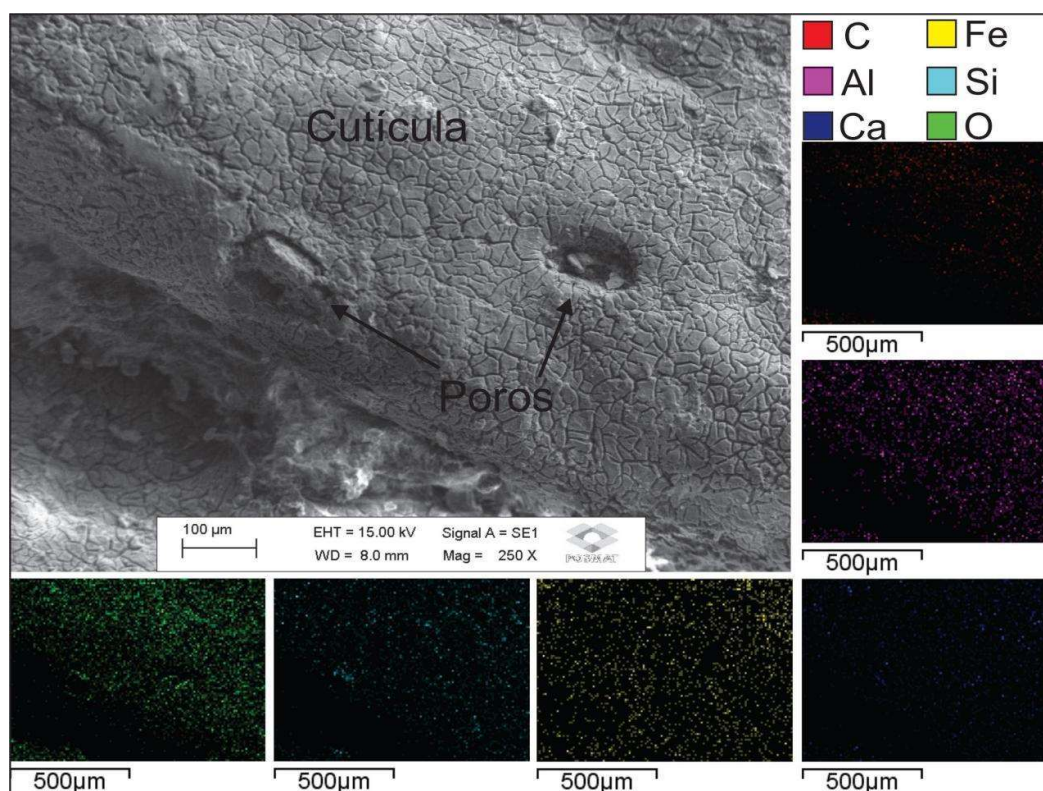


Figura 19. Mapeamento elemental de um espécime de *S. nanum*. Símbolos: C = carbono; Al = alumínio; Ca = Cálcio; Fe = ferro; Si = silício; O = oxigênio.

- **Haplostigma**

Por se tratar de uma impressão, não foi viável a realização de uma análise elementar via EDS nem a tentativa de identificar grupamentos químicos via FTIR nessa amostra, dados que não há resquício de preservação da matéria orgânica. Portanto, não há dados adicionais além daqueles já citados e relacionados às imagens topográficas desta amostra.

5.2.2) Análises em FTIR

- **Spongiophyton nanum**

O espectro obtido na análise de *S. nanum* em FTIR (Figura 20) revela uma larga banda entre entre 3200 cm^{-1} e 3600 cm^{-1} , picos de baixa intensidade em 2920 cm^{-1} e em 2855 cm^{-1} e no intervalo entre 1830-1630 cm^{-1} e picos de intensidade um pouco maiores próximo a 1450 cm^{-1} .

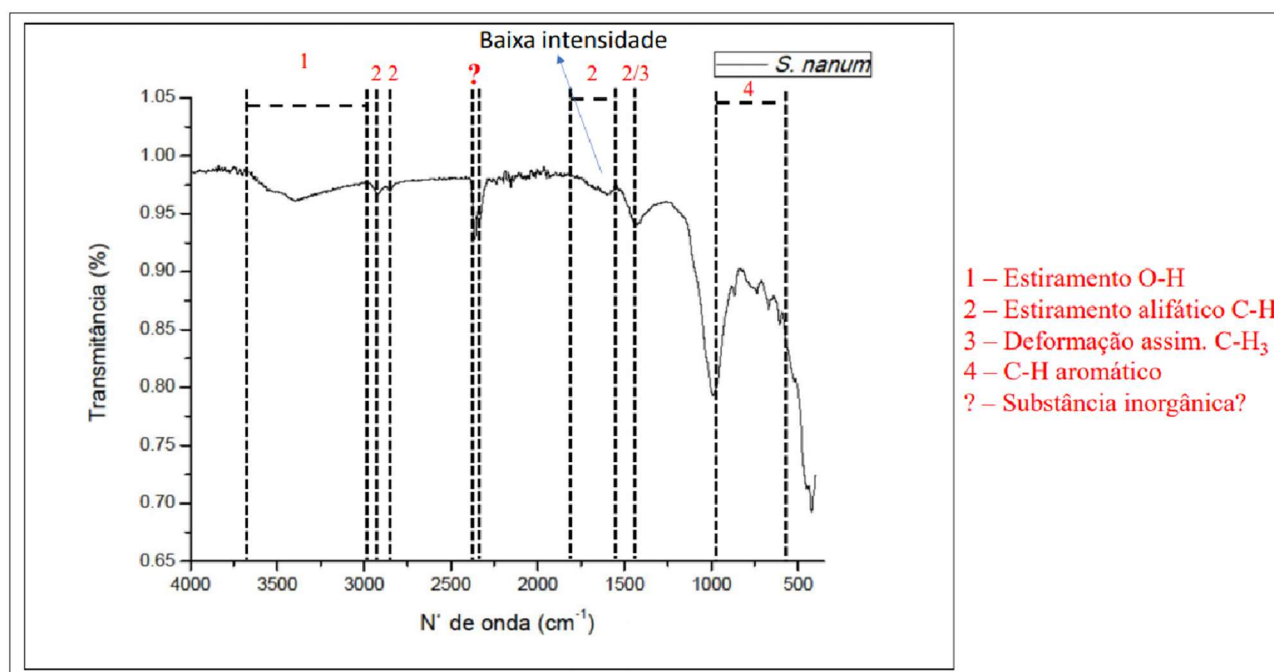


Figura 20. Espectros FTIR obtidos na região 4000-400 cm^{-1} para *Spongiophyton nanum*. Os grupos químicos estão enumerados e a legenda se encontra na borda direita da imagem.

- **Palaeostigma**

Observando o espectro obtido na análise de *Palaeostigma* em FTIR (Figura 21), é possível observar que não há presença de picos na região de alto número de ondas. E tanto no espectro de *S. nanum* quanto de *Palaeostigma*, há uma sequência de picos de alta intensidade entre 900 e 700 cm^{-1} .

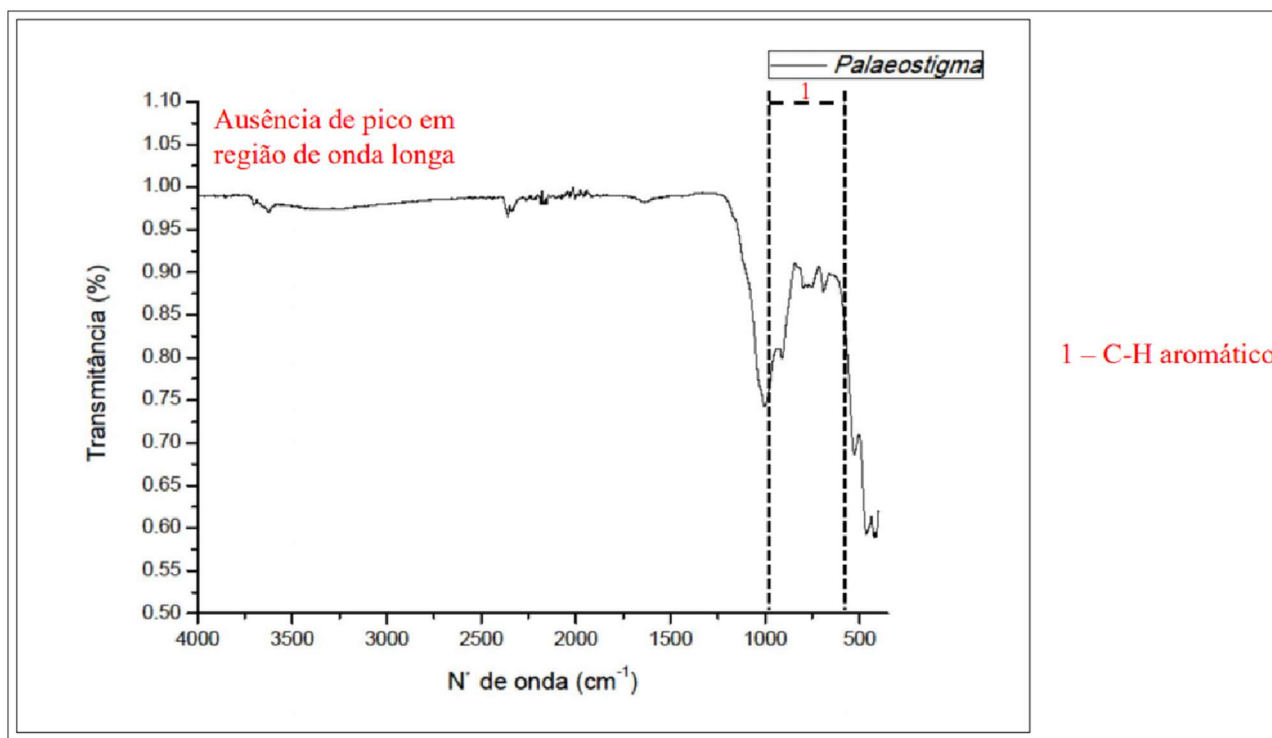


Figura 21. Espectros FTIR obtidos na região 4000-400 cm^{-1} para *Palaeostigma*. Os grupos químicos estão enumerados e a legenda se encontra na borda direita da imagem.

6) DISCUSSÃO

Observando as imagens produzidas com o estereomicroscópio (Figuras 6 e 7), não há quaisquer indícios de uma estrutura orgânica que não seja compatível com as descrições de Kräusel (1954), Chaloner *et al.* (1974) e de Guerra-Sommer (1993) para a espécie *S. nanum*, apresentando geralmente um formato talóide e uma superfície recoberta por poros, característicos do gênero *Spongiophyton*. O talo cilíndrico, com alguns registros de dicotomia, e a presença de poros em apenas uma das faces são padrões de *Spongiophyton nanum*. A reunião desses dados reforça o registro monoespecífico determinado por Matsumura *et al.* (2017) e Vieira *et al.* (2018) para este material. Apesar de uma das estruturas vegetais presentes na rocha não ter apresentado a superfície recoberta por poros (Figura 7B), uma de suas extremidades apresentou uma dicotomização, característica de *Spongiophyton*, principalmente de *S. nanum*, sendo, portanto, insuficiente para inferir a presença de mais de um gênero ou espécie na amostra.

Segundo Guerra-Sommer (1993), as associações fósseis contendo exemplares de *Spongiophyton* estão associadas a regiões muito próximas da costa, com sequências arenosas intercaladas com bancos de areia. Esses organismos foram possivelmente preservados em condição hipoaútóctone, pois o grau de fragmentação dos talos na amostra indica ocorrência de transporte desde seu ambiente de vida, mas a posição plano-paralela

em que foram encontrados os espécimes dá indício de que não foram encontrados longe de seu hábitat de vida, uma vez que possuíam hábito rastejante.

O registro monoespecífico também pode indicar uma ausência de retrabalhamento, uma vez que, sob esse processo, aumenta-se a probabilidade de preservação de mais espécies no pacote sedimentar, o que não ocorre na amostra estudada. Assim, pode ser um outro indício de baixo grau de *time-averaging*. Além disso, foram encontrados apenas estruturas com o mesmo grau de resistência, não havendo a presença de estruturas com resistências discrepantes ou com exigências ambientais excludentes, reforçando a ausência de ocorrência de mais de um evento de sedimentação e um baixo grau de *time-averaging*.

No entanto, há também a possibilidade de ter ocorrido uma seleção hidráulica, dado que, além das evidências de um ambiente altamente energético para esses organismos, as plantas possuem alta fluviabilidade. Essa seleção pode ter favorecido a preservação dessas plantas, excluindo outras que viviam no ambiente. Porém, isso não refuta a conclusão de um baixo *time-averaging* na amostra, uma vez que isso significaria somente a exclusão de elementos que faziam parte do cenário paleoambiental e não uma mistura temporal/espacial.

Segundo Neregato e Iannuzzi (2017), a baixa mistura temporal da associação fóssil deve-se à ocorrência de uma elevada taxa de deposição dos sedimentos, comum em ambientes de alto potencial energético, para a sua formação, impedindo assim um acúmulo de organismo maior do que o acúmulo de sedimentos.

A concentração dos fitofósseis mostrou ser fracamente empacotada, possuindo, por vezes, concentrações esparsas dos mesmos. As figuras 9A-C e 10A-E evidenciam maior concentração dos fragmentos nos quadrantes 2 e 3. Isso reflete um ambiente de alta energia, que levou ao transporte e ao consequente afastamento entre os espécimes durante a deposição de sedimentos. Outros indícios de ambiente potencialmente energético são o grau de fragmentação dos talos de *S. nanum*, a ausência de orientação em que os fragmentos estão direcionados e ausência de preferência azimutal de distribuição pelas estruturas taloides (Figura 8B). Guerra-Sommer *et al.* (1990) estudaram espécimes de *Spongiophyton* com dimensões entre 2 a 4 cm, o que indica que o material aqui estudado se encontra com elevado grau de dissociação, uma vez que o maior fragmento encontrado na amostra possui 5 mm de comprimento. Ainda, cerca de 51,9% dos fragmentos contabilizados estão na categoria de tamanho pequeno, ou seja, estão entre 0,5 e 1,5 mm

de comprimento. Esse alto nível de fragmentação dos talos seria decorrente de um transporte favorecido por um ambiente de alta energia.

A ausência de direção na qual os fragmentos estariam orientados e sua distribuição pela amostra seria consequência de fluxos oscilatórios ou turbulentos, recorrentes em ambientes de alta energia. As figuras 9A-C e 10A-E evidenciam que não houve uma tendência significativa de orientação desses talos fragmentados. Essa tendência de orientação varia minimamente de acordo com o tamanho dos fragmentos (Figura 10A-E), concordando com Rex e Chaloner (1983), que apontaram a influência do ângulo em que os espécimes fósseis estão fragmentados no grau de fratura e integridade do material. Os fragmentos pequenos e grandes apresentaram tendência de orientação na direção B-C, enquanto a orientação dos fragmentos de tamanho médio apresentou maior propensão em seguir a direção A-D. Portanto, a dimensão dos talos, além da energia do ambiente, parece exercer influência sobre a direção em que estão orientados. Não há evidências de influência do tamanho dos fragmentos em sua distribuição, uma vez que não houve diferenças significativas entre o total de fragmentos de determinada categoria de tamanho e sua representatividade nos diferentes quadrantes, com apenas uma exceção dos fragmentos grandes, que não estiveram presentes no 4º quadrante (Figura 10D).

No entanto, a falta de orientação também poderia revelar um ambiente de baixa energia, onde não há força suficiente atuando nesses organismos de modo que eles apontem para uma mesma direção. Ainda, esses fragmentos foram encontrados em camadas de siltitos com estratificação plano-paralela bioturbados, que indicam ambientes de baixa energia (WALKER, PLINT, 1992). Essas camadas intercalam com arenitos com estratificação cruzada tabular e lentes de conglomerados monomíticos, que indicam ambiente potencialmente energético (WALKER, PLINT, 1992; CHAVES, SVISERO, 1993).

Portanto, a partir da amostra de *Spongiophyton nanum*, há indícios de dois tipos de ambientes com potenciais energéticos distintos. No entanto, é possível justificar essa divergência relacionando os fragmentos de *S. nanum* com a seção estratigráfica elaborada por Ribeiro *et al.* (2019). Embora os restos de *S. nanum* tenham ocorrido em camadas de siltitos cujos sedimentos teriam se depositados em ambiente de baixo potencial energético, essas camadas intercalam com conglomerados que teriam se formado em ambiente de alta energia. Assim, a fragmentação dos indivíduos de *S. nanum* teria ocorrido em decorrência de um ambiente potencialmente energético, porém teriam sido depositados durante um período de calmaria, com baixo potencial energético, juntamente aos sedimentos de silte.

Ainda, baseando-se nos pacotes heterolíticos identificados por Ribeiro *et al.* (2019) para a região de estudo, esses organismos vegetais estariam vivendo em região costeira (GUERRA-SOMMER, 1993), sobre uma plataforma deltaica e com ocorrência de rompimentos de diques marginais. Assim, a fragmentação desses organismos teria ocorrido durante rompimentos de diques marginais que levaram à submersão desses organismos costeiros e proporcionado fluxos turbulentos e potencialmente energéticos que levaram à morte e posterior dissociação dos corpos talóides, e a deposição teria ocorrido durante o período de complacência que se seguiu após os rompimentos desses diques.

Com os desenhos produzidos e representados na figura 8C, é possível especular que os espécimes não se tratam de fragmentos aleatórios de indivíduos distintos, mas de um mesmo (ou de poucos) organismo que foi fragmentado durante o possível processo de rompimentos de diques marginais e dos consequentes eventos deposicionais.

Um dos principais destaques obtidos nas análises das amostras de *Spongiophyton nanum* em EDS foi a identificação do carbono como um remanescente da matéria orgânica original. Outro destaque foi a identificação do processo de fossilização envolvido na preservação dessas cutículas. As mesmas teriam sido preservadas por incarbonização, quando os elementos mais voláteis que compõem essas estruturas se dissipam para a atmosfera por conta do aumento da temperatura, de modo que reste apenas o elemento carbono em sua composição. Ainda, os principais componentes elementares das cutículas de *S. nanum* são o carbono, o oxigênio e o cálcio. Chaloner *et al.* (1974) encontraram valores similares para estes elementos ao estudarem uma amostra de *Spongiophyton nanum* proveniente do Devoniano Médio de Gana, portanto, abre possibilidade do EDS como via de validação taxonômica. Por fim, a presença de silício em todas as amostras, e com maiores intensidades na matriz rochosa, é um indício de que uma plataforma siliciclástica teria sido o tipo de ambiente para a formação e vida desses organismos fósseis (ZABINI, 2007), concordando com Bosetti e colaboradores (2010), que apontaram que os folhelhos devonianos da Paraná são compostos por sedimentos siliciláticos.

No artigo “Devonian macroflora and elementary characterization of the *Spongiophyton nanum* Kräusel emend. Chaloner *et al.* 1974 from the North-Northwest flank of the Paraná Basin” (Apêndice A), é possível consultar uma discussão mais aprofundada sobre os resultados obtidos nessas análises, assim como os dados semiquantitativos dos elementos que compõem as cutículas aqui analisadas.

As figuras 18 e 19 mostram o mapeamento elementar realizado no MEV/EDS com 2 fragmentos de *S. nanum*. Foi possível observar a intensidade na qual os elementos estão

distribuídos pela superfície dos fitofósseis e da matriz rochosa. Os dados semiquantitativos (presentes no texto do Apêndice A) são fielmente representados por estes “mapas”, uma vez que as maiores porcentagens elementares estão associadas a uma coloração mais intensa nos mapas elementares. O carbono foi o único elemento que apresentou uma coloração mais intensa na região da cutícula em relação à área da matriz rochosa.

Quanto às análises das amostras de *S. nanum* e de *Palaeostigma* em FTIR, os resultados evidenciaram semelhanças no posicionamento dos picos na análise de ambos os táxons (Figuras 20 e 21), porém com diferenças em níveis de intensidade, principalmente quando comparados os padrões de espectros de *S. nanum* obtidos neste trabalho com os relatados por Matsumura, Balzaretto e Iannuzzi (2016) e Matsumura *et al.* (2018).

Tais similaridades podem indicar preservação da matéria orgânica original uma vez que o espécime de *S. nanum* deste trabalho é proveniente de uma unidade geológica de idade possivelmente distinta daquela em que as amostras de *S. nanum* estudadas por Matsumura, Balzaretto e Iannuzzi (2016) foram encontradas. A amostra utilizada no presente estudo foi coletada em rocha aflorante da unidade 3 do Grupo Chapada, com idades do Neoemiliano-Eifeliano (Grahns *et al.*, 2010), enquanto as amostras de *S. nanum* analisadas por Matsumura, Balzaretto e Iannuzzi (2016) foram coletadas em afloramento pertencente à porção superior da Formação São Domingos, cuja idade não transpassa os limites do Devoniano Médio. Uma datação mais precisa desses materiais é necessária para que pudesse afirmar se houve ou não uma preservação da matéria orgânica original.

Apenas o espécime de *S. nanum* apresentou picos em 2920 cm^{-1} e em 2855 cm^{-1} (Figura 20) que, somados à ausência de forte pico dentro do intervalo $1830\text{-}1630\text{ cm}^{-1}$, indicam uma possível presença de estiramento alifático entre carbono e hidrogênio. Ainda, a presença de picos próximos a 1450 cm^{-1} sustenta provável deformação assimétrica de CH_3 . Estes picos, não estando presentes em *Palaeostigma* (Figura 21), inicialmente poderiam reforçar uma diferença genérica entre os vegetais analisados, assim como foi demonstrado por Matsumura *et al.* (2018). No entanto, as amostras são de unidades geológicas distintas, de modo que possa ter ocorrido uma influência diagenética que gerou essa diferença de picos, ainda mais levando em consideração a possível diferença de idade e de exposição a diferentes fatores ambientais. Assim, não é possível afirmar, portanto, a viabilidade do uso do FTIR em caracterização e separação taxonômicas por meios deste estudo.

O espécime de *S. nanum* também apresentou larga banda entre 3200 cm^{-1} e 3600 cm^{-1} , indicando possível estiramento de oxigênio ligado a hidrogênio (hidroxila), fornecendo

indício de preservação da cutina, uma vez que são macromoléculas que, junto das ceras cuticulares, compõem a cutícula e são caracterizadas pela abundante presença de hidróxi e hidróxi-epóxi ácidos graxos (BEISSON *et al.*, 2012), tendo assim grupos hidroxilas em sua composição. No entanto, não é possível afirmar com precisão de que se trata da matéria orgânica da cutina que foi preservada.

Tanto *S. nanum* quanto *Palaeostigma* apresentaram uma sequência de picos entre o intervalo 900–700 cm⁻¹, indicando possíveis vibrações de CH aromático fora do plano. O espécime de *Palaeostigma* não apresentou picos na região de alto número de ondas, não havendo dados que sustentem a presença de estiramento de oxigênio ligado a hidrogênio em sua composição e, portanto, não reproduzindo o padrão esperado para esse táxon, visto que Matsumura *et al.* (2018) registraram a presença de grupos funcionais na região de alto número de ondas (3000-2800 cm⁻¹). Esta ausência pode refletir um processo breve de oxidação diagenética, uma vez que que grupos funcionais dessa região são mais influenciados pela oxidação diagenética precoce do que os grupos funcionais da região de baixo número de onda (BERNER, 1980; ZODROW, MASTALERZ, 2009; ZODROW *et al.* 2012) ou ser um fator inerente à amostra de *Palaeostigma*.

Comparando os espectros de *Spongiophyton nanum* obtidos em FTIR com espectros de líquens e briófitas (Anexos C, D e E), são observadas semelhanças com ambos os grupos. Diferentes espécies de líquens atuais já apresentaram pico de banda longa entre 3000 e 3500 cm⁻¹, assim como um pico de menor intensidade próximo a 3000 cm⁻¹ (SRIVIBOON *et al.*, 2014) (Anexo C). O mesmo também foi identificado em estudo realizado com espécies de briófitas atuais (HU, JIN, CHENG; 2011; MAKSIMOVA *et al.*, 2013) (Anexos D e E). De maneira geral, todos os picos apresentados na análise de *S. nanum* estão presentes nos espectros obtidos tanto para espécies de líquens quanto para espécie de briófitas. No entanto, é possível notar uma maior similaridade entre os espectros de *S. nanum* com os espectros obtidos para *Relicina abstrusa* e *Cladonia submultiformis*, que são espécies liquênicas. Nota-se que em *S. nanum* há somente um pico entre 1000 e 1500 cm⁻¹, similar ao que ocorre nestas duas espécies, principalmente no espectro de *C. submultiformis*. Embora essas análises possam trazer discussões taxonômicas, ainda se faz necessária a realização de mais trabalhos sobre caracterização química de organismos liquênicos e briófitos (fóssil e atual) a partir dessa técnica para que possa se estabelecer um padrão químico que poderá ser utilizado para futuras classificações taxonômicas através de métodos comparativos.

No geral, é possível afirmar a preservação de matéria orgânica em ambas as amostras, pois os picos identificados nos espectros são de elementos formadores de compostos orgânicos, como o carbono e o hidrogênio. Essa afirmação torna-se ainda mais válida se levarmos em consideração a identificação dos elementos carbono e oxigênio nas análises realizadas em EDS.

Relação morfologia e paleoclima e influência da latitude

A filotaxia é uma característica arquitetônica importante na captação de luz e apresenta uma diversificação dentro dos táxons vegetais. Uma hipótese para a diversidade nesse padrão de disposição foliar baseia-se na intensidade da exposição ao sol, sendo que a tolerância a essa exposição varia entre táxons (REECE *et al.*, 2015). Com isso, a filotaxia proporciona às folhas maior ou menor exposição ao sol de acordo com a tolerância dos vegetais. Segundo Niklas (1988), folhas que se arranjam em espirais ao longo do caule podem otimizar a absorção da luz solar para fotossíntese.

As figuras 14 e 15 evidenciam a filotaxia alterna-espiralada do gênero *Haplostigma*, que teria se distribuído em áreas de média à alta latitude do Emsiano Final até o limite Givetiano/Frasniano Inicial, sob regimes climáticos frios (DI PASQUO *et al.*, 2009; MOISAN, NIEMEYER, KERP, 2011; MATSUMURA *et al.*, 2015; MATSUMURA, IANNUZZI, BOSETTI, 2015). Além do porte pequeno/médio e de seu rápido crescimento, como já apontados por Moisan, Niemeyer e Kerp (2011), a maneira que as folhas se distribuíam ao redor desses caules fósseis possibilitou a esses organismos um melhor aproveitamento da energia solar, e, portanto, maior tolerância a uma região climática fria a subártica, comuns em áreas de altas latitudes, onde há menor incidências dos raios solares.

Ocorrências de *Spongiophyton* e *Palaeostigma* já foram registradas juntamente de *Haplostigma* em rochas aflorantes da Formação São Domingos, Sub-bacia Apucarana (Devoniano da Bacia do Paraná) e que se encontravam em paleolatitudes entre 50° S e 60° S durante o Devoniano. Os sedimentos siliclásticos, evidenciados pela análise em EDS no presente estudo, teriam se depositado durante um regime climático temperado (BOSETTI *et al.*, 2010). O gênero *Spongiophyton* possui características que conferem maior tolerância a períodos sazonais de exposição solar decorrentes da regressão marinha, evento este relacionado a períodos de climas mais amenos. Segundo Guerra-Sommer (1993), a cutícula desses organismos é 4 vezes mais espessa que a cutícula de psilófitas primitivas, aumentando o potencial de retenção de água desses organismos em períodos de emersão e exposição solar. Portanto, um clima temperado com ocorrência de regressão marinha

ocorreu na borda noroeste da Bacia do Paraná durante o Emsiano Final-Eifeliano. Porém, são necessários estudos com enfoque na datação do material utilizado.

7) CONCLUSÕES

A filotaxia alterna-espiralada proporcionou ao gênero *Haplostigma* maior tolerância a climas mais frios. A maneira que as folhas se distribuíam ao redor desses caules fósseis possibilitou a esses organismos um melhor aproveitamento da energia solar, e, portanto, maior tolerância a uma região climática fria a subártica, comuns em áreas de altas latitudes, onde há menor incidências dos raios solares.

O gênero *Spongiophyton* possui características que conferem maior tolerância a períodos sazonais de exposição solar decorrentes da regressão marinha, evento este relacionado a períodos de climas mais amenos. Segundo Guerra-Sommer (1993), a cutícula desses organismos é 4 vezes mais espessa que a cutícula de psilófitas primitivas, aumentando o potencial de retenção de água desses organismos em períodos de emersão e exposição solar. Desse modo, um clima temperado com ocorrência de regressão marinha ocorreu na borda noroeste da Bacia do Paraná durante o Emsiano Final-Eifeliano. Estudos palinológicos futuros poderão contribuir com dados de datação, confirmando a idade relativa da amostra de *S. nanum* e reforçando o período associado ao paleoclima e paleoambiente refletidos pelo material.

Os principais elementos que compõem as cutículas de *S. nanum* são o carbono e o oxigênio, sendo o carbono associado à preservação desses fitofósseis, uma vez que os elementos mais voláteis da matéria orgânica original da cutícula da planta foram dissipados para a atmosfera, restando apenas o carbono, que resulta em um processo de fossilização por carbonificação ou incarbonização.

A presença do silício, tanto nos talos de *Spongiophyton nanum* quanto na matriz rochosa do fóssil, também foi identificado em EDS e reflete uma plataforma siliciclástica como ambiente de formação e vida do organismo. Os sedimentos siliciclásticos teriam se depositado durante um regime climático temperado.

Os espécimes de *S. nanum* estudados neste trabalho foram possivelmente preservados em condição hipoautóctone, pois o grau de fragmentação dos talos na amostra indica ocorrência de transporte desde seu ambiente de vida, mas a posição plano paralela em que foram encontrados os espécimes dá indício de que não foram encontrados longe de seu hábitat de vida, uma vez que possuíam hábito rastejante. A reunião dos dados tafonômicos a partir da amostra de *S. nanum* infere um baixo grau de *time-averaging* na

amostra. No entanto, são necessárias outras amostras da região estudada para medir o grau de *time-averaging* para toda a seção a que está associada.

A ausência de direção na qual os fragmentos estão orientados e sua distribuição pela amostra seriam consequências de fluxos oscilatórios ou turbulentos, recorrentes em ambientes de alta energia. Porém, embora não haja preferência de orientação dos espécimes de *S. nanum*, é possível observar ligeira influência da fragmentação no sentido de direção em que os talos estão orientados.

A partir da amostra de *Spongiophyton nanum*, há indícios de dois tipos de ambientes com potenciais energéticos distintos. A fragmentação dos indivíduos de *S. nanum* teria ocorrido durante rompimentos de diques marginais que levaram à submersão desses organismos costeiros e proporcionado fluxos turbulentos e potencialmente energéticos que levaram à morte e posterior dissociação dos corpos talóides, enquanto a deposição desses restos teria ocorrido durante o período de complacência que se seguiu após os rompimentos desses diques.

As análises em FTIR não forneceram dados muito relevantes para o objetivo deste estudo. Porém, tanto nas cutículas de *S. nanum* quanto nas de *Palaeostigma* há elementos formadores de compostos orgânicos. Em conjunto com os resultados obtidos em MEV acoplado ao EDS, é possível afirmar uma preservação da matéria orgânica em ambos os materiais.

Análises em fluorescência de raios X (XRF), microfluorescência de micro raios X (μ -XRF) e em difração de raios X poderão integrar os resultados aqui obtidos, fornecendo informações sobre a origem mineralógica do material fitofossilífero, a origem dos elementos que o compõem, os processos envolvidos na fossilização dos fragmentos de *Spongiophyton nanum*, bem como o paleoambiente de vida desses organismos enigmáticos.

8) REFERÊNCIAS

- ANDERSON, J.M.; ANDERSON, H.M. **Palaeofloras of Southern Africa. Prodrum of South Africa megafloras, Devonian to lower cretaceous**. Rotterdam, Balkema, 1985.
- ANDRADE, S.; CAMARÇO, P.E.N. Estratigrafia dos sedimentos devonianos do flanco nordeste da Bacia do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 31º, 1980, Camboriú. **Anais**. Camboriú: Sociedade Brasileira de Geologia. 1980. p. 2828-2834.
- ASSINE, M.L. Fácies, icnofósseis, paleocorrentes e sistemas deposicionais da Formação Furnas no flanco sudeste da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, n. 3, p. 357-370, 1999.
- ASSINE, M.L. O Ciclo Devoniano na Bacia do Paraná e correlação com outras bacias Gondwânicas. **Série Ciência, Técnica, Petróleo. Seção Exploração de Petróleo**, Rio de Janeiro, p. 55-62, 2001.
- ASSINE, M.L.; PERINOTTO, J.A.L.J.; FULFARO, V.J.; PETRI, S. Progradação deltaica Tibagi no devoniano médio da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 2, p. 125-134, 1998.
- ASSINE, M.L.; SOARES, P.C.; MILANI, É.J. Sequências tectono-sedimentares mesopaleozóicas da Bacia do Paraná, Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, n. 2, p. 77-89, 1994.
- BEERLING, D.J.; OSBORNE, C.P.; CHALONER, W.G. Evolution of leaf-form in land plants linked to atmospheric CO₂ decline in the Late Palaeozoic era. **Nature**, v. 410, n. 6826, p. 352-354, 2001.
- BEISSON, F.; LI-BEISSON, Y.; POLLARD, M. Solving the puzzles of cutin and suberin polymer biosynthesis. **Current opinion in plant biology**, v. 15, n. 3, p. 329-337, 2012.
- BERGAMASCHI, S.; PEREIRA, E. Caracterização de seqüências deposicionais de 3ª ordem para o Siluro-Devoniano na Sub-bacia de Apucarana, Bacia do Paraná, Brasil. **Ciência-Técnica-Petróleo**, v. 20, p. 63-72, 2001
- BERNER, R.A. **Early diagenesis: a theoretical approach**. Princeton University Press, 241 pp. 1980.
- BERNER, R.A.; KOTHAVALA, Z. GEOCARB III: a revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time. **Am. J. Sci.**, v. 301, p. 182-204, 2001.
- BOLZON, R.T.; AZEVEDO, I.; ASSINE, M.L. Sítio Jaguariaíva, PR: invertebrados devonianos de grande importância paleobiogeográfica. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; QUEIROZ, E.T.; WINGE, M.; BERBERTORN, M.L.C. (Orgs). **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral & Serviço Geológico do Brasil, 2002. p.33-37.
- BOSETT, E.P.; HORODYSKI, R.S.; ZABINI, C.; MATSUMURA, W.M.K.; PENTEADO, A.C. Ocorrência de fenótipos subnormais no limite Neoeifeliiano/Eogivetiano, Tibagi, estado do Paraná: implicações tafonômicas e paleossinecológicas. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi-Ciências Naturais**, v. 5, n. 2, p. 135-149, 2010.
- BOSETTI, E.P.; GRAHN, Y.; HORODYSKI, R.S.; MAULLER, P.M. The first recorded decline of the Malvinokaffric Devonian fauna in the Paraná Basin (southern Brazil) and its cause; taphonomic and fossil evidences. **Journal of south American Earth sciences**, v. 37, p. 228-241, 2012.

- BOUREAU, M.E.; PONS, D. Sur des empreintes vegetales devoniennes du Sud de La Bolivie. **Compte Rendus de l'Académie Sciences de Paris**, Série D, v. 276, p. 2151–2153, 1973.
- BURNHAM, R.J.; SPICER, R.A. Forest litter preserved by volcanic activity at El Chichon, Mexico; a potentially accurate record of the pre-eruption vegetation. **Palaos**, v. 1, n. 2, p. 158-161, 1986.
- BURNHAM, R.J.; WING, S.L.; PARKER, G.G. The reflection of deciduous forest communities in leaf litter: implications for autochthonous litter assemblages from the fossil record. **Paleobiology**, p. 30-49, 1992.
- BURNHAM, R.J. Reconstructing richness in the plant fossil record. **Palaos**, v. 8, n. 4, p. 376-384, 1993.
- CARBONARO, F.A.; GHILARDI, R.P. Fósseis do Devoniano de Goiás, Brasil (Sub-bacia Alto Garças, Bacia do Paraná). **Papéis Avulsos de Zoologia**, v. 56, n. 11, p. 135-149, 2016.
- CHALONER, W.G.; MENSAH, M.K.; CRANE, M.D. Non-vascular land plants from the Devonian of Ghana. **Palaeontology**, v. 17, n. 4, p. 925-947, 1974.
- CHALONER, W.G.; MCELWAIN, J. The fossil plant record and global climatic change. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 95, n. 1-4, p. 73-82, 1997.
- CHAVES, M.L.S.C.; SVISERO, D.P. Características geológicas e origem dos conglomerados diamantíferos das regiões de Diamantina (Mesoproterozóico) e de Romaria (Cretáceo Superior), Minas Gerais. Boletim IG-USP. Série Científica, v. 24, p. 49-57, 1993.
- CINGOLANI, C.A.; BERRY, C.M.; MOREL, E.; TOMEZZOLI, R. Middle Devonian lycopsids from high southern palaeolatitudes of Gondwana (Argentina). *Geological Magazine*, v. 139, n. 6, p. 641-649, 2002.
- COMNISKEY, J.C. **Paleontologia dos Discinidae (Brachiopoda: Linguliformea) da sucessão devoniana da Bacia do Paraná, Estado do Paraná, Brasil: Revisão sistemática, distribuição geográfica e estratigráfica**. 2011. 182 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2011.
- COPPER, P. Paleolatitudes in the Devonian of Brazil and the Frasnian-Famennian mass extinction. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 21, n. 3, p. 165-207, 1977.
- DIMICHELE, W.A.; NELSON, W.J. Small-scale spatial heterogeneity in Pennsylvanian-age vegetation from the roof shale of the Springfield Coal (Illinois Basin). **Palaos**, v. 4, n. 3, p. 276-280, 1989.
- DIMICHELE, W.A.; BASHFORTH, A.R.; FALCON-LANG, H.J.; LUCAS, S.G. Uplands, lowlands, and climate: Taphonomic megabiases and the apparent rise of a xeromorphic, drought-tolerant flora during the Pennsylvanian-Permian transition. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 559, p. 109965, 2020.

- DI PASQUO, M.; AMENÁBAR, C.R.; NOETINGER, S. Middle Devonian microfloras and megafloras from western Argentina and southern Bolivia: their importance in the palaeobiogeographical and palaeoclimatic evolution of western Gondwana. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 314, n. 1, p. 193-213, 2009.
- EDWARDS, D.; DAVIES, K.L.; AXE, L. A vascular conducting strand in the early land plant *Cooksonia*. **Nature**, v. 357, n. 6380, p. 683-685, 1992.
- FALCON-LANG, H.J.; MILLER, R.F. Palaeoenvironments and palaeoecology of the Early Pennsylvanian Lancaster Formation ('Fern Ledges') of Saint John, New Brunswick, Canada. **Journal of the Geological Society**, v. 164, n. 5, p. 945-957, 2007.
- FERGUSON, D.K. The origin of leaf-assemblages: new light on an old problem. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 46, n. 1-2, p. 117-188, 1985.
- FLETCHER, B.J.; BEERLING, D.J.; CHALONER, W.G. Stable carbon isotopes and the metabolism of the terrestrial Devonian organism *Spongiophyton*. **Geobiology**, v. 2, n. 2, p. 107-119, 2004.
- GASTALDO, R.A. Preliminary observations on phytotaphonomic assemblages in a subtropical/temperate Holocene bayhead delta: Mobile Delta, Gulf Coastal Plain, Alabama. **Review of palaeobotany and palynology**, v. 58, n. 1, p. 61-83, 1989.
- GASTALDO, R.A.; BEARCE, S.C.; DEGGES, C.W.; HUNT, R.J.; PEEBLES, M.W.; VIOLETTE, D.L. Biostratinomy of a Holocene oxbow lake: a backswamp to mid-channel transect. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 58, n. 1, p. 47-59, 1989.
- GENSEL, P.G.; CHALONER, W.G.; FORBES, W.H. *Spongiophyton* from the Late lower Devonian of New Brunswick and Quebec, Canada. **Palaeontology**, v. 34, n. 1, p. 149-168, 1991.
- GENSEL, P.G.; GLASSPOO, I.; GASTALDO, R.A.; LIBERTIN, M.; KVAČEK, J. Back to the Beginnings: The Silurian-Devonian as a Time of Major Innovation in Plants and Their Communities. **Nature through Time**, p. 367-398, 2020.
- GERRIENNE, P.; BERGAMASCHI, S.; PEREIRA, E.; RODRIGUES, M.A.C.; STEEMANS, P. An Early Devonian flora, including *Cooksonia*, from the Paraná Basin (Brazil). **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 116, n. 1-2, p. 19-38, 2001.
- GHILARDI, R.P. **Tafonomia comparada e paleoecologia dos macroinvertebrados (ênfase em trilobites), da Formação Ponta Grossa (Devoniano, Sub-bacia Apucarana), Estado do Paraná, Brasil**. 2004. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, 2004.
- GRAHN, Y.; MAULLER, P.M.; PEREIRA, E.; LOBOZIAK, S. Palynostratigraphy of the Chapada Group and its significance in the Devonian stratigraphy of the Parana Basin, south Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 29, p. 354-370, 2010.
- GRIFFING, D.H.; BRIDGE, J.S.; HOTTON, C.L. Coastal-fluvial palaeoenvironments and plant palaeoecology of the Lower Devonian (Emsian), Gaspé Bay, Québec, Canada. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 180, n. 1, p. 61-84, 2000.

- GUERRA-SOMMER, M. Spongiophyton nas Bacias Intracratônicas Brasileiras: Considerações Paleoecológicas e Bioestratigráficas. **Pesquisas em Geociências**, v. 20, n. 1, p. 70-77, 1993.
- GUERRA-SOMMER, M.; DIAS-FABRICIO, M.E.; CAZZULO-KLEPZIG, M.; MARQUES-TOIGO, M.; PILATTI, F. Spongiophyton and associated micro and megafossils from the devoniano of the Ponta Grossa Formation, Paraba Basin, South Brazil. *Reunião de Paleobotânicos e Palinólogos*, 7, 1990.
- GUTIÉRREZ, P.R. Revisión de las licópsidas de la Argentina. 2. Malanzania Archangelsky, Azcuy et Wagner y Haplostigma Seward; con notas sobre Cyclostigma Haughton. **Ameghiniana**, v. 33, n. 2, p. 127-144, 1996.
- GUTIÉRREZ, P.R.; ARCHANGELSKY, S. Haplostigma baldisii sp. nov. (Lycophyta) del Devónico de la Precordillera de San Juan, Argentina. **Ameghiniana**, v. 34, n. 3, p. 275-282, 1997.
- HORODYSKI, R.S.; HOLZ, M.; GRAHN, Y.; BOSETTI, E.P. Remarks on sequence stratigraphy and taphonomy of the Malvinokaffric shelly fauna during the KAČÁK Event in the Apucarana Sub-basin (Paraná Basin), Brazil. **International Journal of Earth Sciences**, v. 103, n. 1, p. 367-380, 2014.
- HOUSE, M.R. Strength, timing, setting and cause of mid-Palaeozoic extinctions. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 181, n. 1-3, p. 5-25, 2002.
- HOUSE, M.R. The Middle Devonian Kačák Event. **Proceedings of the Ussher Society**, v. 9, p. 79-84, 1996.
- HU, T.; JIN, W.-Y.; CHENG, C.-G. Classification of five kinds of moss plants with the use of Fourier transform infrared spectroscopy and chemometrics. **Spectroscopy**, v. 25, n. 6, p. 271-285, 2011.
- ISAACSON, P.E.; SABLOCK, P.E. Devonian paleogeography and palaeobiogeography of the Central Andes. **Memoir Geological Society of London**, v. 12, p. 431-435, 1990.
- ISAACSON, P.E.; DIAZ MARTINEZ, E. Evolução paleogeografica del Paleozoico Medio y Superior de los Andes Centrales (14° a 18° S) en Bolivia: evidencia del desplazamiento latitudinal de una cuenca de antepais. **Revista Técnica de PFB**, v. 15, n. 3-4, p. 265-282, 1994.
- JAHREN, A.H.; PORTER, S; KUGLITSCH, J.J. Lichen metabolism identified in Early Devonian terrestrial organisms. **Geology**, v. 31, n. 2, p. 99-102, 2003.
- KRÄUSEL, R. *Spongiophyton* nov. gen. (Tallophyta) und *Haplostigma* Seward (Pteridophyta) im Unter-Devon von Paraná. **Paleont. Paraná (Vol. Comem. Cent. Paraná) Curitiba**, p. 194-210, 1954.
- KRÄUSEL, R.; DOLIANITI, E. **Restos vegetais das Camadas Picos, Devoniano Inferior do Piauí**. Boletim do Ministério da Agricultura. Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia, n. 173, p. 7-19, 1957.
- KRÄUSEL, R.; VENKATACHALA, B.S. Devonische Spongiophytaceen aus Destnud. West-Asien. **Senckenbergiana Lethaia**, n. 47, p. 215-251, 1966.

- LEME, J.D.M.; RODRIGUES, S.C.; SIMÕES, M.G.; VAN ITEN, H. Sistemática dos conulários (Cnidaria) da Formação Ponta Grossa (Devoniano), do Estado do Paraná, Bacia do Paraná, Brasil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 7, n. 2, p. 213-222, 2004.
- LOPES, W.A.; FASCIO, M. Esquema para interpretação de espectros de substâncias orgânicas na região do infravermelho. **Química nova**, v. 27, n. 4, p. 670-673, 2004.
- LUCAS, W.J.; GROOVER, A.; LICHTENBERGER, R.; FURUTA, K.; YADAV, S.R.; HELARIUTTA, Y.; He X.-Q.; FUKUDA H.; KANG J.; BRADY S.M.; PATRICK J.W.; SPERRY J.; YOSHIDA A.; LÓPEZ-MILLÁN A.-F.; GRUSAK M.A.; KACHROO, P. The plant vascular system: evolution, development and functions f. *Journal of integrative plant biology*, v. 55, n. 4, p. 294-388, 2013.
- MAKSIMOVA, V.; KLAVINA, L.; BIKOVENS, O.; ZICMANIS, A.; PURMALIS, O. Structural characterization and chemical classification of some bryophytes found in Latvia. **Chemistry & Biodiversity**, v. 10, n. 7, p. 1284-1294, 2013.
- MATSUMURA, W.M.K.; BALZARETTI, N.M.; IANNUZZI, R. Fourier transform infrared characterization of the Middle Devonian non-vascular plant *Spongiophyton*. **Palaeontology**, v. 59, n. 3, p. 365-386, 2016.
- MATSUMURA, W.M.K.; GHILARDI, R.P.; RIBEIRO, V.R.; SILVA NETA, N.L.; FRAZÃO, N.L.S.; SOUZA, B.O. Novos registros de *Spongiophyton* no Devoniano do Mato Grosso, MT (Sub-bacia de Alto Garças). **Paleontologia em Destaque: Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Paleontologia**, Sessão Biotas e ecossistemas do Paleozoico. Ribeirão Preto: 2017. p. 194, 2017.
- MATSUMURA, W.M.K.; IANNUZZI, R.; BALZARETTI, N.M.; DI PASQUO, M.; NORONHA, B.T.; SOUZA, P.A. First FTIR characterization of Devonian and Permian cuticles from Brazil: *Spongiophyton* kräusel (insertae sedis), *Palaeostigma* kräusel et dolianiti and *?cyclostigma dolianiti* (lycophytes). In: XVI Simposio Argentino de Paleobotánica y Palinología, 2018, Cuiabá - MT. **Anais do XVI Simposio Argentino de Paleobotánica y Palinología**, 2018. p. 70.
- MATSUMURA, W.M.K.; IANNUZZI, R.; BOSETTI, E.P. Histórico e evolução do conhecimento sobre a paleoflora do Devoniano na Bacia do Paraná. **Terr@ Plural**, v. 7, p. 25-42, 2013.
- MATSUMURA, W.M.K.; IANNUZZI, R.; BOSETTI, E.P. Middle Devonian herbaceous lycopsid *Haplostigma* from the Paraná Basin, Brazil: taxonomy, biostratigraphy and phytogeography. **Geobios**, v. 48, n. 5, p. 397-415, 2015.
- MCELWAIN, J.C. Do fossil plants signal palaeoatmospheric carbon dioxide concentration in the geological past?. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 353, n. 1365, p. 83-96, 1998.
- MCELWAIN, J.C.; CHALONER, W.G. Stomatal density and index of fossil plants track atmospheric carbon dioxide in the Palaeozoic. **Annals of Botany**, v. 76, n. 4, p. 389-395, 1995.

- MCELWAIN, J.C.; MONTAÑEZ, I.; WHITE, J.D.; WILSON, J.P.; YIOTIS, C. Was atmospheric CO₂ capped at 1000 ppm over the past 300 million years?. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 441, p. 653-658, 2016.
- MCLOUGHLIN, S.; LONG, J. A. New records of Devonian plants from southern Victoria Land, Antarctica. **Geological Magazine**, v. 131, p. 81-81, 1994.
- MELO, J.H.G. **The malvinokaffric realm in the Devonian of Brazil**. In: Mcmillan, N. J.; Embry, A.F.; Glass, D.J. (Eds.), *Devonian of the World*. Canadian Society of Petroleum Geologists Members, v. 1, n. 14, p. 669-703, 1988.
- MILANI, E.J.; MELO, J.H.G.; SOUZA, P.A.; FERNANDES, L.A.; FRANÇA, A.B. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás*. Rio de Janeiro: Petrobras, p. 265–287, 2007.
- MOISAN, P.; NIEMEYER, H.; KERP, H. Lycopods from the Upper Devonian of northern Chile with remarks on the geographical distribution of the morphogenus *Haplostigma* Seward. **Paläontologische Zeitschrift**, v. 85, n. 3, p. 231-240, 2011.
- NEREGATO, R.; IANNUZZI, R. Tafonomia vegetal. In: HORODYSKI, R.S.; ERTHAL, F. (Orgs). **Tafonomia: métodos, processos e aplicação**. Curitiba: CRV, 2017.
- NIKLAS, K.J. The role of phyllotactic pattern as a “developmental constraint” on the interception of light by leaf surfaces. **Evolution**, v. 42, n. 1, p. 1-16, 1988.
- PEREIRA, E. **Evolução tectono-sedimentar do intervalo ordoviciano-devoniano da Bacia do Paraná com ênfase na Sub-Bacia de Alto Garças e no Paraguai oriental**. 2000. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, 2000.
- PLUMSTEAD, E.P. A general review of the Devonian fossil plants found in the Cape System of South Africa. **Palaeontologia Africana**, n. 10, p. 1-83, 1967.
- POPP, J.H.; BARCELLOS-POPP, M. Análise estratigráfica da sequência deposicional devoniana da bacia do Paraná (Brasil). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 16, n. 2, p. 187-194, 1986.
- REECE, J.B ; URRY, L.A ; CAIN, M.L ; WASSERMAN, S.A ; MINORSKY, P.V ; JACKSON, R.B. **Biologia de Campbell**. 10. Ed. Porto Alegre: Artmed, 2015
- REX, G.M.; CHALONER, W.G. The experimental formation of plant compression fossil. **Palaeontology**, v. 26, p. 231-252, 1983.
- RIBEIRO, V.R.; GHILARDI, R.P.; SILVA-CAMINHA, S.A.F. Fácies deltaicas devonianas de Jaciara-Mato Grosso: o indício de uma nova proposta estratigráfica para a Sub-bacia de Alto Garças. **Geociências**. v. 38, n. 3, p. 687-698, 2019.
- RODRIGUES, S.C.; SIMÕES, M.G.; LEME, J.L. Tafonomia comparada dos Conulatae (Cnidaria), Formação Ponta Grossa (Devoniano), Bacia do Paraná, Estado do Paraná. **Brazilian Journal of Geology**, v. 33, n. 4, p. 381-390, 2003.
- SCHEFFLER, S.M.; FERNANDES, A.C.S. Crinoidea da Formação Ponta Grossa (Devoniano, Bacia do Paraná), Brasil. **Arquivos do Museu nacional**, v. 65, n. 1, p. 83-98, 2007.

- SCHEIHING, M.H.; PFEFFERKORN, H.W. The taphonomy of land plants in the Orinoco Delta: a model for the incorporation of plant parts in clastic sediments of Late Carboniferous age of Euramerica. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 41, n. 3-4, p. 205-240, 1984.
- SEWARD, A.C. Fossil plants from the Bokkeveld and Witteberg beds of South Africa. **Quartely Journal of the Geological Society of London**, v. 88, p. 358-369, 1932.
- SIMON, L.; GODDERIS, Y.; BUGGISCH, W.; STRAUSS, H.; JOACHIMSKI, M. Modeling the carbon and sulphur isotope composition of marine sediments: climate evolution during the Devonian. **Chem. Geol.**, v. 146, p. 19–38, 2007.
- SOARES, S.P.; SIMÕES, M.G.; LEME, J.M. O papel da fossilização e do intemperismo na sistemática de trilobites Phacopida (Calmoniidae e Homalonotidae) do Devoniano da bacia do Paraná, Brasil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 11, n. 2, p. 117-128, 2008.
- SPICER, R.A. The sorting and deposition of allochthonous plant material in a modern environment as Silwood Lake, Silwood Park, Berkshire, England. **United States Geological Survey Professional Paper**, v. 1143, p.1-77, 1981.
- SRIVIBOON, C.; SITTHIOSOD, R.; BOONPRAGOB, K.; KLONGKLAEW, S. ATR-FTIR spectral analysis of lichens using as fingerprint for identification of lichen species. In: 40º Congresso de Ciência e Tecnologia da Tailândia, 2014, Khon Kaen. **Proceedings of the 40th Congress on Science and Technology of Thailand**, 2014. p. 868-876.
- TAYLOR, W.A.; FREE, C.; BOYCE, C.; HELGEMO, R.; OCHOADA, J. SEM analysis of Spongiophyton interpreted as a fossil lichen. **International Journal of Plant Sciences**, v. 165, n. 5, p. 875-881, 2004.
- TAYLOR, E.L.; TAYLOR, T.N.; KRINGS, M. **Paleobotany: the biology and evolution of fossil plants**. Academic Press, 2009.
- VIEIRA, G.A.G.; GHILARDI, R.P.; CAMINHA, D.S.F. DA F.; RIBEIRO, V.R. Descrição de uma fácies tafonômica vegetal do Grupo Chapada (Devoniano da Bacia do Paraná), município de Jaciara/MT. In: 69º Congresso Brasileiro de Botânica, 2018, Cuiabá - MT. **Anais do 69º Congresso Nacional de Botânica**, 2018. p. s/n.
- WALKER, R.G.; PLINT, A.G. Wave and storm dominated shallow marine systems. **Facies Models-response to sea level change-**, p. 219-238, 1992.
- WITZKE, B.J.; HECKEL, P.H. Paleoclimatic indicators and inferred Devonian paleolatitudes of Euramerica. In: N. J. MCMILLAN, A. F. EMBRY & D. J. GLASS (Eds.): **Devonian of the World**: v. 3: 49-63. Canadian Society of Petroleum Geologists, Calgary, 1988.
- WORKMAN J.R, J.; WEYER, L. **Practical guide and spectral atlas for interpretive near-infrared spectroscopy**. CRC press, 2012.
- ZABINI, C. **Lingulídeos da Sucessão Devoniana da Bacia do Paraná, região dos Campos Gerais, Brasil: revisão de conceitos biológicos-ecológicos e análise tafonômica básica**. 2007. 186 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

ZDEBSKA, D. **On Spongiophyton from the Lower Devonian of Poland**. 1978.

ZODROW, E.L.; MASTALERZ, M.A. proposed origin for fossilized Pennsylvanian plant cuticles by pyrite oxidation (Sydney Coalfield, Nova Scotia, Canada). **Bulletin of Geosciences**, v. 84, p. 227–240, 2009.

ZODROW, E.L.; HELLEUR, R.; SIMUNEK, Z. Functional groups and common pyrolysate products of *Odontopteris cantabrica* (index fossil for the Cantabrian Substage, Carboniferous). **International Journal of Coal Geology**, v. 100, p. 40– 50, 2012.

APÊNDICE A

Devonian macroflora and elementary characterization of the *Spongiophyton nanum* Kräusel emend. Chaloner *et al.* 1974 from the North-Northwest flank of the Paraná Basin

Geovane Gaia^{a*}, Victor Rodrigues Ribeiro^a, Felipe Nascimento Sousa^a, Willian Mikio Kurita Matsumura^b, Renato Pirani Ghilardi^c, Marta Pereira Llopart^d.
geovane.gaia@unesp.br, victor18lapalma@gmail.com, fn.sousa@unesp.br,
willian.matsumura@ufpi.edu.br, renato.ghilardi@unesp.br, m.llopart@unesp.br

* Corresponding author

^a Programa de pós-graduação em Biociências, Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Campus de Bauru, SP, Brasil

^b Departamento de Biologia, Centro de Ciências da Natureza, Universidade Federal do Piauí, Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, Teresina, PI, Brasil

^c Departamento de Biologia, Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Campus de Bauru, SP, Brasil

^d Departamento de Física, Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Campus de Bauru, SP, Brasil

Abstract

After reviewing and presenting the Devonian macroflora already recorded on the North-Northwest flank of the Paraná Basin, 2 fragments of fossil cuticles of *Spongiophyton nanum* were studied here through the application of SEM / EDS to understand its elemental composition. These data have already made it possible to point out relevant aspects for paleoenvironmental studies and sedimentation environments. The analysis in EDS showed the presence of carbon (C), oxygen (O) and calcium (Ca) as the main elements of the composition of preserved plant cuticles of *S. nanum*. Iron (Fe), copper (Cu), aluminum (Al) and silicon (Si) were also detected in one of the cuticles and barium (Ba) and magnesium (Mg) in the composition of the other cuticle. Semiquantitative data support the highest elemental concentrations of C and O in plant cuticles. C would be associated with the preservation of these phytofossils, since the most volatile elements of the original organic matter of the plant cuticle were dissipated into the atmosphere, leaving only C, which results in a process of fossilization by carbonification or incarbonization. The presence of Si, both in the rocky matrix and in the fossil, reflects a siliciclastic platform as an environment for the formation and life of the organism.

Keywords: plant cuticle, SEM, EDS, elemental characterization, carbonification.

INTRODUCTION

The studies about the Devonian of Paraná Basin are more concentrated on knowledge about its paleofauna (e.g. Rodrigues *et al.*, 2003; Soares *et al.*, 2007, 2008; Bosetti *et al.*, 2010; Bosetti *et al.*, 2011; Bosetti *et al.*, 2012; Ghilardi *et al.*, 2013; Comniskey and Ghilardi, 2013; Zabini *et al.*, 2013; Carbonaro and Ghilardi, 2016; Scheffler *et al.*, 2017; Ribeiro *et al.*, 2019). There are just a few papers about the paleoflora of Devonian of Paraná Basin, especially on the North- Northwest flank of this basin, that occurs in part of Mato Grosso, Mato Grosso do Sul and Goiás states, of Brazil (Figure 1).

A lot of paleobotanical studies on North-Northwest flank of Paraná Basin was made with palynomorphs (Burjack, Paris, 1989; Loboziak *et al.*, 1988; Oliveira, 1991; Oliveira *et al.*, 1995; Oliveira and Burjack, 1996; Oliveira, 1997; Grahn *et al.*, 2000; 2002; Mendlowicz Mauller *et al.*, 2007; Mendlowicz Mauller *et al.*, 2009; Grahn *et al.*, 2010; Muro *et al.*, 2019). The only plant macrofossils táxons found in this area were documented by Barbosa (1949), Kräusel (1954), Schubert and Borghi (1991), Carbonaro and Ghilardi (2016), Pereira (2000), Vieira *et al.* (2018) and Ribeiro *et al.* (2019).

None of these studies with plant macrofossils from devonian areas on the North-Northwest side of the Paraná Basin deals with analyzes on Dispersive Energy Dispersive Spectroscopy (EDS or EDX) or other types of microscopic analitical techniques with the objective of characterizing them chemically, so, because of that, they don't have the data of the composition of these phytofossils. However, these informations has been very relevant in taphonomic studies, since the joint application of the EDS technique with other microscopic techniques of elementary analysis can reveal data about the origin of the mineral that compound the fossil record, the paleoenvironment of the organisms' life and even the determination of biofacies (Caleffo, 2014; 2018; Ricardi-Branco *et al.*, 2018; Caleffo *et al.*, 2019; Marchetti *et al.*, 2019).

In this line, the analysis of phytofossils in EDS were made here with the objective of finding out the elemental composition of the cuticles preserved in outcropping rocks in the Northwest flank of the Paraná Basin and pointing out relevant aspects for paleoenvironmental studies and sedimentation environments.

Figure 1. Coverage area of the Paraná Basin.



Source: adapted by Melo (1988).

A brief scenario of the geology of the Paraná Basin

The Paraná Basin (Figure 1) covers a total area of 1.100.000 km² of the territory of Brazil, occurring in the states of Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina and Rio Grande do Sul, besides extending to other countries like Argentina, Paraguay and Uruguay (Petri, Fúlfaro, 1988; Melo, 1988; Milani et al., 2007).

According to Zalán *et al.* (1987) and Borghi (2002) the basin has rocks of the most diverse ages, from different paleoenvironments, in addition to the igneous rocks of the most diverse ages, from different paleoenvironments, in addition to the igneous rocks originating from the basalt outpouring that occurred in the Cretaceous (Serra Geral Formation). Outcrops of sedimentary rocks consist the other 35% of the basin portion, covering the eastern, northeast, northwest, west and south edges.

The Devonian rocks that occur in the north-northwestern portions of the Paraná Basin (with outcrops in the states of Goiás, Mato Grosso and Mato Grosso do Sul) are

stratigraphically grouped in the Chapada Group, from the bottom to the top: Unit 1, Unit 2, Unit 3 and Unit 4, with ages ranging from Lochkovian to Frasnian (Melo, 1988; Grahn *et al.*, 2010).

In Unit 1 of the Chapada Group, chronocorrelated to Furnas Formation, there are records of small plants of Psilophytas and a variety of ichnofossils (Andrade, Camarço, 1980; Quadros, Melo, 1986; Petri, Fúlfaro, 1988; Grahn *et al.*, 2010; Sedorko *et al.*, 2018). Unit 2, from Neopragian-Eoemsian to Neoemsian-Eifelian age, has a considerable diversity of recorded fossils, from brachiopods, tentaculites, bivalves, trilobites, crinoids, gastropods and polychaetes (Andrade, Camarço, 1978, 1980; Grahn *et al.*, 2010).

According to Andrade and Camarço (1980), Unit 3 of the Chapada Group is limited to the state of Goiás, northeastern portion of the basin, with Neoemsian- Eifelian ages (Grahn *et al.*, 2010). In this Unit, there were few records of fossils, however, Ribeiro *et al.* (2020) identified some fossil plants when they described deltaic facies in the region of Jaciara, Mato Grosso.

Finally, Unit 4 of the Chapada Group is associated with the maximum marine transgression of the early Givetian (Assine, 2001; Grahn *et al.*, 2010). The presence of trilobites, brachiopods and Lycopsida, such as *Haplostigma* sp. Seward, 1932 emend. Anderson; Anderson 1985 and *Palaeostigma?* sp. Kräusel; Dolianiti, 1957 has already been recorded in this unit (Carvalho *et al.*, 1987; Carbonaro, Ghilardi, 2016).

History of Devonian macroflora

There are few works dealing with plants found on the North-Northwest flank of the Paraná Basin. Barbosa (1949) described specimens of *Haplostigma lenticularis* Barbosa (1949) in greenish-gray shales found near the upper São Lourenço River, in Mato Grosso. Later, Kräusel (1954) synonymized this taxon with *Spongiophyton lenticulare* (Barbosa) Kräusel 1954 due to the taloid structures and spongy surface characteristic of this species. In Devonian geologic cross section located in areas of the Parque Nacional da Chapada dos Guimarães (near to the Degrau and Andorinhas waterfalls), Pereira (2000) documented the occurrence of remains of primitive vascular plants identified as *Cooksonia* Lang 1937. Specimens of this same genus probably already had been found by Schubert and Borghi (1991) in coastal sediments from the upper portion of the Furnas Formation (Chapada Group, Paraná Basin), close to Cachoeira das Andorinhas. The authors describe the occurrence of scattered triangular and fusiform sporangia, as well as disconnected and smooth axes and, in some cases, with dichotomous ramifications, characteristic of the

Cooksonia genus. In addition, the authors accept the Eodevonian age for the sediments associated with these geologic cross sections.

More recent work in the northwest of the Paraná Basin was realized by Ribeiro *et al.* (2019), where the authors studied outcrops located in the southeast portion of Mato Grosso and documented the occurrence of plant remains preliminarily identified as belonging to the species *Spongiophyton nanum* Kräusel emend. Chaloner *et al.* 1974 (Vieira *et al.*, 2018) and preserved as cuticles in heterolytic sequence of medium and light gray sandstones of sequences characterized as delta plain. The present manuscript will bring more data about this material, which is listed at the Laboratório de Paleontologia e Palinologia (PALMA) of the Federal University of Mato Grosso.

Near the city of Amorinópolis, Southwest of Goiás (GO), on the northern flank closest to the Northwestern edge of the Paraná Basin, Quadro and Melo (1986, p. 611) documented the occurrence of plant remains whose characterizations correlate to the genus *Cooksonia*: "The plant remains consist mainly of impressions of fragmentary cauloids, some showing a dichotomy and others with structures that are similar to sporangia at their extremities". These phytophossils were found in a layer of grayish-white, soft, well-laminated and fissile micaceous siltstone, intercalating with medium to conglomeratic, whitish feldspar sandstones, with planar and concave cross stratification, correlated with the Furnas Formation.

Also, in the North / Northeast part of the Paraná Basin, outcrop located in the municipality of Caiapônia (GO), belonging to unit 4 of the Chapada Group, Alto Garças Sub-basin (Paraná Basin), Carbonaro and Ghilardi (2016) recorded the occurrence of *Haplostigma* sp. and *Palaeostigma?* sp.

Table 1. Plant macrofossils documented on the North and Northwest flank of the Paraná Basin.

Genus/Species	Author(s)	Collection location
<i>Cooksonia</i> sp.	Schubert e Borghi (1991)	Cachoeira das Andorinhas (MT)
	Quadros e Melo (1986)	Amorinópolis (GO)
	Pereira (2000)	Cachoeira das Andorinhas (MT)
<i>Spongiophyton nanum</i> Kräusel emend. Chaloner <i>et al.</i> 1974	Ribeiro <i>et al.</i> (2019)	Jaciara (MT)

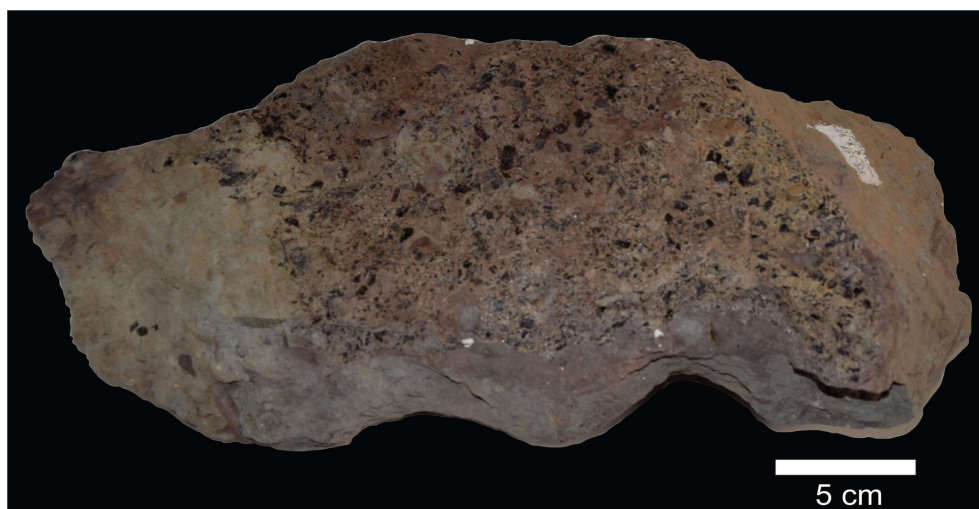
<i>Spongiophyton lenticulare</i> (Barbosa) Kräusel 1954	Kräusel (1954)	Rio São Lourenço (MT)
<i>Haplostigma</i> sp.	Carbonaro e Ghilardi (2016)	Amorinópolis (GO)
<i>Palaeostigma?</i> sp.	Carbonaro e Ghilardi (2016)	Amorinópolis (GO)

MATERIAL AND METHODS

Phytofossil material

The materials analyzed in Energy Dispersion Spectrometry (EDS or EDX) consist of 2 specimens of *Spongiophyton nanum* found in a phytofossiliferous sample containing several fragments of the species preserved in the form of cuticles (Figure 2). This material is listed as “PJ-187” in the scientific collection of the Laboratório de Paleontologia e Palinologia (PALMA) of the Federal University of Mato Grosso (UFMT) and was granted for the realization of this work.

Figure 2. Phytopossiliferous sample where the *S. nanum* fragments are inserted.

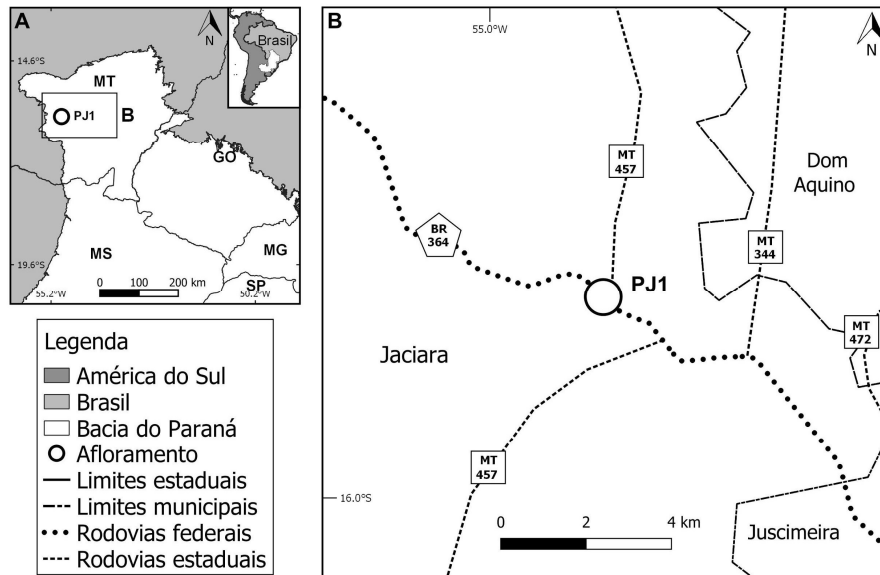


Source: the authors.

Location and geology of the study area

The collection area (Figure 3) of the sample containing fragments of *S. nanum* is located in the city of Jaciara, Mato Grosso, on the outcrop at the edge of the BR-364 on the way out of the city to Cuiabá and is named “PJ1” (15 ° 56'31.68 "S 55 ° 0'56.78" O). This point refers to the point called “AJ-03” in the work by Ribeiro *et al.* (2019).

Figure 3. Place of collection of the phytopossiliferous sample.



Source: the authors.

The geologic cross section has a maximum thickness of approximately 12 m and the outcrop occurs along 200 m of the highway. In general, the geologic cross section has alternate sequences of siltstones, sandstones and conglomeratic lenses which, according to Ribeiro *et al.* (2019), consist of cyclical sequences of delta marginal dike breaks under a delta plain. The plants found are dispersed in the middle portions of the outcrop, in lenticular forms, and immersed in sandstones and in conglomerate. The collected material presents a good state of conservation.

Elementary analysis

The plants were analyzed in Dispersive Energy Spectrometry (EDS or EDX) coupled to the Carl Zeiss Scanning Electron Microscope (SEM) model EVO LS 15, which allows a qualitative and semi-quantitative chemical evaluation of the compositional elements of the samples surface.

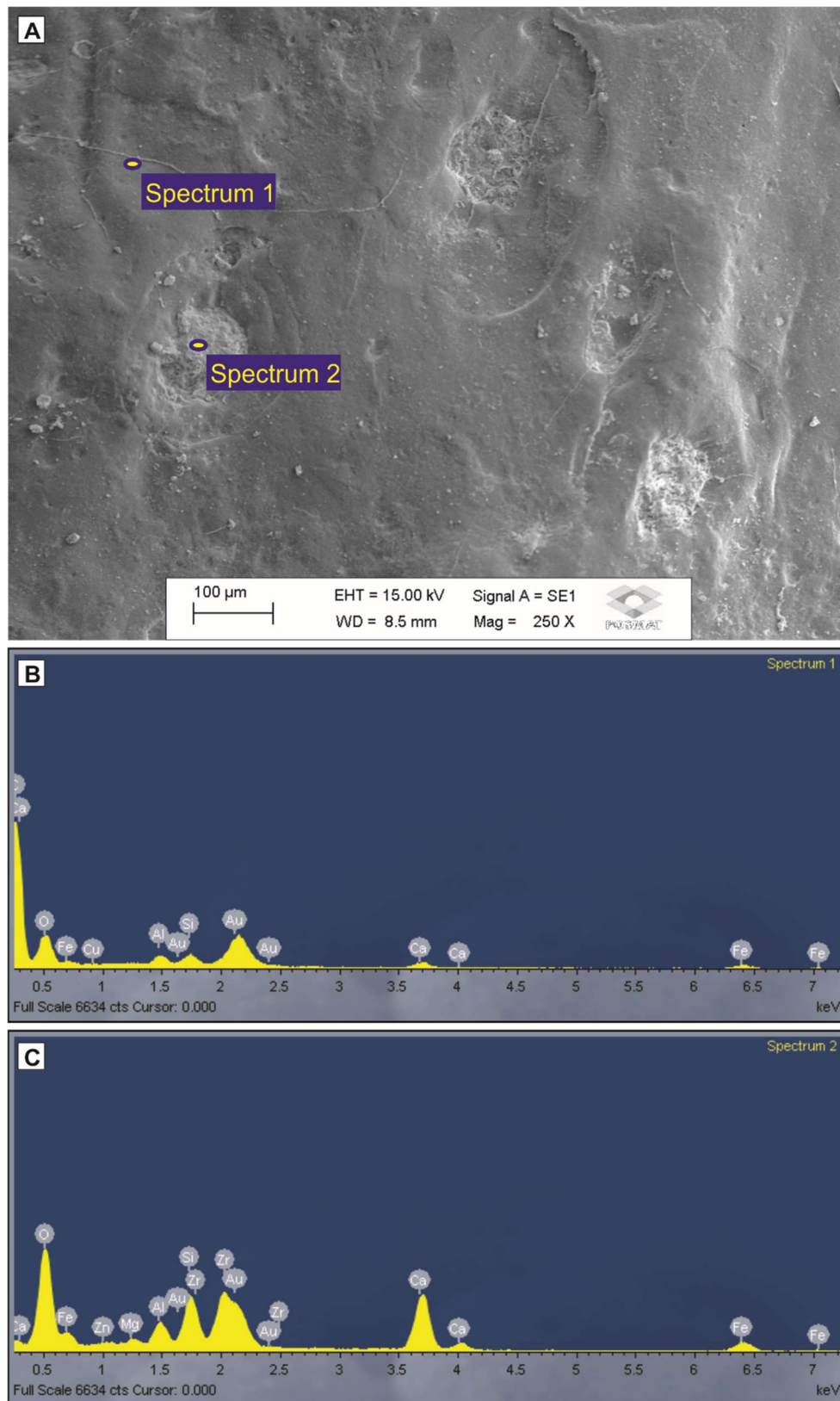
The 2 cuticular specimens of *Spongiophyton nanum* were detached from the sample and fixed to the equipment's sample holder through a gold (Au) adhesive tape which, in addition to fixation, is used to increase electron conductivity.

The cuticle composition of *S. nanum* has already been investigated by Chaloner *et al.* (1974) for taxonomic purposes. The authors studied a sample from the Middle Devonian of Ghana and identified the main present in the cuticle of these organisms and their respective percentages (%), registering 78.4% carbon, 8.4% hydrogen, 2.7% nitrogen and the rest (10.5%) of oxygen.

RESULTS AND DISCUSSION

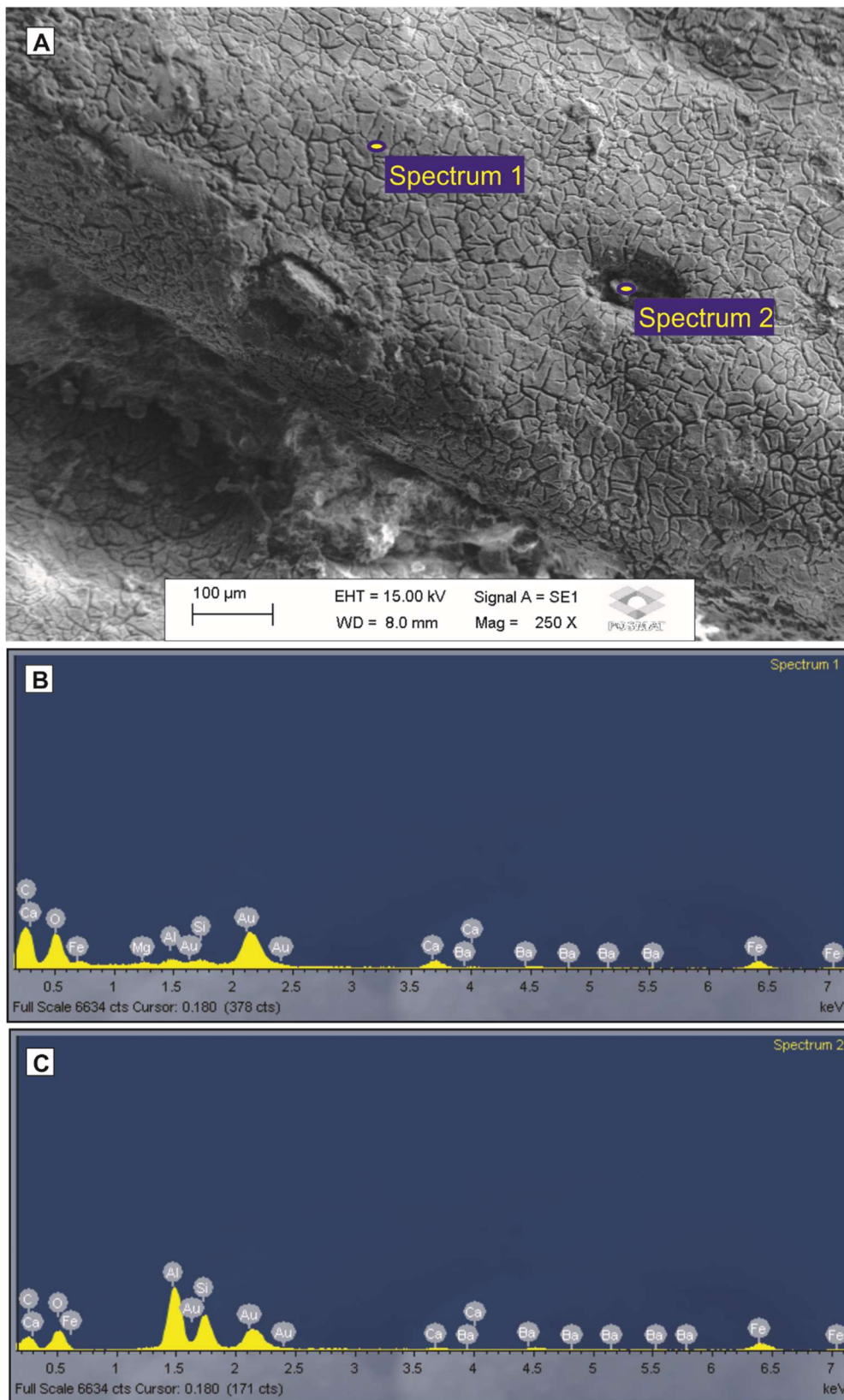
Through Dispersive Energy Spectroscopy (EDS), was made an elementary mapping of cuticles and pores of 2 specimens of *Spongiophyton nanum* collected in the outcrop located in Jaciara/MT (Figure 4A-C and Figure 5 A-C). The analysis in EDS showed the presence of carbon (C), oxygen (O) and calcium (Ca) as the main elements of the composition of preserved plant cuticles of *S. nanum* (Figure 4B and Figure 5B). However, the elemental percentages of Ca were much lower than those of C and O. The presence of iron (Fe), copper (Cu), aluminum (Al) and silicon (Si) in the cuticle of specimen 1 is also noted (Figure 4B) and barium (Ba) and magnesium (Mg) in the cuticle of specimen 2 (Figure 5B). The presence of gold metal (Au) in all the EDS spectra presented here is a consequence of the Au adhesive tape used for fixation and metallization of the analyzed materials to increase their conductivity.

Figure 4. A. Regions of *S. nanum* specimen 1 analyzed in EDS. B. Spectrogram of the area located in the cuticle of specimen 1 (Spectrum 1). C. Spectrogram of the area located in one of the pores of specimen 1 (Spectrum 2).



Source: the authors.

Figure 5. A. Regions of *S. nanum* specimen 2 analyzed in EDS. B. Spectrogram of the area located in the cuticle of specimen 2 (Spectrum 1). C. Spectrogram of the area located in one of the pores of specimen 2 (Spectrum 2).



Source: the authors.

As for the EDS spectra obtained for the interior of the cuticular pores (Figure 4C and Figure 5C), the main elements found were different. This difference was due to the filling of the pore by the rock matrix in the case of specimen 1, as can be seen in figure 4A. Inside

the pore of specimen 1, where it was filled by the rock matrix, the main elements identified were O, Zr, Si and Ca. The presence of Fe, Mg, Al and Zn was also diagnosed (Figure 4C). In the interior of the pore not filled by the rock matrix (Figure 5A), the main elements identified were Al, Si, C and O, with the presence of Ca, Fe and Ba also being detected (Figure 5C).

Semi-quantitative data of the elements identified by the EDS spectra are present in table 2 and make it clearer the concentration of the elements present in greater quantities in the fossil and in the rock matrix. It is noted that the peaks of higher intensities of the EDS spectrum are not always associated with higher weight percentages and / or atomic percentages. For example, in the analysis of the cuticles of Specimens 1 and 2, the element Ca showed weight percentages and atomic percentages much lower than those of O (Table 2). However, the intensity of the Ca peaks in the EDS spectra obtained for both cuticles was higher than that of the O peaks (Figure 4B and Figure 5B). The same occurs with Al and Si present in the pore of specimen 2, since the peak intensity of both elements was higher than the peak of C and O (Figure 5C), while the percentages of weight and atomic percentages of these elements were higher than those of Al and Si.

Table 2. Elementary percentages (weight and atomic) relative to the elements in the fossil cuticles and inside the pores.

Element	Cuticle 1		Pore 1 (with matrix rock)		Cuticle 2		Pore 2 (without matrix rock)	
	% Weight	% Atomic	% Weight	% Atomic	% Weight	% Atomic	% Weight	% Atomic
C	60.09	75.45	-	-	34.54	56.08	23.83	44.29
O	22.43	21.14	51.08	75.98	28.95	35.29	21.12	29.46
Al	1.01	0.56	2.83	2.50	1.06	0.77	14.36	11.87
Si	1.19	0.64	6.41	5.43	0.77	0.53	8.94	7.10
Ca	1.38	0.52	13.78	8.18	2.87	1.40	0.85	0.47
Fe	3.12	0.84	7.15	3.05	9.34	3.26	11.17	4.47
Cu	0.08	0.02	-	-	-	-	-	-
Mg	-	-	0.86	0.84	0.57	0.46	-	-
Zn	-	-	0.77	0.28	-	-	-	-
Zr	-	-	11.92	3.11	-	-	-	-
Ba	-	-	-	-	1.06	0.15	2.14	0.35

According to the information obtained and shown in table 2, the highest elementary concentrations in the plant cuticles were C and O, similar to those found by Chaloner *et al.*

(1974), with a bigger difference between the percentages found for element O. This discrepancy may have occurred because the authors did not present a direct semiquantitative analysis of this element, since the measurement of its percentage was based on the subtraction of 100% (total percentage of all elements present) from the percentage of other elements identified. In the rocky matrix, the highest elementary concentration was O, followed by Ca. The elements Zr, Si, Fe and Al also showed considerable concentrations (above 1% both in weight and in atomic percentage).

Carbon (C) was the only element present in both cuticles of *S. nanum* while it was absent in the pore filled by the rock matrix, therefore, it is an element that may be associated with the preservation of the fossil. So, we suggest that the most volatile elements of the original organic matter in the plant cuticle were dissipated into the atmosphere, leaving only carbon, characterizing a process of fossilization by carbonification/incarbonization. The identification of C in the pore of specimen 2 was possibly due to the absence of a rock matrix in its interior. Thus, the equipment's x-ray beam probably reached the other side of the cuticle through the analyzed pore.

The element oxygen (O) is present in both the cuticles and the matrix because it is an atmospheric component (Zabini, 2007). The high percentages of element O in the matrix (present in the pore of specimen 1) in relation to the percentages of this same element in the cuticles reinforce the incorporation of these elements during fossilization.

The data in table 2 also show that the element Si is concentrated inside the pores, once that its concentration inside both pores analyzed had expressive values (above 1% in both weight and atomic), while its concentration in the region of cuticle further from the pore was irrelevant. So, it is likely that C is not the only element involved in the fossilization process, since the Si rates inside the pores were higher than its rates in the cuticle regions furthest from the pores and may be involved in preserving the region of the cuticle pores and, therefore, may exist more than one fossilization process involved in the same sample. The presence of silicon, both in the rocky matrix and in the fossil, reflects a siliciclastic platform as an environment for the formation and life of the organism (Zabini, 2007).

Another element that was better represented inside the pores in relation to the other cuticle area was Al. Al is possibly linked to Si and O atoms, also identified in these analyzes, constituting clay-mineral phyllosilicates (aluminosilicates) of group of kaolinites, whose molecular formula is $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, which would have been formed as a result of the diagenetic process. However, an elementary analysis technique with better spatial resolution is necessary to identify the minerals present.

The Ca element also had good representation in the analysis of the pore of specimen 1, however, it did not present very relevant values in the analysis of the pore of specimen 2. Taking into account that the pore of specimen 1 was filled by the rock matrix, while the pore of the specimen 2 was “empty”, we interpret that the element Ca is also part of the composition of the minerals that make up the matrix rock, however it was not concentrated in the pore region, as occurred with C, Si and O. So, Ca would not integrate in the hypothetical fossilization process occurred in this phytofossil region.

The Fe element presented relevant values in all samples analyzed, therefore, it is not possible to say whether it played a role in fossiliferous preservation or whether its incorporation occurred through a process of diagenesis.

The Raman technique was applied in this study, but it did not bring additional results due to the background inflorescence that embarrassed the visualization and identification of elementary peaks.

CONCLUSION

The main elements that make up *Spongiophyton nanum* cuticles are carbon and oxygen, the carbon being associated with the preservation of these phytofossils, since the most volatile elements of the original organic matter of the plant cuticle were dissipated into the atmosphere, leaving only carbon, which results in a process of fossilization by carbonification or incarbonization. The presence of silicon, both in the rocky matrix and in the fossil, reflects a siliciclastic platform as an environment for the formation and life of the organism.

Analyses in X-ray fluorescence (XRF), micro-ray micro-fluorescence (μ -XRF) and in X-ray diffraction will be able to integrate the results obtained here, providing information about the (bio) mineralogy of the phytofossiliferous material studied here, the origin of the elements present, the processes involved in the fossilization of these specimens of *Spongiophyton nanum*, as well as the paleoenvironment of life of these enigmatic organisms.

Thus, at the same time that this manuscript points out the scarcity of works that address plant fossils from the North-Northwest flank of the Paraná Basin, it contributes to the dissemination of studies already carried out and presents a new possibility of approach with this type of material from that margin of the basin.

Acknowledgment

The authors would like to thank the Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) for their support through the granting of a scholarship (Process nº 2018 / 02141-4) and assistance (Process nº 16 / 18275-4), which were essential for conducting this research, to CAPES for the master's scholarship of Geovane Gaia and doctoral scholarship of Felipe N. Sousa and Victor R. Ribeiro, to Dr^a Silane Caminha (FAGEO - UFMT) for the granting of the materials studied here and to Caio Xavier, technician of the Laboratório de Anelasticidade e Biomateriais that helped us in the analysis in SEM/EDS.

REFERENCES

- Andrade, S.; Camarço, P.E.N. **Mapeamento Geológico a Leste das Cidades de Iporá-Amorinópolis**, Relatório Final da Nuclebrás, Goiânia, 1978.
- Andrade, S.; Camarço, P.E.N. Estratigrafia dos sedimentos devonianos do flanco nordeste da Bacia do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 31º, 1980, Camboriú. **Anais**. Camboriú: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 2828-2834, 1980.
- Assine, M.L. O Ciclo Devoniano na Bacia do Paraná e correlação com outras bacias Gondwânicas. **Série Ciência, Técnica, Petróleo. Seção Exploração de Petróleo**, Rio de Janeiro, p. 55-62, 2001.
- Barbosa, O. Vegetais fósseis do Devoniano do Brasil e da Bolívia. **Min. Metal.**, v. 14, p. 81-84, 1949.
- Borghi, L. **Fácies, arquitetura deposicional, tempestitos e o Devoniano da Bacia do Paraná**. Rio de Janeiro, 2002. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ.
- Bosetti, E.P.; Grahn, Y.; Horodyski, R.S.; Mauller, P.M. The first recorded decline of the Malvinokaffric Devonian fauna in the Paraná Basin (southern Brazil) and its cause; taphonomic and fossil evidences. **Journal of south American Earth sciences**, v. 37, p. 228-241, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.02.006>.
- Bosetti, E.P.; Grahn, Y.; Horodyski, R.S.; Mauller, P.M.; Breuer, P.; Zabini, C. An earliest Givetian “Lilliput Effect” in the Paraná Basin, and the collapse of the Malvinokaffric shelly fauna. **Paläontologische zeitschrift**, v. 85, n. 1, p. 49-65, 2011. <https://doi.org/10.1007/s12542-010-0075-8>.
- Bosetti, E.P.; Horodyski, R.S.; Zabini, C.; Matsumura, W.M.K.; Godoy, L.C. Primeira ocorrência de Lingulepis (Brachiopoda-Obolidae) no Devoniano do estado do Paraná, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Ciências Naturais**, v. 5, n. 2, p. 151-164, 2010. Available on: <<http://scielo.iec.gov.br/pdf/bmpegn/v5n2/v5n2a03.pdf>>. Accessed on 03 nov. 2020.
- Burjack, M.I.; Paris, F. Chitinozoaires du genre Alpenachitina dans le Dévonien moyen du Brésil; intérêt stratigraphique et relations phylogénétiques. **Géobios**, v. 22, n. 2, p. 197-213, 1989. [https://doi.org/10.1016/S0016-6995\(89\)80128-7](https://doi.org/10.1016/S0016-6995(89)80128-7).
- Callefo, F. **Análise tafonômica e paleoecológica de estruturas associadas a comunidades microbianas holocênicas e permianas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. Available on: <<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/287739>>. Accessed on 20 set. 2020.
- Callefo, F. **A utilização de biominerais como possíveis bioassinaturas microbianas**. 2018. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP. Available on: <<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/334688>>. Accessed on 20 set. 2020.

Callefo, F.; Maldanis, L.; Teixeira, V.D.C.; Monfredini, T.; Abans, R.Á.D.O.; Rodrigues, F.; Galante, D. Evaluating biogenicity on the geological record with synchrotron-based techniques. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, p. 2358, 2019. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02358>.

Carbonaro, F.A.; Ghilardi, R.P. Fósseis do Devoniano de Goiás, Brasil (Sub-bacia Alto Garças, Bacia do Paraná). **Papéis Avulsos de Zoologia**, v. 56, n. 11, p. 135-149, 2016. <https://doi.org/10.11606/0031-1049.2016.56.11>.

Carvalho, M.G.P.; Melo, J.H.G.; Quadros, L.P. de. Trilobitas Devonianos do flanco noroeste da Bacia do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Paleontologia, 10º, 1987, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Paleontologia, p. 545-565, 1987.

Chaloner, W.G.; Mensah, M.K.; Crane, M.D. Non-vascular land plants from the Devonian of Ghana. **Palaeontology**, v. 17, n. 4, p. 925-947, 1974. Available on: <https://www.palass.org/sites/default/files/media/publications/palaeontology/volume_17/vol17_part4_pp925-947.pdf>. Accessed on 20 set. 2020.

Comniskey, J.C.; Ghilardi, R.P. Levantamento histórico da Classe Tentaculitoidea no Devoniano brasileiro: principais características e padrões de preservação Historical survey of the Class Tentaculitoidea in the Devonian of the Brazil: main features and preservation standards. **Terr@ Plural**, v. 7, p. 115-126, 2013. <https://doi.org/10.5212/TerraPlural.v.7iEspecial.0008>.

Ghilardi, R.P.; Peyerl, D.; Leme, J.M.; Mori, A. Sobre os Trilobitas da Bacia do Paraná e o Centenário da Monografia de Clarke (1913) e O Mito de Sísifo na Paleontologia Brasileira. **Terr@ Plural**, v. 7, p. 75-84, 2013. <https://doi.org/10.5212/TerraPlural.v.7iEspecial.0006>.

Grahn, Y.; Mauller, P.M.; Pereira, E.; Loboziak, S. Palynostratigraphy of the Chapada Group and its significance in the Devonian stratigraphy of the Parana Basin, south Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 29, p. 354-370, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.09.001>.

Grahn, Y.; Pereira, E.; Bergamaschi, S. Silurian and Lower Devonian chitinozoan biostratigraphy of the Paraná Basin in Brazil and Paraguay. **Palynology**, v. 24, n. 1, p. 147-176, 2000. <https://doi.org/10.1080/01916122.2000.9989542>.

Grahn, Y.; Pereira, E.; Bergamaschi, S. Middle and Upper Devonian chitinozoan biostratigraphy of the Paraná Basin in Brazil and Paraguay. **Palynology**, v. 26, n. 1, p. 135-165, 2002. <https://doi.org/10.1080/01916122.2002.9989570>

Kräusel, R. *Spongyophyton* nov. gen. (Tallophyta) und *Haplostigma* Seward (Pteridophyta) im unter-Devon von Paraná. LANGE, Frederico W. (Org). **Paleontologia do Paraná (Vol. Comemorações do Centenário do Paraná)**. Curitiba: Comissão de Comemorações do Centenário do Paraná, p. 195-210, 1954.

Loboziak, S.; Streel, M.; Burjack, M.I.A. Miospores du Dévonien moyen et supérieur du bassin du Parana, Brésil: systématique et stratigraphie/Middle-Upper Devonian miospores from the Parana basin: systematics and Stratigraphy. **Sciences Géologiques, bulletins et mémoires**, v. 41, n. 3, p. 351-377, 1988. Available on: <https://www.persee.fr/doc/sgeol_0302-2692_1988_num_41_3_1803?pageid=t1_358>. Accessed on 20 set. 2020.

Marchetti, I.; Ricardi-Branco, F.; Callefo, F.; Delcourt, R.; Galante, D.; Jurigan, I.; Carvalho, I.S.; Tavares, S.A. Fossildiagenesis and ontogenetic insights of crocodyliform bones from the Adamantina Formation, Bauru Basin, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 96, p. 102327, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102327>.

Melo, J.H.G. The Malvinokaffric Realm in the Devonian of Brazil. In: McMillan, N.J.; Embry, A.F.; Glass, D.J. (eds.). **Devonian of the World**. Calgary, Canadá: Canadian Society of Petroleum Geologists (Memoir 14), p. 669-703, 1988.

Mendlowicz Mauller, P.; Cardoso, T.R.M.; Pereira, E.; Steemans, P. Resultados Palinoestratigráficos do Devoniano da Sub-Bacia de Alto Garças (Bacia do Paraná-Brasil). **Paleontologia: cenários de Vida**, v. 2, p. 607-619, 2007.

Mendlowicz Mauller, P.; Grahn, Y.; Cardoso, T.R.C. Palynostratigraphy from the Lower Devonian of the Paraná Basin, South Brazil, and a revision of contemporary Chitinozoan biozones from Western Gondwana. **Stratigraphy**, v. 6, n. 4, p. 313-332, 2009.

Milani, E.J.; Melo, J.H.G.; Souza, P.A.; Fernandes, L.A. de; França, A.B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**. v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.

Muro, V.J.G.; Rubinstein, C.V.; Pereira, E.; Bergamaschi, S.; Mauller, P.M.; Steemans, P. Early Devonian miospores and organic geochemistry from the Alto Garças Sub-basin (Paraná Basin), Brazil: Biostratigraphic, paleogeographical and paleoenvironmental implications. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 274, p. 104150, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2019.104150>.

Oliveira, S.F. **Acritarcas e prasinofitas da Formação Ponta Grossa (Devoniano) no flanco noroeste da Bacia do Paraná**. 1991. Dissertação (Mestrado em Geologia Sedimentar) – Universidade de São Paulo, USP. Available on: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44136/tde-26102015-164709/en.php>>. Accessed on 20 set. 2020.

Oliveira, S.F. **Palinologia da seqüência devoniana da Bacia do Paraná no Brasil, Paraguai e Uruguai: implicações biocronoestratigráficas, paleoambientais e paleogeográficas**. 1997. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) – Universidade de São Paulo, USP. Available on: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44136/tde-18112015-145829/en.php>>. Accessed on 20 set. 2020.

Oliveira, S.F.; Antonioli, L.; Dino, R. Análise palinológica de sedimentos da Formação Ponta Grossa, aflorantes no NW da Bacia do Paraná, MT, Brasil. 2º Simpósio sobre Cronoestratigrafia da Bacia do Paraná. **Boletim de Resumos**, 1995.

Oliveira, S.F.; Burjack, M.I.A. Petrovina connata gên. n., sp. n. provavelmente relacionado à Chlorophyta, da Formação Ponta Grossa (Neodevoniano), Bacia do Paraná, MT, Brasil. **Revista Geociências-UNG-Ser**, v. 1, n. 3, p. 46-50, 1996.

Pereira, E. **Evolução tectono-sedimentar do intervalo ordoviciano-devoniano da Bacia do Paraná com ênfase na Sub-Bacia de Alto Garças e no Paraguai oriental**. 2000. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) – Universidade de São Paulo, USP. Available on: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44136/tde-28102015-104727/en.php>>. Accessed on 20 de set. 2020.

Petri, S.; Fúlfaro, V.J. **Geologia do Brasil**. 2ª ed. São Paulo: T. A. Queiroz/Ed. da Universidade de São Paulo, 1988.

Quadros, L.P.; Melo, J.H.G. de. Ocorrência de restos vegetais em sedimentos continentais do Paleozoico Médio do Estado de Goiás. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 58, n. 4, p. 611, 1986. Available on: <<http://memoria.bn.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=158119&pagfis=28657>>. Accessed on 20 set. 2020.

Ribeiro, V.R.; Ghilardi, R.P.; Silva-Caminha, S. A. F. da. Fácies deltaicas devonianas de Jaciara-Mato Grosso: o indício de uma nova proposta estratigráfica para a Sub-bacia de Alto Garças. **Geociências**. v. 38, n. 3, p. 687-698, 2019. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v38i3.13762>.

Ricardi-Branco F.; Callefo, F.; Cataldo, R.A.; Noffke, N.; Pessenda, L.C.R.; Vidal, A.C.; Branco, F.C. Microbial Biofacies and the Influence of Metazoans in Holocene Deposits of the Lagoa Salgada, Rio De Janeiro State, Brazil. **Journal of Sedimentary Research**, v. 88, n. 11, p. 1300-1317, 2018. <https://doi.org/10.2110/jsr.2018.64>.

Rodrigues, S.C.; Simões, M.G.; Leme, J.M. Tafonomia comparada dos Conulatae (Cnidaria), Formação Ponta Grossa (Devoniano), Bacia do Paraná, Estado do Paraná. **Brazilian Journal of Geology**, v. 33, n. 4, p. 381-390, 2003. Available on: <<http://pgegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9797>>. Accessed on 03 nov. 2020.

Scheffler, S.M.; Francisco, A.P.S.; Bosetti, E.P. Sobre os Equinodermos Devonianos da Bacia do Paraná: Mudanças Faunísticas e Implicações para a Utilidade Bioestratigráfica. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 40, n. 3, p. 102-116, 2019. http://dx.doi.org/10.11137/2017_3_102_116.

Schubert, G.; Borghi, L. Sobre a ocorrência inédita de uma taoflora devoniana na região de Chapada dos Guimarães (Bacia do Paraná, MT). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 63, p. 95-96, 1991. Available on: <<http://memoria.bn.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=158119&pagfis=30892>>. Accessed on 20 set. 2020.

Soares, S.P.; Simoes, M.G.; Leme, J.M. O papel da fossilização e do intemperismo na sistemática de trilobites Phacopida (Calmoniidae e Homalonotidae) do Devoniano da bacia do Paraná, Brasil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 11, n. 2, p. 117-128, 2008. <https://doi.org/10.4072/rbp.2008.2.04>.

Soares, S.P.; Simões, M.G.; de Leme, J.M. Metacryphaeus rotundatus, um novo elemento da fauna de trilobites Calmoniidae (Phacopida), da Formação Ponta Grossa (Devoniano), Bacia do Paraná, Brasil. **Geologia USP. Série Científica**, v. 8, n. 1, p. 14-24, 2008. <http://dx.doi.org/10.5327/z1519-874x2008000100002>.

Vieira, G.A.G.; Ghilardi, R.P.; Caminha, D.S.F. da F.; Ribeiro, V.R. Descrição de uma fácies tafonômica vegetal do Grupo Chapada (Devoniano da Bacia do Paraná), município de Jaciara/MT. In: 69º Congresso Brasileiro de Botânica, 2018, Cuiabá - MT. **Anais do 69º Congresso Nacional de Botânica**, 2018. p. s/n. Available on <<http://botanica.org.br/anaisconsulta/69CNBot>>. Accessed on 20 set. 2020.

Zabini, C. **Lingulídeos da Sucessão Devoniana da Bacia do Paraná, região dos Campos Gerais, Brasil: revisão de conceitos biológicos-ecológicos e análise tafonômica básica**. 2007. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS.

Zabini, C.; Corniskey, J.C.; Bosetti, E.P. John Mason Clarke e os lingulídeos e discinídeos dos estratos devonianos da Bacia do Paraná, Estado do Paraná, Brasil: Estado da arte. **Terr@ Plural**, v. 7, n. 43-58, 2013. <https://doi.org/10.5212/TerraPlural.v.7iEspecial.0004>.

Zalán, P.V.; Wolff, S.; Conceição, J.C. de J.; Astolfi, M.A.M.; Vieira, I.S.; Appi, V.T.; Zanotto, O.A. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. In: Simpósio Sul-brasileiro de Geologia, 3, 1987, Curitiba. **Atas do III Simpósio Sul-brasileiro de Geologia**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 441-477, 1987.

ANEXO A

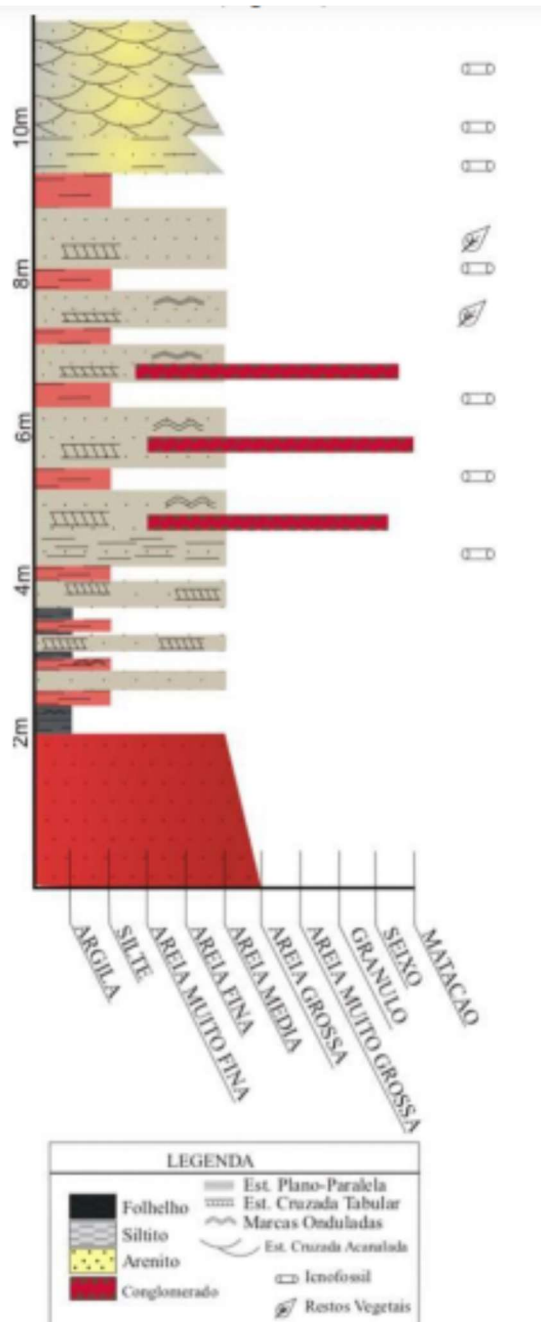


Figura 4 - Coluna estratigráfica do afloramento AJ-03.

ANEXO B

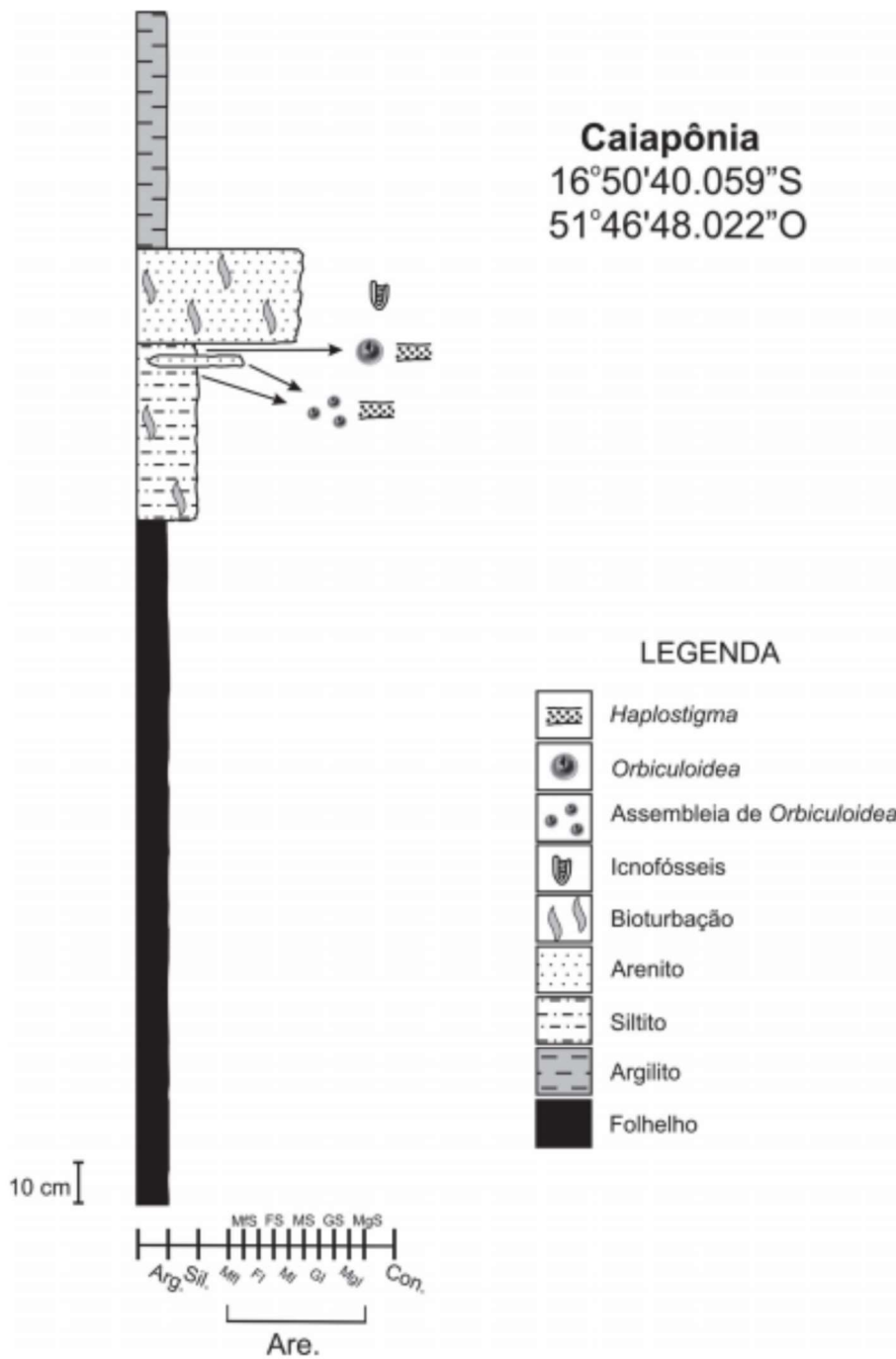


FIGURA 8: Perfil colunar do afloramento localizado próximo à cidade de Caiaipônia (51°46'48,022"O 16°50'40,059"S).

ANEXO C

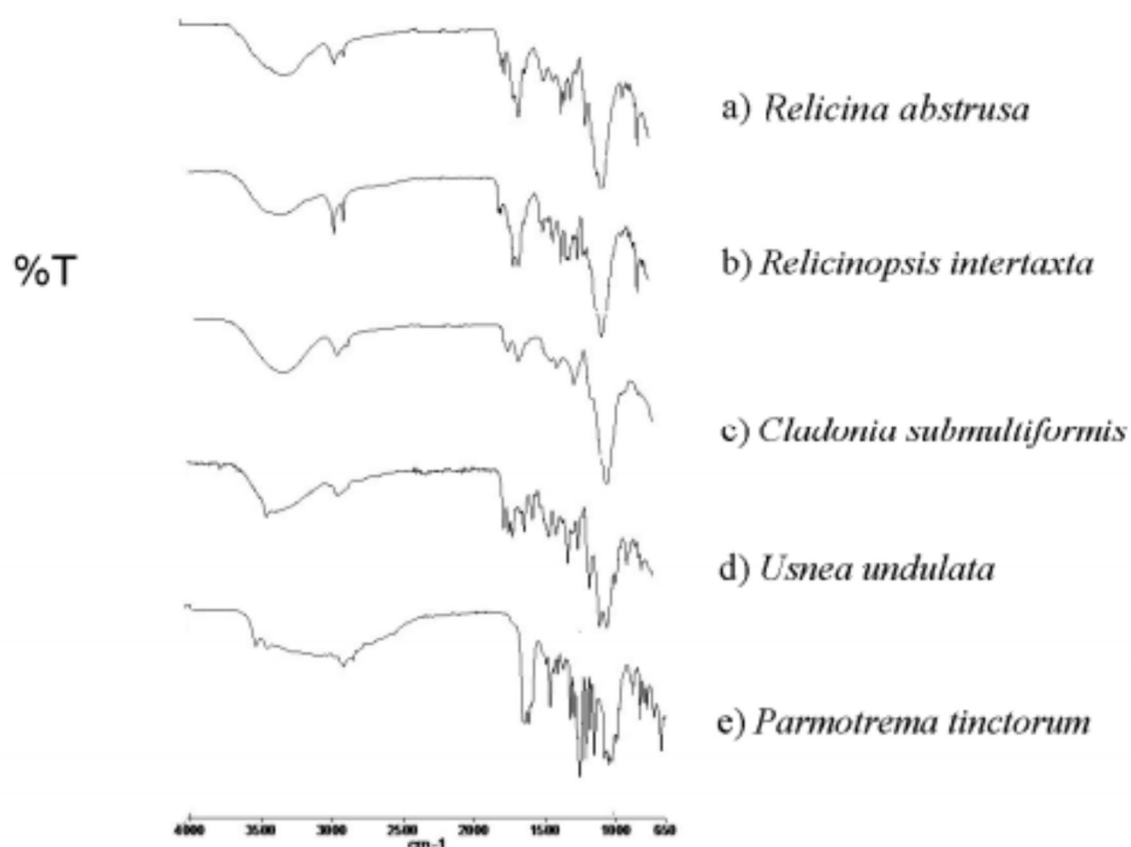
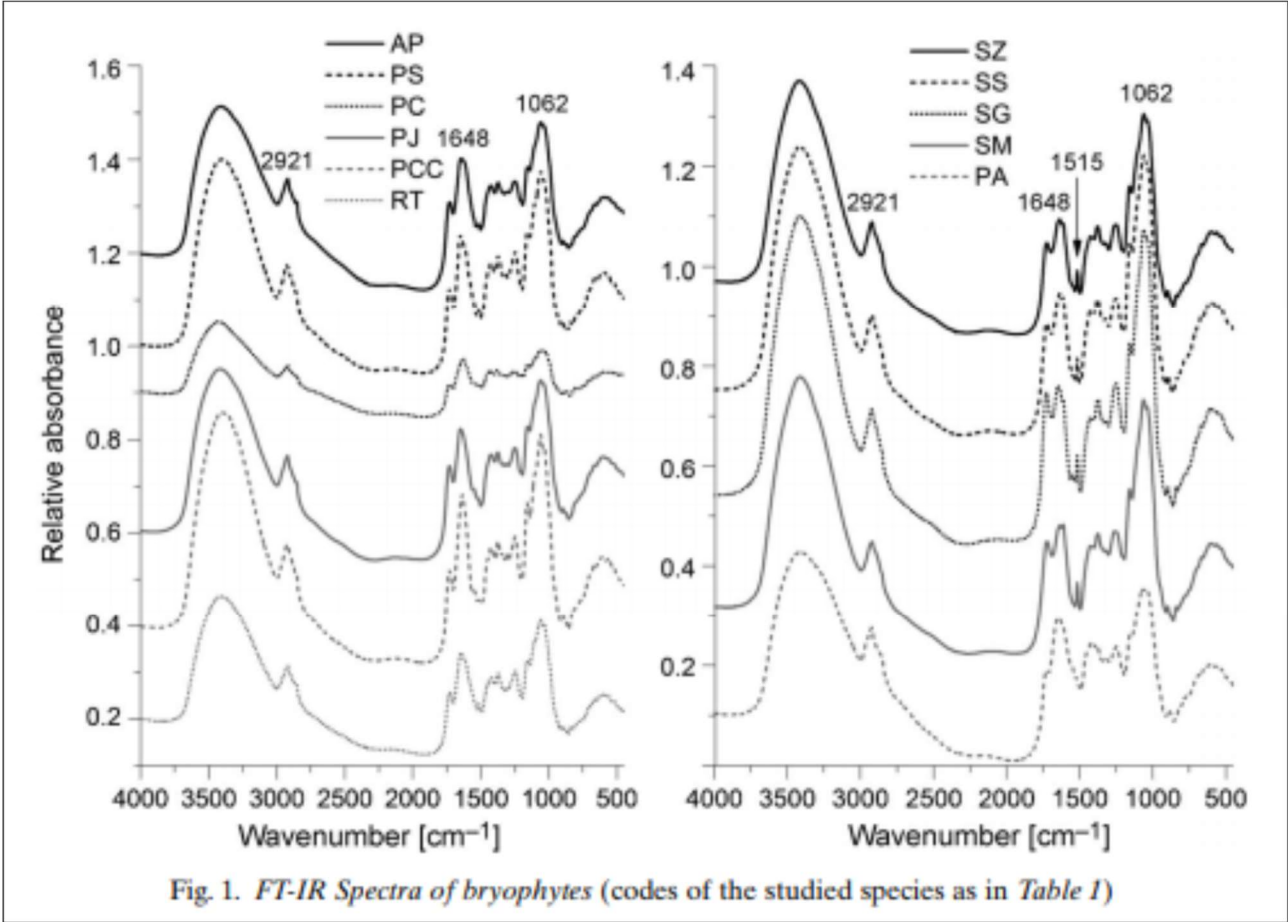


Figure 5. Comparison of FTIR Spectra of lichen in different genus: a) *Relicina abstrusa*, b) *Relicinopsis intertexta*, c) *Cladonia submultiformis*, d) *Usnea undulata* and e) *Parmotrema tinctorum*

ANEXO D



ANEXO E

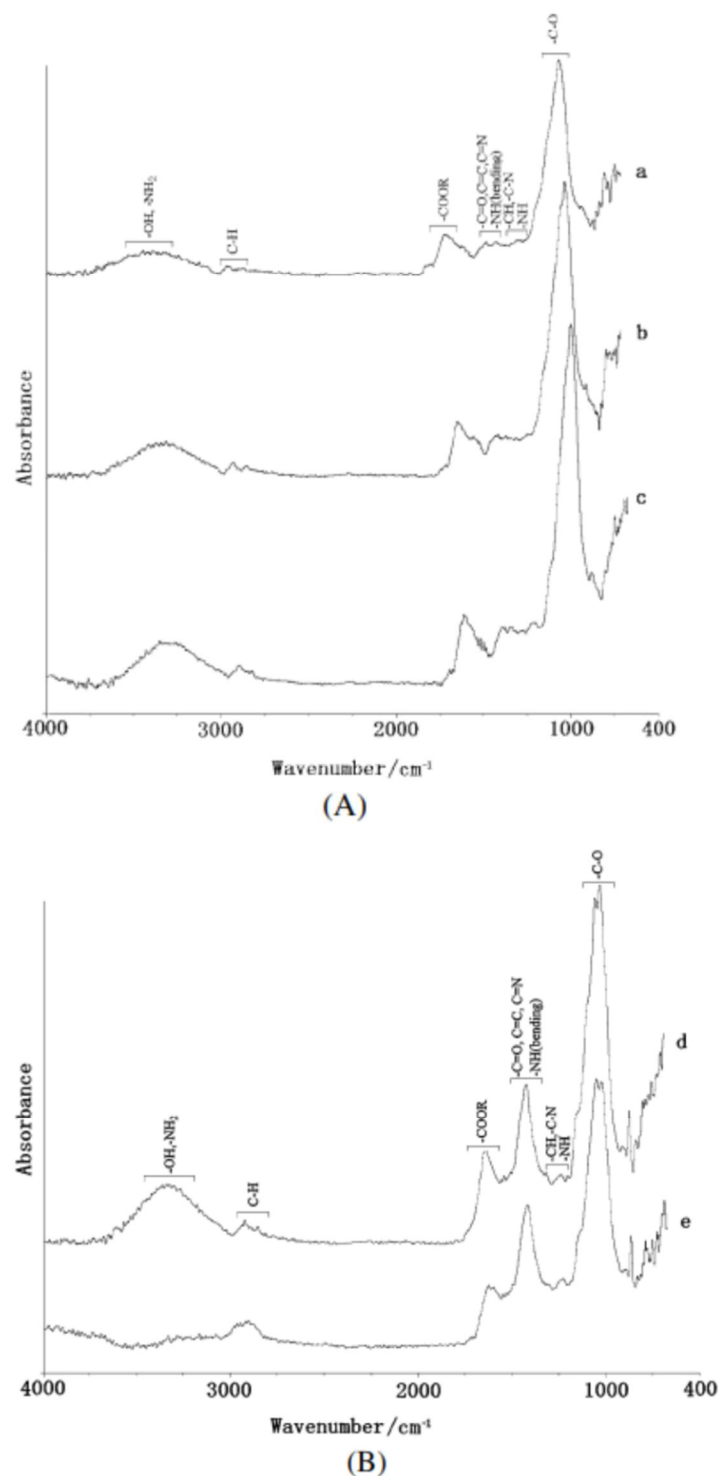


Fig. 1. (A) HATR-FT-IR spectra obtained in the 4000–650 cm⁻¹ region for the species of Sect. *Ptychomitrium* *Fueror*. Characteristic group frequencies are indicated at the top. (B) HATR-FT-IR spectra obtained in the 4000–650 cm⁻¹ region for the species of Sect. *Macromibium*. Characteristic group frequencies are indicated at the top. (a) *Ptychomitrium sinense* (Mitt.) Jaeg.; (b) *Ptychomitrium dentatum* (Mitt.) Jaeg.; (c) *Ptychomitrium polyphyloides* (C. Muell.) Par.; (d) *Macromibium ferriei* Card. Sz Ther.; (e) *Macromitrium syntrichophyllum* Ther. Etp. Vard.