

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**PALINOESTRATIGRAFIA DO POÇO CBM-001-ST-RS
(JAZIDA CARBONÍFERA DE SANTA TEREZINHA, RIO
GRANDE DO SUL), PERMIANO DA BACIA DO PARANÁ**

RAFAEL REIS BENDER

ORIENTADOR – Prof. Dr. Paulo Alves de Souza

Porto Alegre – 2020

CIP - Catalogação na Publicação

Bender, Rafael Reis

PALINOESTRATIGRAFIA DO POÇO CBM-001-ST-RS (JAZIDA CARBONÍFERA DE SANTA TEREZINHA, RIO GRANDE DO SUL), PERMIANO DA BACIA DO PARANÁ / Rafael Reis Bender. -- 2020.

99 f.

Orientador: Paulo Alves de Souza.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. Palinoestratigrafia. 2. Permiano. 3. Bacia do Paraná. 4. Palinologia. 5. Interpretação paleoambiental. I. Souza, Paulo Alves de, orient. II. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**PALINOESTRATIGRAFIA DO POÇO CBM-001-ST-RS
(JAZIDA CARBONÍFERA DE SANTA TEREZINHA, RIO
GRANDE DO SUL), PERMIANO DA BACIA DO PARANÁ**

RAFAEL REIS BENDER

ORIENTADOR – Prof. Dr. Paulo Alves de Souza

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Ana Karina Scomazzon – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

Profa. Dra. Ángeles Beri – Instituto de Ciencias Geológicas, Universidad de la República, Montevideo, Uruguai

Profa. Dra. Mercedes di Pasquo – CICYTTP/CONICET, Diamante, Argentina

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Ciências.

Porto Alegre – 2020

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-graduação em Geociências do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela infraestrutura que permitiu a elaboração desta dissertação e pelo corpo docente. Ao Conselho Nacional de desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de mestrado. Ao Prof. Dr. Wolfgang Dieter Kallkreuth, por ceder o material analisado neste estudo, e ao Dr. Mahesh Shivanna, o qual acompanhei na ocasião da amostragem e do processamento.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Alves de Souza, por todas as sugestões e críticas construtivas, que me ajudaram a aperfeiçoar este trabalho e modificaram a minha forma de enxergar a bioestratigrafia e a palinologia como um todo. A todos os colegas e amigos do Laboratório de Palinologia Marleni Marques-Toigo, sobretudo à Cristina Moreira Félix, cuja ajuda na análise e identificação taxonômica foi imprescindível para a conclusão desta dissertação.

Em especial agradeço à minha família que (além de me “obrigar” a fazer mestrado) sempre me apoiou e ajudou ao longo de todo esse tempo.

RESUMO

Em virtude da ausência de fósseis correlacionáveis com tabelas de tempo internacionais, palinomorfos têm sido utilizados como principal recurso na elaboração de esquemas bioestratigráficos na Bacia do Paraná. Para o Permiano da bacia, duas zonas de intervalo foram estabelecidas: *Vittatina costabilis* e *Lueckisporites virkkiae*, em ordem estratigráfica ascendente. Este trabalho apresenta uma avaliação da aplicabilidade e precisão das zonas supracitadas, fundamentada na caracterização palinológica do poço CBM-001-ST-RS, perfurado na região carbonífera de Santa Terezinha, Rio Grande do Sul. Lâminas de 36 níveis estratigráficos, relacionados às formações Rio Bonito, Palermo, Irati e Serra Alta, foram confeccionadas e analisadas, de modo a identificar a composição das assembleias palinológicas. Um total de 61 táxons foi identificado, sendo 16 relacionados a esporos, 36 a grãos de pólen, 8 a elementos algálicos e 1 a fungos. Os estratos mais basais da Formação Rio Bonito caracterizam-se por uma palinoflora dominada por esporos e algas, evidenciando um paleoambiente costeiro com predomínio de vegetação pteridofítica e higrófila. A partir da porção superior desta unidade, grãos de pólen bissacados e poliplicados passam a dominar as assembleias, indicando predomínio de vegetação gimnospérmica, melhor adaptada a temperaturas elevadas e a condições de estresse hídrico. A distribuição estratigráfica de certos táxons é diferente daquela constante no zoneamento vigente. *Hamiapollenites karrooensis*, espécie característica da Zona *Vittatina costabilis*, é identificada coexistindo com *Lunatisporites variesectus*, marcador da zona subjacente. A comparação dos dados obtidos a partir do material estudado com trabalhos palinológicos desenvolvidos em outras localidades do Rio Grande do Sul revela variações na distribuição estratigráfica de certos táxons-guia, cuja ocorrência pode ser atribuída a condições regionais, como a preservação do registro estratigráfico e fatores paleoambientais. Sugere-se que a abundância e a ocorrência consistente de certas espécies poderiam constituir um parâmetro bioestratigráfico mais eficiente que seu primeiro aparecimento. Zoneamentos realizados em regiões vizinhas à Bacia do Paraná apresentam diferentes graus de compatibilidade com o material estudado, mas refletem uma evolução microflorística semelhante.

Palavras Chave: Bacia do Paraná, Permiano, Bioestratigrafia, Palinoestratigrafia, Palinologia, Interpretação Paleoambiental.

ABSTRACT

Due to the absence of fossil content correlatable to international time charts, palynomorphs have been used as the main resource for the elaboration of biostratigraphic schemes in the Paraná Basin. Two interval zones have been established for the basin's Permian strata: Vittatina costabilis and Lueckisporites virkkiae, in ascending stratigraphic order. This work presents an evaluation of the applicability and precision of the forementioned zones, based on the palynological characterization of borehole CBM-001-ST-RS, drilled in the Santa Terezinha coalfield, Rio Grande do Sul State. Slides from 36 stratigraphic levels, related to the Rio Bonito, Palermo, Irati and Serra Alta formations, were mounted and analysed, in order to identify the palynological assemblages. A total of 61 taxa were identified, including 16 related to spores, 36 to pollen grains, 8 to algae and 1 to fungi. The basal strata of the Rio Bonito Formation are characterized by an algae and spore dominated palinoflora, pointing to a coastal environment with predominance of pteridophytic and hygrophilous vegetation. As from the upper portion of this unit, bisaccate and polyplicate pollen grains dominate the assemblages, indicating the prevalence of gymnospermic vegetation, better adapted to warming conditions and water scarcity. The stratigraphic distribution of certain taxa is different from that proposed by the current zonation. Hamiapollenites karrooensis, a guide-species of the Vittatina costabilis Zone, is identified coexisting with Lunatisporites variesectus, a marker of the overlying zone. Comparison between the data obtained from the studied material and those of other studies carried out in different localities of the Rio Grande do Sul State reveals variations in the stratigraphic distribution of certain guide-taxa, the occurrence of which can be attributed to regional conditions, such as the preservation of the stratigraphical record and paleoenvironmental factors. It is suggested that the abundance and the consistent occurrence of certain species could represent a more efficient biostratigraphical parameter than their first appearance datum. Biostratigraphic zonations developed in regions close to the Paraná Basin show different degrees of compatibility with the studied samples, but suggest a similar microfloristic evolution.

Keywords: Paraná Basin, Permian, Biostratigraphy, Palynostratigraphy, Palynology, Paleoenvironmental Interpretation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do poço CBM-001-ST-RS no Rio Grande do Sul.	9
Figura 2. Perfil litoestratigráfico do poço CBM-001-ST-RS e amostragem palinológica.	10
Figura 3. Localização da porção brasileira da Bacia do Paraná.....	12
Figura 4. Carta cronoestratigráfica da Supersequência Gondwana I (modificado de Holz <i>et al.</i> , 2010).	13
Figura 5. Evolução da palinobioestratigrafia do Neopaleozoico da Bacia do Paraná. Abreviações: SPg - Subzona <i>Protohaploxypinus goraiensis</i> , SCo - Subzona <i>Caheniasaccites ovatus</i> , SHk - Subzona <i>Hamiapollenites karrooensis</i>	25
Figura 6. Distribuição estratigráfica dos palinomorfos identificados no poço CBM-001-ST-RS.	33
Figura 7. Espécimes selecionados de esporos. A. <i>Punctatisporites gretensis</i> (lâmina MP-P: 13398, coordenada England Finder: M54); B. <i>Punctatisporites gretensis</i> (13414, M55/1); C. <i>Calamospora</i> sp. (13422, N59); D. <i>Verrucosisporites donarii</i> (13414, L48/1); E. <i>Verrucosisporites donarii</i> (13566, L35); F. <i>Brevitriletes cornutus</i> (13398, T53); G. <i>Horriditriletes uruguayensis</i> (13398, N58/1); H. <i>Horriditriletes uruguayensis</i> (13401, O35/4); I. <i>Lundbladispota riobonitensis</i> (13417, P42); J. <i>Granulatisporites austroamericanus</i> (13398, V45); K. <i>Laevigatosporites vulgaris</i> (13416, C54); L. <i>Kendosporites striatus</i> (13417, G44). Escala equivalente a 20 µm.	34
Figura 8. Espécimes selecionados de grãos de pólen. A. <i>Lueckisporites virkkiae</i> (lâmina MP-P: 13478, coordenada England Finder: J38/4); B. <i>Lueckisporites nyakapendensis</i> (13491, N30/3); C. <i>Staurosaccites cordubensis</i> (13468, D45/3); D. <i>Lunatisporites variesectus</i> (13477, J37/2); E. <i>Striatoabieites anaverrucosus</i> (13477, T39); F. <i>Hamiapollenites karrooensis</i> (13417, W54/4); G. <i>Vittatina subsaccata</i> (13477, D41/1); H. <i>Vittatina costabilis</i> (13477, E47); I. <i>Pakhapites fusus</i> (13413, Q40); J. <i>Weylandites lucifer</i> (13477, R54/1); K. <i>Plicatipollenites gondwanensis</i> (13497, V34/1); L. <i>Potonieisporites congoensis</i> (13491, S47). Escala equivalente a 20 µm.	35

Figura 9. Espécimes selecionados de elementos algálicos e fungos. A. *Quadrisporites horridus* (lâmina MP-P: 13398, coordenada England Finder: Z48/4); B. *Quadrisporites lobatus* (13398, C40); C. *Quadrisporites lobatus* (13398, U54/4); D. *Tetraporina* (13406, G35); E. *Tetraporina* (13406, N35/1); F. *Tasmanites* sp. (13404, S35/2); G. *Botryococcus braunii* (13425, F55/2); H. *Botryococcus braunii* (13417, T56/4); I. *Pilasporites* (13406, U36/3); J. *Pilasporites* (13406, M55/2); K. *Portalites gondwanensis* (13404, R42/4); L. *Portalites gondwanensis* (13417, D55). Escala equivalente a 20 µm.36

Figura 10. Acritarcos do Complexo *Michrystidium* (fotomicrografias sob luz fluorescente). Lâmina MP-P: 13473, coordenadas England Finder: A. G41; B. J51/4; C. W53/3; D. H36; E. F46/4; F. P29. Escala equivalente a 20 µm.37

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Datações radiométricas obtidas para o Permiano da Bacia do Paraná....30

Quadro 2. Lista taxonômica de palinomorfos identificados no poço CBM-001-ST-RS.
.....31

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	2
LISTA DE FIGURAS	3
LISTA DE QUADROS	4
SUMÁRIO	5
SOBRE A ESTRUTURA DESTA DISSERTAÇÃO:	6
1 TEXTO INTEGRADOR	7
1.1 Introdução.....	7
1.2 Objetivos.....	8
1.3 Materiais e métodos.....	9
1.4 Estado da arte	11
1.4.1 Contexto geológico.....	11
1.4.1.1 Bacia do Paraná	11
1.4.1.2 Formação Rio Bonito	14
1.4.1.3 Formação Palermo	15
1.4.1.4 Formação Irati.....	16
1.4.1.5 Formação Serra Alta.....	17
1.4.2 Palinoestratigrafia.....	18
1.4.3 Cronoestratigrafia.....	26
1.5 Resultados.....	30
1.6 Discussão	38
1.6.1 Bioestratigrafia	38
1.6.2 Considerações paleoambietais	44
1.7 Conclusões	45
REFERÊNCIAS	48
2 ARTIGO	62
3 COMPLEMENTO	96

SOBRE A ESTRUTURA DESTA DISSERTAÇÃO:

Esta dissertação de mestrado está organizada com base em um artigo submetido a periódico científico classificado no estrato Qualis-CAPES A3 (tabela recente e inédita), conforme as normas do Programa de Pós-graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Sua organização compreende as seguintes partes principais:

1 TEXTO INTEGRADOR: Introdução abordando o objeto da pesquisa, objetivos, materiais e métodos, bem como o estado da arte. Aborda ainda os dados obtidos, incluindo a caracterização das assembleias palinológicas e discussão de suas implicações biostratigráficas e paleoambientais. Ao final consta a lista de referências consultadas.

2 ARTIGO: Compreende o manuscrito intitulado “*Palynostratigraphic analysis of a Permian section from southern Paraná Basin in Brazil, Western Gondwana*”, desenvolvido pelo autor durante seu mestrado e submetido para publicação à revista *Journal of South American Earth Sciences*.

3 COMPLEMENTO: Anexo contendo a correspondência referente ao recebimento da submissão do manuscrito acima mencionado pelo *Journal of South American Earth Sciences*.

1 TEXTO INTEGRADOR

1.1 Introdução

O início da sedimentação permiana na Bacia do Paraná sucede os estágios finais da glaciação que cobriu grande parte do Gondwana durante o Neocarbonífero (Fielding *et al.*, 2008; López-Gamundi & Buatois, 2010; Valdez Buso *et al.*, 2019, 2020). Com a migração do paleocontinente em direção ao norte e a progressiva deglaciação, inicia-se uma fase de melhoria climática e subida gradual do nível do mar (Milani *et al.*, 2007), a qual foi denominada “Transgressão Permiana” por Lavina & Lopes (1986). No domínio sul da bacia, a sedimentação característica desse intervalo materializa-se nas rochas do Grupo Guatá (Formações Rio Bonito e Palermo) e início do Grupo Passa Dois (Formações Irati e Serra Alta).

Apesar de bem caracterizadas do ponto de vista litoestratigráfico, o posicionamento cronoestratigráfico destas unidades ainda apresenta uma série de questões devido à escassez de elementos bioestratigráficos correlacionáveis com as escalas internacionais de tempo geológico, tais como amonoides, foraminíferos e conodontes. Nesse contexto, a palinologia tem se destacado como uma excelente ferramenta, graças à abundância de elementos palinológicos ao longo de toda a bacia.

Desde o trabalho pioneiro, desenvolvido por Daemon (1966) e aprofundado por Daemon & Quadros (1970), a palinologia tem se mostrado um dos recursos mais eficientes para o zoneamento bioestratigráfico do Neopaleozoico da Bacia do Paraná. Com base em 31 poços exploratórios perfurados pela PETROBRÁS, Daemon & Quadros (1970) propuseram um esquema bioestratigráfico constituído por seis biozonas, designadas por letras (G, H, I, J, K e L), sendo algumas divididas ainda em subintervalos. Desde então, uma série de contribuições tem sido feitas no sentido de formalizar e aprimorar o zoneamento da bacia (Marques-Toigo, 1991; Souza & Marques-Toigo, 2001; Souza & Marques-Toigo, 2003), culminando com o esquema bioestratigráfico atual, proposto por Souza & Marques-Toigo (2005) e Souza (2006).

Embora a aquisição e análise de novos dados já tenha aumentado consideravelmente o conhecimento sobre a palinologia da Bacia do Paraná, a palinoestratigrafia está em constante aperfeiçoamento e ainda enfrenta problemas, tais como a calibração das idades das biozonas a partir de dados radiométricos. A partir do início do século, visando um aprimoramento desse quadro, uma série de

trabalhos abordando datações absolutas dos estratos Neopaleozoicos da Bacia do Paraná foi publicada. A maior disponibilidade de idades absolutas em unidades como as formações Rio Bonito e Irati constituiu um novo parâmetro para balizar a bioestratigrafia. No entanto, muitos dados ainda se mostram conflitantes, originando esquemas estratigráficos e geocronológicos frequentemente inconciliáveis entre si e levantando novas questões relativas às metodologias empregadas. Por outro lado, a maioria destes estudos é relativa à área da bacia no Rio Grande do Sul, especialmente à Formação Rio Bonito. Dados relativos aos demais intervalos e áreas da bacia são mais escassos, de modo que a calibração das idades ainda depende em grande parte de correlações com outras bacias no Brasil e no Exterior, onde há maior disponibilidade de datações.

Esta dissertação apresenta a análise palinológica da seção paleozoica do poço HN-001-ST-RS, Rio Grande do Sul, correspondente ao intervalo entre as formações Rio Bonito, Palermo, Irati e Serra Alta.

1.2 Objetivos

O objetivo deste estudo é a identificação do conteúdo palinológico presente no poço CBM-001-ST-RS, para o entendimento da sucessão entre as zonas *Vittatina costabilis* e *Lueckisporites virkkiae*. Através da caracterização das assembleias palinológicas, pretende-se:

- Descrever a evolução da microflora registrada nas rochas das formações Rio Bonito, Palermo, Irati e Serra Alta, em testemunhagem contínua realizada na jazida carbonífera de Santa Terezinha, ampliando a amostragem e caracterização palinológica para o Permiano da Bacia do Paraná.
- Avaliar a aplicabilidade e eficiência do zoneamento bioestratigráfico de Souza & Marques-Toigo (2005).
- Comparar o esquema supracitado e o conteúdo palinológico identificado neste estudo com zoneamentos realizados em diversas regiões do Gondwana, de modo a reconhecer eventuais semelhanças e avaliar a possibilidade de correlações.

1.3 Materiais e métodos

Este trabalho é baseado em amostras provenientes do poço CBM-001-ST-RS, perfurado na jazida carbonífera de Santa Terezinha, Município de Osório, Rio Grande do Sul (Figuras 1 e 2), o qual foi estudado para fins de potencial carbonífero por Kallkreuth *et al.* (2013). O processamento das amostras e a confecção das lâminas se deram no Laboratório de Palinologia Marleni Marques-Toigo (Departamento de Paleontologia, Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, LPMMT/UFRGS), e seguiram a metodologia padrão para amostras palinológicas do Paleozoico (Quadros & Melo, 1987).



Figura 1. Localização do poço CBM-001-ST-RS no Rio Grande do Sul.

A preparação consiste na dissolução de amostras de rocha previamente desagregadas em ácido clorídrico (HCl) e fluorídrico (HF), de modo a eliminar a

matriz mineral carbonática e silicática, gerando como produto um resíduo rico em material palinológico. Posteriormente, o resíduo é peneirado, concentrando a fração de matéria orgânica particulada entre 25 μm e 250 μm , a qual é utilizada na elaboração das lâminas palinológicas. As 169 lâminas confeccionadas para este estudo estão depositadas na Palinoteca do Museu de Paleontologia do Departamento de Paleontologia e Estratigrafia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob os códigos MP-P: 13398 a 13567. A análise das lâminas e identificação dos palinomorfos foram realizadas em microscópio óptico, sob luz branca e fluorescente, utilizando objetivas de 40x e 100x.

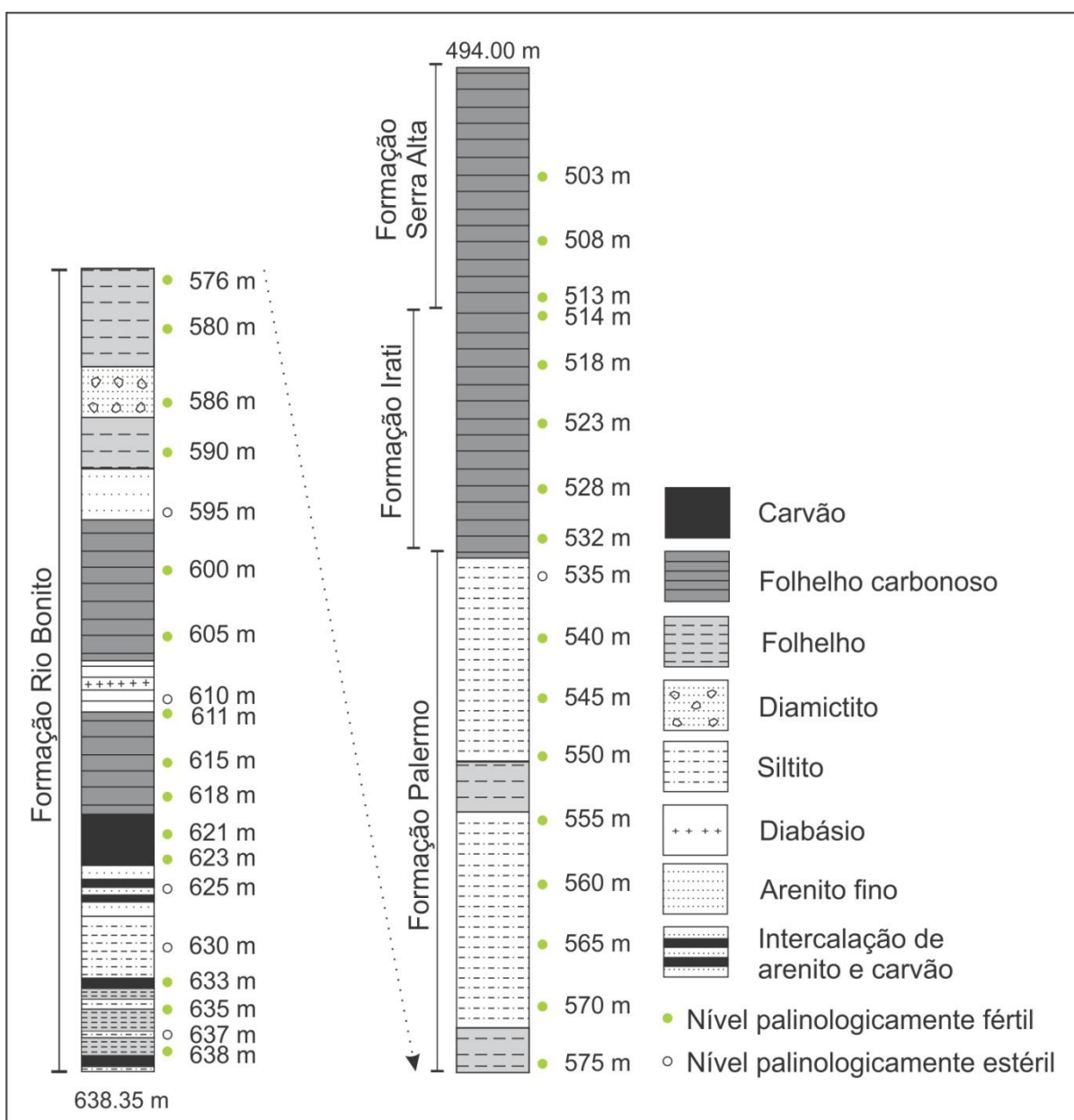


Figura 2. Perfil litoestratigráfico do poço CBM-001-ST-RS e amostragem palinológica.

Para interpretação bioestratigráfica, as assembleias de palinomorfos identificados em cada nível foram comparadas com aquelas constantes nos zoneamentos bioestratigráficos mais atuais para o Permiano da Bacia do Paraná (Souza & Marques-Toigo, 2003; Souza & Marques-Toigo, 2005; Souza, 2006).

1.4 Estado da arte

1.4.1 Contexto geológico

Neste capítulo são abordados os principais aspectos referentes à litoestratigrafia da Bacia do Paraná e da Supersequência Gondwana I. Uma breve introdução a respeito da história deposicional do Neopaleozoico da bacia é apresentada. As unidades compreendidas nesta dissertação são exploradas em maior detalhe, contemplando suas faciologias, ambientes deposicionais e conteúdo paleontológico. A palinoestratigrafia e sua relação com a geocronologia serão abordadas nos capítulos seguintes.

1.4.1.1 Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná é uma grande bacia intracratônica localizada na porção centro-leste da América do Sul. Possui uma área de aproximadamente 1.700.000 km², estendendo-se sobre porções do Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai. Trata-se de uma sinéclise, cujo eixo maior encontra-se na direção NE-SW (Figura 3). O preenchimento da bacia foi condicionado por ciclos tectono-eustáticos paleozoicos e mesozoicos e é constituído por quase 5.000 m de rochas sedimentares, além de vulcânicas.

A estratigrafia da Bacia do Paraná tem sido tema de inúmeras publicações desde o trabalho pioneiro, o relatório de White (1908). A vasta bibliografia inclui estudos dedicados à litoestratigrafia, estratigrafia de sequências, cronoestratigrafia e bioestratigrafia, dentre os quais se encontram tanto publicações de cunho regional, como mais abrangentes. Embora a literatura atual ofereça um panorama relativamente sofisticado no que diz respeito à litoestratigrafia, o mesmo não pode ser dito a respeito do posicionamento cronoestratigráfico das rochas da bacia, o qual ainda apresenta questões não resolvidas em virtude da ausência de elementos bioestratigráficos correlacionáveis com escalas internacionais de tempo geológico.

Milani (1997) propôs a divisão aloestratigráfica da Bacia do Paraná em seis Supersequências, as quais correspondem a pacotes rochosos cuja deposição ocorreu ao longo de algumas dezenas de milhões de anos: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). Os limites de cada supersequência são definidos por superfícies de discordância de caráter interregional.

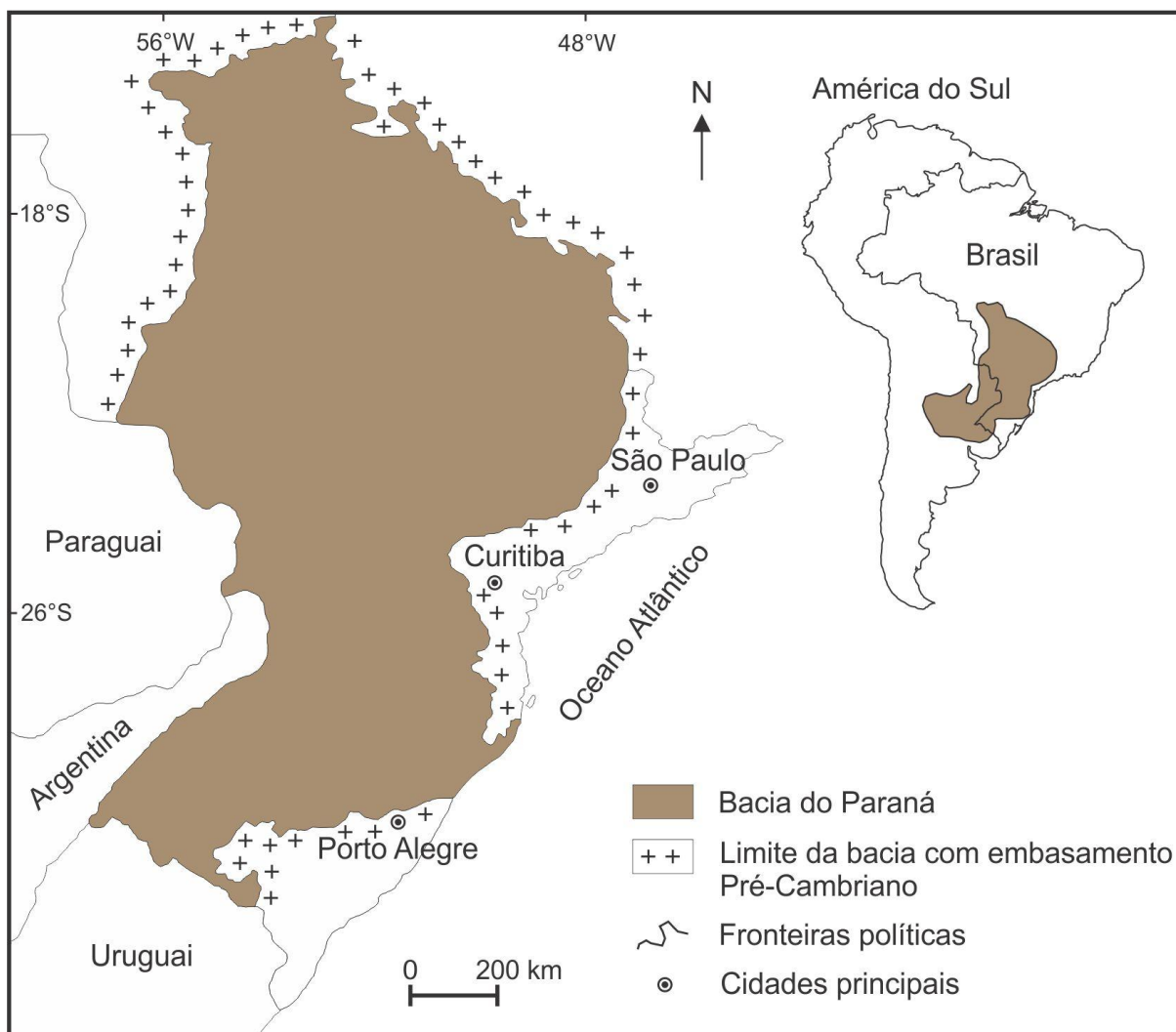


Figura 3. Localização da porção brasileira da Bacia do Paraná.

O registro sedimentar da Supersequência Gondwana I é composto por rochas características de grande variedade de ambientes, as quais refletem a história deposicional da unidade, desde uma sedimentação com significativa influência glacial, durante o Neocarbonífero (Fielding *et al.*, 2008; López-Gamundi & Buatois, 2010), até um árido interior continental no início do Mesozoico. Do ponto de vista litoestratigráfico, a Supersequência Gondwana I é constituída pelos pacotes

rochosos do Grupo Itararé, Formação Aquidauana, Grupo Guatá, Grupo Passa Dois, Formação Pirambóia e Formação Sanga do Cabral (Figura 4), os quais compreendem o intervalo temporal entre o Moscoviano (Neocarbonífero) e Scythiano (Eotriássico).

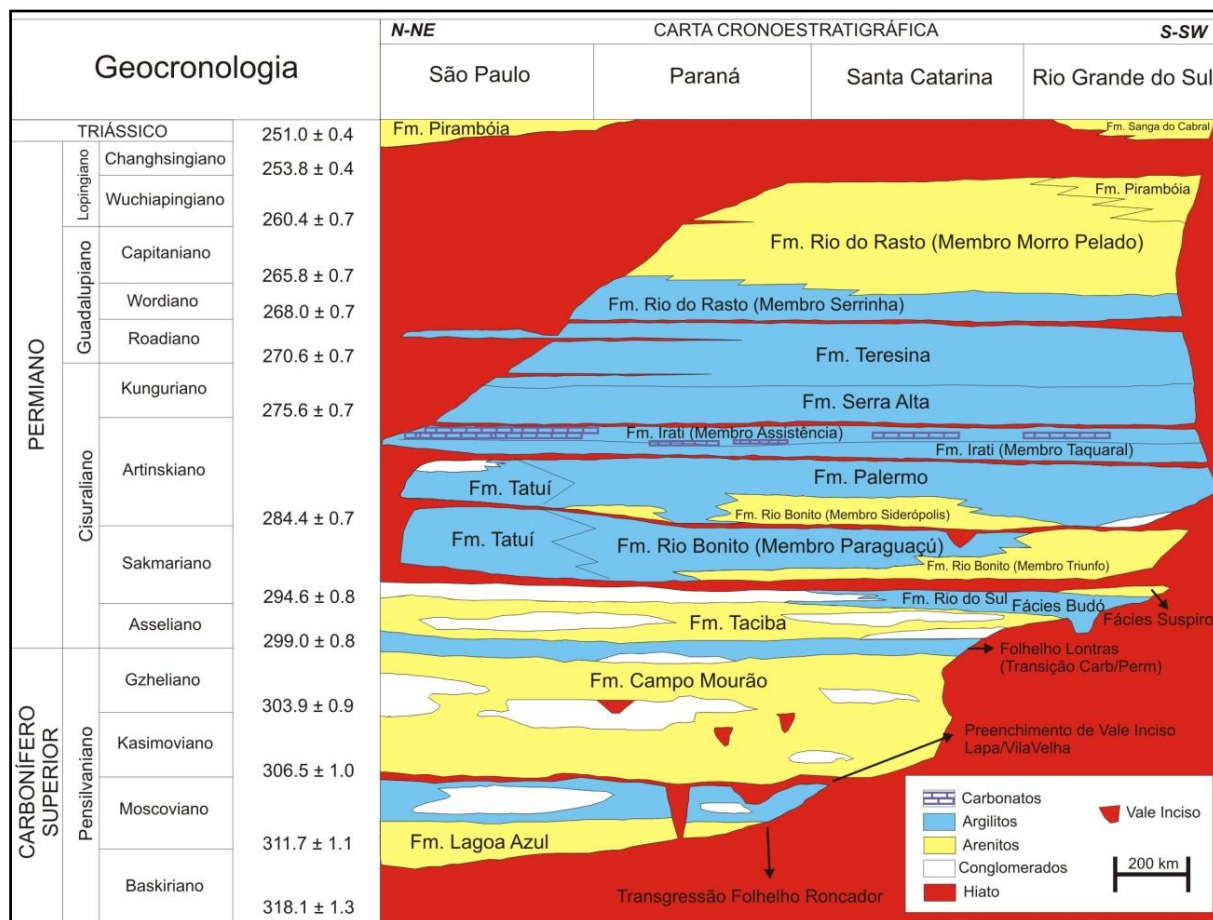


Figura 4. Carta cronoestratigráfica da Supersequência Gondwana I (modificado de Holz *et al.*, 2010).

Conforme a síntese evolutiva da unidade apresentada por Milani *et al.* (2007), o começo da história sedimentar da Supersequência Gondwana I se deu a partir do degelo dos glaciares que cobriam esta parte do Gondwana durante o Missisipiano. Esse processo teve início durante o Moscoviano, com a migração do paleocontinente em direção ao norte, e materializou-se nas rochas do Grupo Itararé e Formação Aquidauana. A deglaciação teve influência direta em uma subida do nível relativo do mar, que caracterizou o início de uma transgressão durante o Permiano. Nesse contexto depositaram-se as rochas referentes ao Grupo Guatá, inicialmente em um ambiente flúvio-deltaico (Formação Rio Bonito) e posteriormente em um ambiente marinho raso (Formação Palermo). A tendência transgressiva se

manteve durante a deposição das Formações Irati e Serra Alta, caracterizadas, respectivamente, pelo surgimento de um golfo hipersalino e seu posterior afogamento, formando um ambiente marinho de baixa energia (Holz *et al.*, 2010).

Uma tendência regressiva em grande escala começa a se manifestar na bacia a partir da deposição da porção superior do Grupo Passa Dois, quando depósitos pelíticos com estruturas ainda ligadas à ação de marés (Formação Teresina) são substituídos por um complexo progradacional de *red beds* (Milani *et al.*, 2007). A bacia passa então a ser dominada por sistemas continentais, incluindo ambientes flúvio-deltaicos, lacustres e eólicos, caracterizando a Formação Rio do Rasto.

1.4.1.2 Formação Rio Bonito

White (1908) foi o primeiro a utilizar o termo “Rio Bonito”, ao chamar de “Camadas Rio Bonito” o pacote de arenitos, folhelhos e leitos de carvão expostos na região de Lauro Muller, Santa Catarina. Desde seu descobrimento, a unidade tem sido alvo de inúmeros trabalhos de pesquisa, impulsionados pelo grande interesse econômico despertado por suas camadas de carvão. Do ponto de vista da palinologia, destacam-se as contribuições realizadas nos carvões e litologias associadas da região de Candiota-Hulha Negra, abordando sobretudo aspectos taxonômicos e paleoambientais (e.g., Pant & Srivastava, 1965; Tiwari & Navale, 1967; Nahuys *et al.*, 1968; Corrêa da Silva & Marques-Toigo, 1975; Marques-Toigo *et al.*, 1975; Ybert, 1975; Meyer & Marques-Toigo, 2000; Cazzulo-Klepzig *et al.*, 2005; Mori & Souza, 2010; Mori & Souza, 2012; Mori *et al.*, 2012).

A Formação Rio Bonito é constituída pelo pacote sedimentar depositado imediatamente acima do Grupo Itararé e é composta, segundo Schneider *et al.* (1974), por uma seção basal arenosa, uma média predominantemente argilosa, e uma superior, areno-argilosa. Os autores propuseram a formalização desses três intervalos como unidades estratigráficas separadas, denominando-os como membros, respectivamente: Triunfo, Paraguaçu e Siderópolis. A deposição da Formação Rio Bonito teria ocorrido, portanto, inicialmente em um contexto flúvio-deltaico, passando por um ambiente marinho raso e, por fim, costeiro. Milani (2007) comenta que tal divisão reflete a notável ciclicidade sedimentar característica da unidade, condicionada por oscilações do nível de base na bacia de acumulação.

Embora a divisão da Formação Rio Bonito em três membros seja observável em diversas localidades, nem todas as regiões da bacia refletem esta característica.

No Rio Grande do Sul, por exemplo, a formação não é formalmente subdividida e as fácies marinhas correspondentes ao Membro Paraguaçu não foram sequer identificadas (Holz *et al.*, 2010).

Holz *et al.* (2010) descrevem a associação de fácies característica do intervalo flúvio-deltaico presente na base da unidade como um pacote composto por ortoconglomerados e arenitos subarcóseos finos a grossos com estratificação cruzada planar e acanalada, apresentando ciclos granodecrescentes ascendentes, encimados por lamitos e carvão, sendo os interflúvios caracterizados por fácies lamosas com níveis de carvão. Os autores referem-se ao ambiente deposicional típico da porção superior da formação como um sistema estuarino influenciado por ondas e maré, evoluindo para um sistema laguna-barreira. A associação de fácies correspondente é caracterizada por quartzarenitos com estratificação cruzada tabular, estratificação plano-paralela (muitos níveis com estratificação *flaser*, *mud drapes* e estratificação ondulada) e lamitos maciços ou laminados com estratificação lenticular ou ondulada (Holz *et al.*, 2010).

Entre os fósseis mais característicos da unidade estão restos vegetais atribuídos à Flora *Glossopteris*, incluindo compressões e impressões de troncos, frondes e folhas (Rösler, 1978; Iannuzzi & Souza, 2005; Boardman *et al.*, 2012a, 2012b). Rocha-Campos & Rösler (1978) descreveram uma ocorrência de megafauna marinha dominada por bivalves na porção média da Formação Rio Bonito em Santa Catarina, a qual foi denominada “Assembléia de Taió”.

1.4.1.3 Formação Palermo

A Formação Palermo foi nomeada em referência à vila de mesmo nome no município de Lauro Müller, Santa Catarina, onde White (1908) descreveu sua seção tipo. Seu contato inferior é concordante com a Formação Rio Bonito, ocorrendo diretamente sobre a Formação Aquidauana em Mato Grosso e Goiás ou sobre o embasamento em certas porções do Rio Grande do Sul (Schneider *et al.*, 1974). A unidade abrange toda a Bacia do Paraná, sendo suas maiores espessuras registradas na porção sul da bacia (Schneider *et al.*, 1974).

As principais fácies da formação são lamitos de colorações cinza claro a escuro e arenitos finos com estratificação hummocky e ondulada, apresentando coloração amarelada quando aflorantes, devido ao intemperismo (Holz *et al.*, 2010). A bioturbação é uma característica comum a toda a unidade, com predominância do

icnogênero *Teichichnus* (Milani, 2007; Holz *et al.*, 2010) e frequentemente resulta na quase total destruição das estruturas sedimentares (Schneider *et al.*, 1974). O ambiente deposicional da formação é interpretado como marinho raso transgressivo, abaixo do nível de ação das ondas (Schneider *et al.*, 1974; Holz *et al.*, 2010).

A Formação Palermo inclui o intervalo de máxima inundação da Supersequência Gondwana I (Milani, 1997) e constitui importante datum bioestratigráfico relacionado ao intervalo K de Daemon & Quadros (1970), indicando o início de uma fase de estabilização da Bacia do Paraná. Klepzig *et al.* (1989) descrevem um marco paleoecológico caracterizado pela presença de acritarcos (complexos *Michrystidium* e *Veryachium*) ocorrendo desde porção média da Formação Palermo até a base da Formação Irati.

O conteúdo fossilífero da unidade é relativamente escasso, incluindo fragmentos de troncos silicificados de *Dadoxylon* sp. (Schneider *et al.*, 1974), dentes de anfíbios atribuídos ao gênero *Loxomma* (Putzer, 1954) e conchas de bivalves da espécie *Guiratinga mendesi* (Petri & Fúlfaro, 1966).

1.4.1.4 Formação Irati

A Formação Irati situa-se estratigraficamente acima da Formação Palermo, com a qual apresenta contato concordante, e é caracterizada por um pacote de folhelhos e argilitos cinza escuro, folhelhos pirobetuminosos cinza escuro e calcáreos (Schneider *et al.*, 1974). O nome “Irati” advém da cidade homônima no Paraná (White, 1908).

Dois membros compõem a Formação Irati: O Membro Taquaral, constituído pela sequência de folhelhos e siltitos presentes na base da formação, e o Membro Assistência, composto por folhelhos cinza escuro, folhelhos pretos pirobetuminosos e calcáreos associados (Barbosa & Almeida, 1949; Barbosa & Gomes, 1958).

O Membro Taquaral apresenta, como única estrutura sedimentar, a laminação paralela e seu ambiente deposicional é interpretado como marinho raso epicontinental, com conexão muito restrita ao mar aberto (Schneider *et al.*, 1974; Holz *et al.*, 2010). O Membro Assistência, por sua vez, apresenta laminação paralela como principal estrutura sedimentar nos leitos pirobetuminosos, sendo os leitos carbonáticos caracterizados por marcas ondulares, laminação cruzada e convoluta, oolitos, brechas intraformacionais e laminação algálica (Schneider *et al.*, 1974). A alternância entre essas duas litologias configura estratificação rítmica (Schneider *et*

al., 1974). A deposição do Membro Assistência teria ocorrido em um ambiente marinho raso, cuja única possível conexão com o Pantalassa estaria localizada no extremo sul da América do Sul (Holz *et al.*, 2010). A circulação de águas nesse ambiente teria sofrido uma redução ainda maior em relação à unidade anterior, possibilitando que o influxo de águas continentais gerasse regiões marginais dominadas por água doce, paralelamente a outras áreas, onde condições hipersalinas dominariam (Araújo, 2001; Holz *et al.*, 2010).

A Formação Irati apresenta conteúdo paleontológico muito abundante e diversificado, incluindo vertebrados, crustáceos, insetos e troncos atribuídos a Glossopteridales, Cordaitales e Coniferales (Rösler *et al.*, 1981; Pinto & Ornellas, 1981; Lavina, 1991; Castro *et al.*, 1993; Assine *et al.*, 2003; Soares, 2003; Lages, 2004; Chahud, 2007; Silva, 2011; Guerra-Sommer *et al.*, 2014). Localmente, destaca-se também a presença de grandes estromatólitos (Fairchild *et al.*, 1985; Suguio & Souza, 1985; Ricardi-Branco *et al.*, 2006). A fauna de vertebrados da formação tornou-se célebre por apresentar dois gêneros de répteis marinhos (*Mesosaurus* e *Stereosternum*) utilizados por Du Toit (1927) para evidenciar a teoria da deriva continental.

1.4.1.5 Formação Serra Alta

A Formação Serra Alta distribui-se entre os Estados do Rio Grande do Sul e Paraná, sendo equivalente à parte basal da Formação Corumbataí na porção norte da bacia (Schneider *et al.*, 1974). Apresenta contato concordante com a Formação Irati, à qual se sobrepõe (Schneider *et al.*, 1974). A unidade é constituída por uma sequência de argilitos, folhelhos e siltitos cinza escuro a pretos, além de concreções carbonáticas, cujas estruturas sedimentares resumem-se a laminações paralelas, observadas localmente (Schneider *et al.*, 1974).

As litofácies da Formação Serra Alta caracterizam um ambiente marinho, abaixo do nível de ação das ondas, apresentando condições predominantemente disóxicas (Schneider *et al.*, 1974; Araújo, 2001). Tal ambiente teria sido menos estagnante que aquele característico do Membro Assistência, constituindo corpos d'água menos estratificados (Araújo, 2001) e representando um episódio de afogamento do Golfo Irati (Milani, 2007). A ausência de litofácies proximais na Formação Serra Alta permite inferir que o mar relativamente profundo onde a unidade se depositou ultrapassava o limite atual da bacia em direção leste (Holz *et*

al., 2010). Paleontologicamente, a unidade se caracteriza pela presença de bivalves (Meghioratti, 2006), além de coprólitos, dentes e escamas de peixes encontrados em *bone beds* ou dispersos (Holz *et al.*, 2010).

1.4.2 Palinoestratigrafia

O intervalo Neopaleozoico da Bacia do Paraná, correspondente à Supersequência Gondwana I, é caracterizado por ciclos transgressivos e regressivos ocorridos entre o Pennsylvaniano e o Permiano (Milani, 1997). A unidade apresenta abundante registro paleontológico, no qual se incluem vertebrados, invertebrados, plantas e inúmeros microfósseis. Ao longo do século XX, motivados pela exploração dos bens minerais da bacia, diversos trabalhos foram produzidos, tanto no âmbito da estratigrafia como da bioestratigrafia e paleontologia, aumentando consideravelmente o conhecimento sobre o intervalo em questão. Nesse contexto, alguns zoneamentos bioestratigráficos foram propostos, tendo como base variados grupos fósseis, os quais contribuíram para a datação, correlação e reconstituição paleoambiental de muitas unidades. Entre as ferramentas mais eficientes utilizadas no zoneamento bioestratigráfico do Neopaleozoico da Bacia do Paraná, destaca-se a palinoestratigrafia (Figura 5), cujo marco inicial se dá com os trabalhos de Daemon (1966) e Daemon & Quadros (1970).

A palinologia consiste no estudo de microfósseis de parede orgânica e, portanto, abrange uma diversa gama de grupos biológicos, oriundos dos mais diversos ecossistemas. Por serem produzidos em grandes números e apresentarem uma dispersão muito eficiente, os esporomorfos constituem o grupo mais importante de palinomorfos continentais do ponto de vista da bioestratigrafia, embora algas e fungos também possam desempenhar papéis cruciais em determinadas unidades. No ambiente marinho, destacam-se grupos como os acritarcos, dinoflagelados e quitinozoários, entre outros. Tanto os palinomorfos continentais como os marinhos aparecem em grandes quantidades no registro fóssil e têm grande potencial de preservação, o que os torna excelentes fósseis guia. Vale ressaltar, contudo, que o uso de certos táxons como marcadores bioestratigráficos está limitado pelo intervalo estratigráfico onde ocorrem. Quitinozoários, por exemplo, são particularmente úteis entre o Ordoviciano e o Devoniano, mas ausentes em rochas mais jovens.

O zoneamento de Daemon & Quadros (1970) foi um dos primeiros esforços para utilizar a palinologia com fins bioestratigráficos na Bacia do Paraná e continua

sendo um dos mais abrangentes. O trabalho baseou-se na análise do conteúdo palinológico de 31 poços exploratórios da PETROBRÁS, além de amostras de superfície, para elaborar um esquema palinobioestratigráfico abrangendo todo o intervalo Neopaleozoico da bacia. Os autores elaboraram tabelas individuais de distribuição vertical dos palinomorfos presentes em cada poço, as quais foram utilizadas para comparar o conteúdo palinológico das diferentes áreas estudadas, de modo a selecionar os melhores fósseis-guia. Um total de quarenta espécies foi selecionado visando sua ampla distribuição geográfica (ocorrência em pelo menos três localidades), fácil reconhecimento, curta distribuição vertical e semelhança com formas encontradas na literatura. Dentre elas, trinta e seis espécies de pólen, três de esporos e uma de prasinofíceas.

O esquema bioestratigráfico proposto dividiu o pacote Pennsylvaniano-Permiano da Bacia do Paraná em seis zonas de intervalo designadas por letras (G, H, I, J, K e L), além de oito subintervalos, designados pela letra correspondente ao intervalo principal acrescida de um algarismo arábico (G, H₁, H₂, H₃, I₁, I₂+I₃+I₄, J, K, L₁, L₂ e L₃). Em termos geocronológicos, a nomenclatura utilizada foi a euroasiática, a qual difere muito da atual. Outras diferenças terminológicas devem-se a uma série de alterações ocorridas na tabela do tempo geológico desde a época da publicação, tais como novas idades entre os limites e substituições ou abandono de certos andares.

Devido à ausência de datações absolutas e fósseis correlacionáveis com a coluna padrão no intervalo estudado, a calibração das idades em Daemon & Quadros (1970) valeu-se de correlações com dados palinológicos de trabalhos estrangeiros, muitos dos quais oriundos do hemisfério norte, causando defasagem na cronologia das biozonas. Ao atribuir idade kazaniense para os intervalos K e L, por exemplo, os autores citam o trabalho de Clarke (1965), sobre o Permiano Superior da Inglaterra, no qual o autor descreve a transição para uma assembléia palinológica dominada por esporos bissacados estriados e pobre em monossacados. A mesma transição foi observada entre os intervalos J e K, servindo de subsídio para sua datação. Segundo os autores, uma comparação da coluna bioestratigráfica da Bacia do Paraná com outras bacias gondwânicas seria difícil devido à escassez de estudos de seções contínuas, quer na Índia, Austrália ou África. A maioria dos trabalhos palinológicos da época provenientes de tais regiões era focada em campos de carvão ou versava sobre partes de seções, sendo, portanto, de cunho local e limitando as possibilidades de correlação. Por outro lado, nota-se que a

ocorrência de determinadas formas, já registradas no hemisfério norte à época da elaboração do zoneamento de Daemon & Quadros (1970), parece não ter sido levada em consideração pelos autores. O primeiro aparecimento do gênero *Vittatina* no subintervalo H₃, ao qual foi atribuída idade artinskiana, já havia sido registrado no limite Permiano/Carbonífero (Wolfcampiano) do Canadá (Barss *et al.*, 1963; Barss, 1967; Barss & Hacquebard, 1967).

Além do zoneamento propriamente dito, a análise das seções bioestratigráficas de Daemon & Quadros (1970) permitiu aos autores fazer uma série de inferências de cunho estratigráfico e sedimentológico, contribuindo de forma significativa para o entendimento da história da sedimentação neopaleozóica na Bacia do Paraná. Observando a configuração das biozonas propostas ao longo de diversas seções, notou-se que o intervalo G apresentava espessuras maiores na região norte da bacia, adelgaçando em direção ao sul, até desaparecer por completo no Rio Grande do Sul. O comportamento inverso foi observado nos intervalos H, I e J, os quais apresentavam suas maiores espessuras na região sul. Os autores concluíram que após a deposição do intervalo G, a bacia subsidiou para sul, caracterizando uma fase de ajustamento. Os intervalos K e L foram interpretados como uma fase de equilíbrio, devido à sua distribuição homogênea ao longo de todas as seções.

O biozoneamento da porção carbonífera da Bacia do Paraná foi proposto por Souza (2006). O trabalho baseou-se em extensa amostragem realizada na porção nordeste da bacia, nos estados de São Paulo e Paraná, compreendendo o intervalo estratigráfico entre as porções basal e intermediária do Grupo Itararé. A assembleia palinológica na qual o zoneamento é fundamentado é composta por quarenta e nove espécies de esporos triletes e vinte e cinco espécies de pólen. Duas biozonas de intervalo foram propostas: *Zona Ahrensisporites cristatus* (AcZ) e *Zona Crucisaccites monoletus* (CmZ).

Ambas as biozonas descritas em Souza (2006) caracterizam-se pela dominância de esporos triletes e grãos de pólen monossacados, além de alguns grãos de pólen teniados. A *Zona Ahrensisporites cristatus* é mais antiga, tendo sido atribuída ao Pennsylvaniano (Bashkiriano superior a Kasimoviano) e correlacionando-se à base do intervalo G de Daemon & Quadros (1970). A *Zona Crucisaccites monoletus* (Kasimoviano a Gzheliano) correlaciona-se com a parte superior do intervalo G e com os intervalos H₁ e H₂.

Um novo zoneamento palinobioestratigráfico foi proposto para o Permiano da Bacia do Paraná em Marques-Toigo (1988) e aprimorado em Marques-Toigo (1991). O trabalho consiste em uma reavaliação da evolução da microflora presente em rochas do intervalo, baseada em amostras de testemunhos e afloramentos provenientes das jazidas de carvão dos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. A distribuição vertical dos táxons analisados, assim como dados qualitativos e quantitativos, foi levada em consideração para estabelecer um zoneamento baseado em zonas de intervalo.

Além de Daemon & Quadros (1970), diversos outros esquemas bioestratigráficos de cunho regional (Bharadwaj *et al.*, 1976; Saad, 1977; Arai, 1980; Sundaram, 1980; Burjack, 1984) abordaram pontos isolados da Bacia do Paraná e expandiram o conhecimento sobre seu conteúdo palinológico, possibilitando a elaboração de um zoneamento mais preciso em Marques-Toigo (1988, 1991). Adicionalmente, zoneamentos previamente estabelecidos para outras regiões do Gondwana do Brasil, Argentina, Austrália, África e Índia (Evans, 1969; Hart, 1969; Hart, 1970; Bharadwaj, 1974; Falcon, 1975; Bharadwaj *et al.*, 1976; Kemp *et al.*, 1977; Azcui & Jelin, 1980; Falcon *et al.*, 1984) foram comparados com os trabalhos em questão, ajudando a atribuir idades às biozonas.

Diferente da terminologia adotada por Daemon e Quadros (1970), as biozonas propostas por Marques-Toigo (1988, 1991) foram nomeadas de acordo com as espécies mais importantes ou representativas do intervalo em questão, em concordância com o *International Stratigraphic Guide*. O zoneamento consiste em duas zonas de intervalo: Zona *Cannanoropollis korbaensis* (Sakmariano/Kunguriano) e Zona *Lueckisporites virkkiae* (Kazaniano/Tatariano), sendo a primeira subdividida em três subzonas de intervalo: *Protohaploxylinus goraiensis* (Sakmariano/Artinskiano), *Caheniasaccites ovatus* (Artinskiano/Kunguriano) e *Hamiapollenites karrooensis* (Kunguriano).

Segundo a autora, a Zona *Cannanoropollis korbaensis*, em sua porção inferior, é caracterizada pela predominância de grãos de pólen monossacados, ao passo que bissacados e bissacados estriados ocorrem em quantidades reduzidas. A porção intermediária apresenta uma microflora semelhante, contudo, nota-se um aumento significativo na quantidade de esporos e algas. A parte superior da zona é caracterizada por uma redução na proporção de monossacados, esporos e algas, em favor dos bissacados estriados. Por fim, na Zona *Lueckisporites virkkiae* há

predominância de bissacados estriados. Bissacados não estriados e monossacados ocorrem em quantidades reduzidas, assim como esporos e algas.

Souza & Marques-Toigo (2001) propuseram que a Zona *Cannanoropolis korbaensis* fosse renomeada, passando a se chamar Zona *Vittatina*. De acordo com os autores, o gênero *Cannanoropolis* apresenta uma grande problemática de identificação, devido à sua semelhança com *Parasaccites* Bharadwaj & Tiwari (1963) e *Virkkipollenites* Lele (1963), os quais chegaram a ser sinonimizados em Foster (1975). A difícil identificação do gênero, assim como sua definição pouco clara na literatura, desfavoreceria seu uso para fins de nomenclatura. Além disso, a sinonimização da forma *Virkkipollenites cf. V. obscurus* (Daemon & Quadros, 1970: forma P522) a *Cannanoropolis korbaensis* (Marques-Toigo, 1988) implicaria em um aumento da amplitude estratigráfica da espécie, descaracterizando o limite inferior da zona em questão. O gênero *Vittatina*, por outro lado, é constituído por diversas espécies de fácil reconhecimento, cujo primeiro aparecimento na Bacia do Paraná ocorre em um horizonte muito bem definido. Tal horizonte também está relacionado a importantes mudanças na constituição das associações palinológicas e a um aumento considerável na diversidade e abundância de grãos de pólen teniados e poliplicados.

Em uma revisão dos diversos zoneamentos propostos para a bacia até o momento, Souza & Marques-Toigo (2001) chamam atenção para algumas flutuações observadas na distribuição estratigráfica de certas espécies. Embora algumas divergências sejam naturais, devido a fatores como controles ambientais, climáticos e afastamento geográfico, sua constatação impõe cautela em seu uso para fins de correlação. O trabalho apresenta um quadro atualizado da distribuição das principais espécies de palinomorfos utilizadas como marcadores bioestratigráficos na Bacia do Paraná, elaborado por meio de uma revisão dos zoneamentos mais abrangentes publicados para a bacia.

Com base na análise de zoneamentos anteriores e novos dados, Souza & Marques-Toigo (2003) apresentam uma revisão da palinoestratigrafia do Paleozoico Superior na Bacia do Paraná. O trabalho traz um novo aprimoramento à nomenclatura bioestratigráfica, renomeando a antiga Zona *Cannanoropolis korbaensis* (Marques-Toigo, 1991) para Zona *Vittatina costabilis*, nome que persiste na literatura até hoje. A Zona *Vittatina costabilis* passa a ser subdividida em duas unidades, as subzonas *Protohaploxypinus goraiensis* e *Hamiapollenites karrooensis*.

A primeira sendo definida pela ocorrência de *P. goraiensis* e *Illinites unicus* e a segunda por *H. karroensis*, *Striatopodocarpites fusus* e *Staurosaccites cordubensis*.

A Subzona *Caheniasaccites ovatus* (Marques-Toigo, 1991) é reconhecida como uma ecofácies, característica de estratos portadores de carvão, e passa a integrar a Subzona *Protohaploxylinus goraiensis*. Tais estratos são tipicamente encontrados entre o topo do Grupo Itararé e a porção média da Formação Rio Bonito, caracterizados pela dominância de esporos como *Punctatisporites*, *Horriditriteles*, *Lundbladispota*, *Cristatisporites* e *Vallatisporites*.

O último grande aprimoramento no zoneamento iniciado em Marques-Toigo (1991) foi proposto por Souza & Marques-Toigo (2005), que formalizaram as biozonas relativas aos estratos permianos da Bacia do Paraná no Estado do Rio Grande do Sul. Uma revisão da literatura, juntamente com a reanálise de lâminas armazenadas no Laboratório de Palinologia do Instituto de Geociências da UFRGS e de materiais novos permitiu não apenas uma série de melhoramentos no esquema vigente, mas também a formalização das biozonas *Vittatina costabilis* e *Lueckisporites virkkiae*.

Segundo aqueles autores, a Zona *Vittatina costabilis* tem como seu limite inferior a primeira ocorrência do gênero *Vittatina* (*V. saccata*, *V. subsaccata*, *V. costabilis*, *V. vittifera*), *Protohaploxylinus goraiensis*, *P. limpidus*, *Fusacolpites fusus* e *Illinites unicus*, comumente dentro do Grupo Itararé. O limite superior é caracterizado pelo surgimento de espécies características da Zona *Lueckisporites virkkiae* e ocorre geralmente entre o topo da Formação Rio Bonito e a base da Formação Palermo. De forma geral, os palinórfos mais comuns nessa biozona são grãos de pólen monossacados de simetria bilateral e radial (*Cannanoropollis*, *Plicatipollenites*, *Caheniasaccites*, *Potonieisporites*, *Striomonosaccites*), chegando a representar de 50 a 60% das assembleias. A porção superior da zona, entretanto, apresenta dominância de grãos de pólen bissacados (*Limitisporites*, *Vittatina*, *Scheuringipollenites*, *Protohaploxylinus*). Localmente, há dominância de esporos, os quais chegam a representar até 80% das assembleias em níveis de carvão.

A subdivisão da Zona *Vittatina costabilis* em duas subzonas, tal qual proposto em Souza & Marques-Toigo (2003), se mantém. A Subzona *Protohaploxylinus goraiensis* é definida pela ocorrência de *P. goraiensis*, *P. limpidus* e *Illinites unicus*. A Subzona *Hamiapollenites karroensis* é definida pela ocorrência da espécie homônima, sendo sua base adicionalmente marcada pelo primeiro aparecimento de *Striatopodocarpites fusus* e *Staurosaccites cordubensis*.

A Zona *Lueckisporites virkkiae* tem seu limite inferior definido pela última ocorrência de *Hamiapollenites karroensis* e *Stellapollenites talchirensis* e pela primeira ocorrência de *Lueckisporites virkkiae*, *L. densicarpus*, *L. stenotaeniatus*, *Pakhapites fasciolatus*, *Weylandites lucifer*, *Protohaplohypinus hartii*, *P. sewardi*, *P. microcorpus*, *Lunatisporites variesectus*, *Alisporites nuthallensis* e *Striatopodocarpites pantii*, comumente entre o topo da Formação Rio Bonito e a base da Formação Palermo. O limite superior é marcado pela última ocorrência do gênero *Lueckisporites* e ocorre em níveis das Formações Serra Alta e Teresina.

Os palinomorfos mais comuns na Zona *Lueckisporites virkkiae* são espécies de *Protohaploxylinus*, *Striatopodocarpites*, *Striatoabieites*, *Lunatisporites* e *Marsupipollenites*. Monossacados e bissacados não estriados são menos comuns. Esporos são raros.

De acordo com Souza & Marques-Toigo (2005), a Zona *Vittatina costabilis* pode ser correlacionada com o Intervalo H₃-J de Daemon & Quadros (1970). O aparecimento de *Striatopodocarpites fusus* (P360), no Intervalo J, indica uma possível correlação com a Subzona *Hamiapollenites karroensis*. A Zona *Lueckisporites virkkiae*, por sua vez, é relacionada aos Intervalos K-L, sendo ambos caracterizados por um aumento na quantidade de grãos de pólen teniados. Com base em dados palinológicos e paleobotânicos anteriores, assim como em dados radiométricos, os autores atribuem uma idade correspondente ao Permiano Inferior (Cisuraliano Inferior) para a Zona *Vittatina costabilis* e Permiano Inferior a Permiano Médio (Cisuraliano Superior a Guadalupiano Inferior) para a Zona *Lueckisporites virkkiae*.

Embora o zoneamento tal como definido em Souza e Marques-Toigo (2005) seja consistente e tenha demonstrado sua eficácia em diversas regiões dentro da Bacia do Paraná, questões referentes à distribuição exata de determinadas espécies-guia ainda são levantadas. Mori & Souza (2012), por exemplo, observaram ocorrências de espécies exclusivas das Zonas *Vittatina costabilis* e *Lueckisporites virkkiae* coexistindo em certas amostras. A Subzona *Hamiapollenites karroensis* não foi reconhecida no material analisado, contudo, a espécie homônima foi registrada em níveis atribuídos a Zona *Lueckisporites virkkiae*. Formas como *Weylandites lucifer* foram observadas nos níveis mais basais da Zona *Vittatina costabilis*. Essas ocorrências são interpretadas pelos autores como estágios transicionais entre as assembléias típicas das duas biozonas.

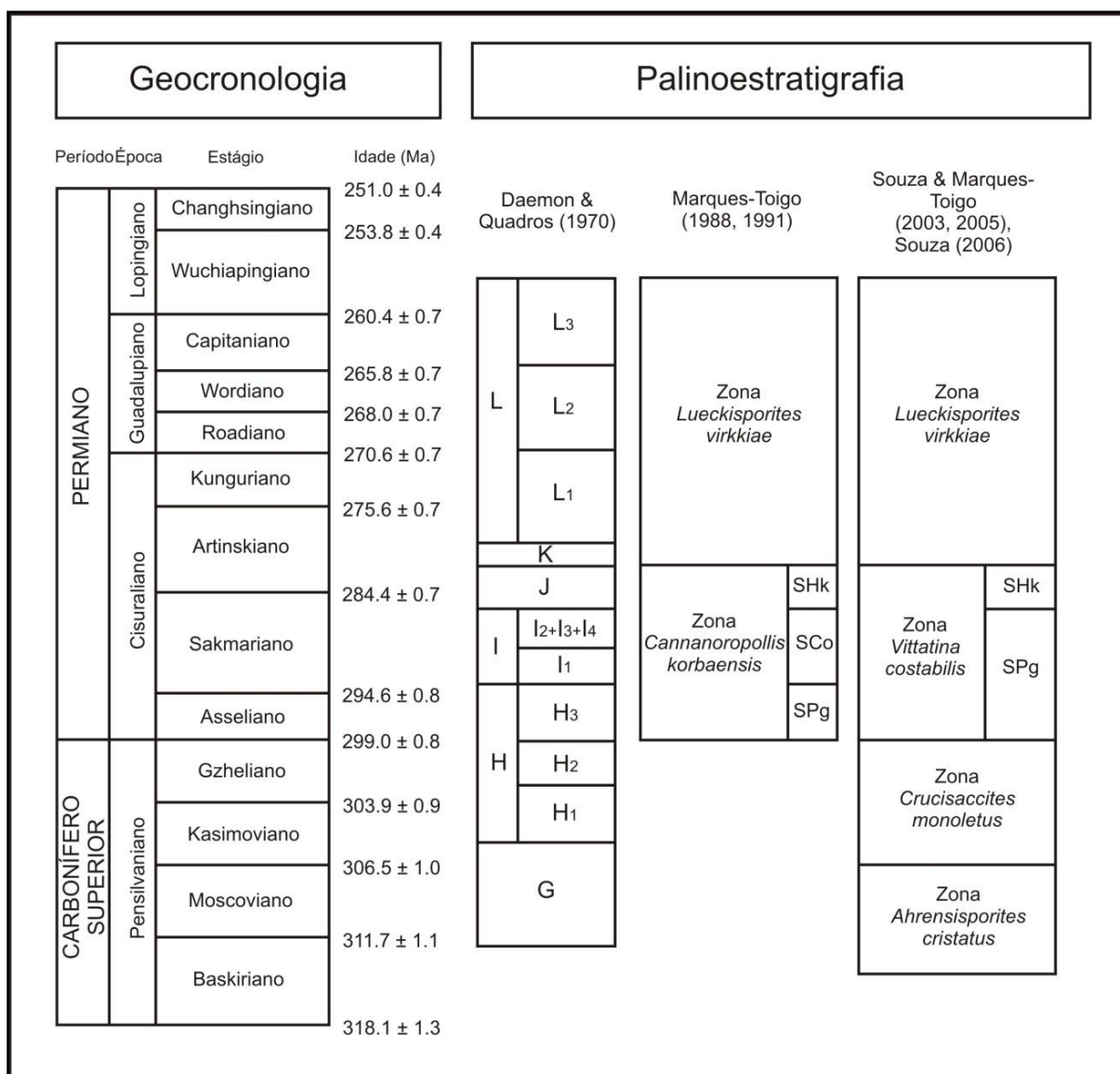


Figura 5. Evolução da palinobioestratigrafia do Neopaleozoico da Bacia do Paraná. Abreviações: SPg - Subzona *Protohaploxylinus goraiensis*, SCo - Subzona *Caheniasaccites ovatus*, SHk - Subzona *Hamiapollenites karrooensis*.

Ainda que menos significativos no contexto da Bacia do Paraná em particular, trabalhos realizados em outras regiões também evidenciam variabilidade na distribuição estratigráfica de certas espécies chave do zoneamento local. Di Pasquo *et al.* (2015) registraram ocorrências de *Lueckisporites virkkiae* em rochas Asselianas na Formação Copacabana na Bolívia, cronologicamente equivalentes à base da Zona *Vittatina costabilis*. Na Bacia do Amazonas, em um zoneamento inédito, UFRGS (2014) também registrou a espécie em estratos equivalentes, muito embora a mesma ocorrência não tenha sido reconhecida no esquema de Playford & Dino (2000).

Em um contexto global, espécies dos gêneros *Vittatina* e *Lueckisporites*, amplamente utilizadas como marcadores do Permiano, foram encontradas em rochas Gzhelianas do Cazaquistão (Dunn, 2001). Registros semelhantes aos supracitados vêm se tornando cada vez mais comuns e, aliados a calibrações com dados radiométricos, parecem indicar idades mais antigas para o surgimento desses táxons.

1.4.3 Cronoestratigrafia

A eficácia da palinologia como ferramenta bioestratigráfica é reflexo da relação direta entre a flora e as condições ambientais às quais ela está submetida, determinadas por fatores climáticos e geológicos. O Neopaleozoico da Bacia do Paraná é um exemplo claro dessa relação, quando mudanças nas condições geológicas resultaram em diferentes assembléias palinológicas. Do ponto de vista da estratigrafia, contudo, as palinozonas fornecem apenas datações relativas, de modo que a atribuição de idades absolutas depende de sua vinculação com dados radiométricos.

Embora a palinoestratigrafia da Bacia do Paraná tenha se valido historicamente de correlações com outras bacias gondwânicas para calibrar as idades de suas biozonas, a aquisição de novas datações a partir do início do século XXI tem possibilitado uma grande mudança nesse cenário. A disponibilidade de dados radiométricos dentro da bacia tem permitido a elaboração de um quadro mais avançado, dando maior precisão às correlações da bioestratigrafia com a geocronologia. Tendo em vista, entretanto, que muitas datações geraram resultados conflitantes, pode-se dizer que a obtenção de novos dados originou uma série de novas questões, relacionadas à confiabilidade e precisão da amostragem e das técnicas empregadas.

Segundo Rocha-Campos *et al.* (2019), uma quantidade considerável de cinza vulcânica depositou-se na Bacia do Paraná durante o Paleozoico Superior, pontuando grande parte do intervalo estratigráfico representado pelo Supergrupo Tubarão e Grupo Passa Dois. A origem de tais depósitos é geralmente atribuída a erupções ocorridas na Província Ígnea de Choiyoi, no noroeste da Argentina (Rocha-Campos *et al.*, 2011), e seu conteúdo de zircões permite a obtenção de datações pelo método U-Pb.

A Formação Rio Bonito foi tema de inúmeros trabalhos abordando datações radiométricas de estratos vulcanogênicos, os quais se basearam em amostras provenientes de diferentes localidades e utilizaram diferentes metodologias (Matos *et al.*, 2001; Guerra-Sommer *et al.*, 2005; Rocha-Campos *et al.*, 2006; Rocha-Campos *et al.*, 2007; Guerra-Sommer *et al.*, 2008 a, b, c; Mori *et al.*, 2012; Simas *et al.*, 2012; Caligari *et al.*, 2016; Griffis *et al.*, 2018; Rocha-Campos *et al.*, 2019). Mori *et al.* (2012) dataram uma camada de tonstein oriunda de um afloramento nas redondezas da mina de carvão Candiota, obtendo uma idade de $281,4 \pm 3,4$ Ma (Artinskiano, Permiano Inferior). A camada situava-se no topo da Formação Rio Bonito, aproximadamente 2 m abaixo do contato litológico com a Formação Palermo e, segundo análise palinológica realizada pelos autores, na base da Zona *Lueckisporites virkkiae*.

Idades obtidas por outros trabalhos na Mina de Candiota variam de $267,1 \pm 3,4$ Ma (Matos *et al.*, 2001) a $304 \pm 5,6$ Ma (Rocha-Campos *et al.*, 2019), contudo, é importante notar que alguns desses dados são representativos de níveis estratigráficos inferiores àquele estudado por Mori *et al.* (2012) e, portanto, dizem respeito à porção intermediária da Formação Rio Bonito, situada na Zona *Vittatina costabilis*. As idades mais antigas obtidas para o intervalo são de $304 \pm 5,6$ Ma (Rocha-Campos *et al.*, 2019) e $299 \pm 2,6$ Ma a $296 \pm 1,4$ Ma (Guerra-Sommer *et al.*, 2005), entretanto, uma reavaliação realizada por Guerra-Sommer *et al.* (2008a) obteve uma idade média de $290,6 \pm 1,5$ Ma, posicionando a porção média da Formação Rio Bonito no Sakmariano.

Matos *et al.* (2001), analisando um tonstein proveniente da camada inferior do carvão Candiota, obtiveram uma idade de $267,1 \pm 3,4$ Ma (Wordiano). Embora essa datação represente uma grande discrepância em relação àquelas obtidas por trabalhos posteriores realizados em Candiota, é importante notar que se trata da primeira tentativa de datar tais estratos e estava sujeita a erros. Santos *et al.* (2006) sugerem que o erro poderia ser decorrente da perda de Pb na população de zircões analisada e que, portanto, o valor médio obtido por Matos *et al.* (2001) representaria uma “pseudo idade”.

Diferenças nos dados radiométricos referentes à Formação Rio Bonito são perceptíveis também em escala regional. Rocha-Campos *et al.* (2007, 2019) obtiveram, respectivamente, idades de $302,5 \pm 4,8$ Ma e $303,0 \pm 5,7$ Ma para tonsteins da porção superior da unidade nas bacias Faxinal-Leão, localizadas ao norte de Candiota. Rocha-Campos *et al.* (2019) comentam que os dados podem ter

sido influenciados pelo retrabalhamento de material de um episódio vulcânico mais antigo e atribuem uma idade de 298 Ma (Gzheliano, Pennsylvaniano Superior) para a base da unidade. Guerra-Sommer *et al.* (2008b) atribuíram aos mesmos estratos uma idade de $285,4 \pm 8,6$ Ma, mais compatível com aquela encontrada por Mori *et al.* (2012) na região de Candiota. Nesse contexto, é válido lembrar que datações realizadas no Rio Grande do Sul idealmente não deveriam ser estendidas para ocorrências da Formação Rio Bonito em outros estados, uma vez que, como demonstrado por dados bioestratigráficos, a idade destas rochas pode variar em diferentes regiões da Bacia do Paraná. A estratigrafia da unidade é outro fator a ser considerado, já que sua divisão em três membros (Schneider *et al.*, 1974) não é observável fora de Santa Catarina, dificultando correlações.

Uma completa reavaliação dos estratos vulcanogênicos previamente datados na Formação Rio Bonito foi realizada por Griffis *et al.* (2018). Os autores valeram-se de avanços nas técnicas de tratamento e análise de zircões para elaborar o primeiro esquema cronoestratigráfico de alta resolução da unidade com base no método CA-TIMS (*chemical abrasion thermal ionization mass spectrometry*). O trabalho analisou tonsteins provenientes de dois estratos da mina de Candiota (Candiota A e Candiota C), do afloramento Hulha Negra-Candiota (o mesmo datado por Mori *et al.*, 2012) e da Mina do Faxinal, além de apresentar uma datação inédita de estratos oriundos do afloramento Quitéria, localizado 25 km a sudoeste do município de Minas do Leão. Os resultados apresentam grandes discrepâncias com as idades previamente obtidas para os intervalos analisados, tendo implicações geocronológicas, bioestratigráficas e estratigráficas.

As datações apresentadas por Griffis *et al.* (2018) indicam simultaneidade na deposição das camadas analisadas em Candiota A, Candiota C, Hulha Negra-Candiota e Quitéria, cujas idades médias são, respectivamente: $298,23 \pm 0,31$ Ma, $298,64 \pm 0,17$ Ma, $298,03 \pm 0,25$ Ma e $298,10 \pm 0,28$ Ma. A amostra proveniente da Mina do Faxinal apresentou uma idade média de $286,52 \pm 0,30$ Ma, delimitando um segundo intervalo deposicional. Tais resultados sugerem que o início da deposição dos carvões Rio Bonito teria ocorrido próximo ao limite Carbonífero-Permiano e que, conseqüentemente, a glaciação no sudoeste do Gondwana teria sido completamente carbonífera. Idades semelhantes foram apresentadas por Cagliari *et al.* (2016), que dataram um tonstein oriundo da base da Formação Rio Bonito no Paleovale do Capané, obtendo uma idade de $298,8 \pm 1,9$ Ma.

Do ponto de vista da palinoestratigrafia, estes dados representam uma grande problemática, tendo em vista que a idade Artinskiana atribuída para a base da Zona *Lueckisporites virkkiae* por Mori *et al.* (2012) não é conciliável com a Asseliana encontrada por Griffis *et al.* (2018) nos mesmos estratos, compatível com a Subzona *Protohaploxypinus goraiensis*. Contudo, vale ressaltar que não é a primeira vez que o limite inferior da Zona *Lueckisporites virkkiae* é questionado: Di Pasquo *et al.* (2015) registram o aparecimento de espécies diagnósticas da zona em estratos Asselianos da Formação Copacabana (Bolívia). É possível que estas informações confirmem a hipótese já levantada de que a primeira ocorrência certos elementos da Zona *Lueckisporites virkkiae* seja mais antiga do que aquela proposta pelo esquema bioestratigráfico atual (Mori *et al.*, 2012; Boardman *et al.*, 2012a, 2012b), embora fatores como a velocidade de dispersão da flora devam ser levados em consideração ao analisar amostras de fora da Bacia do Paraná.

Os resultados obtidos por Griffis *et al.* (2018) para o afloramento Quitéria estão em desacordo com dados apresentados por Jasper *et al.* (2006) que caracterizam o conteúdo palinológico local como pertencente à Subzona *Hamiapollenites karroensis*, contudo, um estudo subsequente sugeriu que o intervalo pertenceria à Subzona *Protohaploxypinus goraiensis* (Boardman *et al.*, 2012b), compatível com a datação de Griffis *et al.* (2018).

Diferentemente da Formação Rio Bonito, as demais unidades permianas da Bacia do Paraná não apresentam uma literatura tão abundante no que diz respeito a dados radiométricos. Até o momento, camadas de queda de cinza vulcânica não foram observadas nas Formações Palermo e Serra Alta, ao passo que, na Formação Irati, o número de datações ainda é reduzido. Santos *et al.* (2006) publicaram a primeira datação absoluta para estratos da Formação Irati, baseada em camadas de cinza bentonítica provenientes da mina PETROBRAS-Six, localizada em São Mateus do Sul, Paraná. Os autores encontraram uma idade de $278,4 \pm 2,2$ Ma (Artinskiano) e realizaram uma análise palinológica que situou a unidade na Zona *Lueckisporites virkkiae*. Rocha-Campos *et al.* (2019) obtiveram idades médias de $279,9 \pm 4,8$ Ma e $280,0 \pm 3,0$ Ma para amostras da mesma localidade.

A elaboração de um esquema geocronológico mais maduro para o Neopaleozóico da Bacia do Paraná, bem como sua correlação com dados bioestratigráficos, é um esforço em andamento. Embora uma quantidade significativa de trabalhos tenha sido publicada ao longo das últimas décadas (Quadro 1), somente uma maior amostragem e a integração das informações já

disponíveis possibilitará um entendimento mais completo. Neste trabalho, devido às circunstâncias acima mencionadas, optou-se por seguir o esquema proposto por Holz *et al.* (2010), o qual apresenta uma integração dos principais dados estratigráficos e paleontológicos para o intervalo Pennsylvaniano-Permiano da Bacia do Paraná.

Quadro 1. Datações radiométricas obtidas para o Permiano da Bacia do Paraná.

Unidade	Autores	Amostragem	Método analítico	Idade
Fm. Rio Bonito	Matos <i>et al.</i> (2001)	Tonstein A (Candiota)	IDTIMS U/Pb	267,1 ± 3,4 Ma
	Guerra-Sommer <i>et al.</i> (2005)	Camada inferior do Carvão Candiota (nível de tonstein não especificado)	IDTIMS U/Pb	299,1 ± 2,6 a 296,9 ± 1,4 Ma
	Rocha-Campos <i>et al.</i> (2006/2007)	Camada inferior do Carvão Candiota (4 níveis de tonstein não especificados)	SHRIMP RG SHRIMP 2	298,5 ± 2,6 Ma (média)
	Guerra-Sommer <i>et al.</i> (2008a)	Tonsteins A e C (Candiota) e nível de tonstein proveniente da camada de carvão S (Faxinal)	SHRIMP 2	Candiota A: 293,96 +3,83/-4,20 e 290,72 +2,15/-3,86 Candiota C: 289,36 +1,84/-1,58 e 291,46 +2,13/-0,96 Faxinal: 290,15 +2,45/-0,85 290,6 ± 1,5 Ma (média)
	Guerra-Sommer <i>et al.</i> (2008b)	Nível de tonstein proveniente da camada de carvão S (Faxinal)	IDTIMS U/Pb	285,4 ± 8,6 Ma
	Guerra-Sommer <i>et al.</i> (2008c)	Tonsteins A e C (Candiota)	IDTIMS U/Pb	Candiota A: 296 ± 4,2 Ma Candiota C: 296,9 ± 1,65 Ma
	Mori <i>et al.</i> (2012)	Nível de tonstein do afloramento "Hulha Negra-Candiota"	LA-MC-ICP-MS	281,4 ± 3,4 Ma
	Simas <i>et al.</i> (2012)	Nível de tonstein proveniente da base da camada de carvão S1 (Mina do Recreio)	SHRIMP 2	291 ± 1,2 Ma
	Cagliari <i>et al.</i> (2016)	Paleovale Capané, nível de tonstein da base da Fm. Rio Bonito	LA-ICP-MS	298,8 ± 1,9 Ma
	Griffis <i>et al.</i> (2018)	Tonsteins A e C (Candiota), nível de tonstein proveniente da camada de carvão S (Faxinal) e níveis de tonstein dos Afloramentos Hulha Negra-Candiota e Quitéria	CA-TIMS	Candiota A: 298,23 ± 0,31 Ma Candiota C: 298,64 ± 0,17 Ma Hulha Negra-Candiota: 298,03 ± 0,25 Ma Quitéria: 298,10 ± 0,28 Ma Faxinal: 286,52 ± 0,30 Ma
	Rocha-Campos <i>et al.</i> (2019)	Tonsteins A e C (Candiota) e nível de tonstein proveniente da "Camada superior da bacia Faxinal Leão"	IDTIMS U/Pb SHRIMP	Candiota A: 304 ± 5,6 Ma Candiota C: 295,8 ± 3,1 Ma Camada superior da Bacia Faxinal-Leão: 303,0 ± 5,7 Ma e 301,4 ± 5,3 Ma
Fm. Irati	Santos <i>et al.</i> (2006)	Mina PETROBRAS-Six, São Mateus do Sul, Paraná	SHRIMP	278,4 ± 2,2 Ma
	Rocha-Campos <i>et al.</i> (2019)	Mina PETROBRAS-Six, São Mateus do Sul, Paraná	SHRIMP	279,9 ± 4,8 Ma 280 ± 3 Ma

1.5 Resultados

A caracterização palinológica do poço CBM-001-ST-RS foi realizada a partir da análise de lâminas provenientes de 36 níveis estratigráficos, atribuídos às formações Rio Bonito, Palermo, Irati e Serra Alta, conforme perfil apresentado na figura 2. Dentre os níveis estudados, 6 mostraram-se estéreis (535 m, 595 m, 610 m,

625 m, 630 m e 637 m), sendo os demais palinologicamente férteis. O conteúdo de fitoclastos, matéria orgânica amorfa e palinómorfs, assim como o grau de preservação destes últimos, apresenta grande variação ao longo da seção. A análise palinológica revelou um total de 61 espécies (Quadro 2, figuras 6, 7, 8, 9 e 10), incluindo 36 espécies de grãos de pólen, 16 de esporos, 8 relacionadas a algas e 1 a uma espécie de fungo.

Quadro 2. Lista taxonômica de palinómorfs identificados no poço CBM-001-ST-RS.

CONTEÚDO PALINOLÓGICO	
Esporos	
<i>Brevitriletes cornutus</i> (Balme & Hennelly) Backhouse 1991	<i>Lueckisporites virkkiae</i> (Potonié & Klaus) Clarke 1965
<i>Calamospora</i> spp.	<i>Lunatisporites onerosus</i> Playford & Dino 2000
<i>Cyclogranisporites gondwanensis</i> Bharadwaj & Salujha 1964	<i>Lunatisporites variesectus</i> Archangelsky & Gamero 1979
<i>Granulatisporites austroamericanus</i> Archangelsky & Gamero 1979	<i>Protohaploxypinus amplus</i> (Balme & Hennelly) Hart 1964
<i>Horriditriletes gondwanensis</i> (Tiwari & Moiz) Foster 1975	<i>Protohaploxypinus goraiensis</i> (Potonié & Lele) Hart 1964
<i>Horriditriletes uruguaiensis</i> (Marques-Toigo) Archangelsky & Gamero 1979	<i>Protohaploxypinus panaki</i> Utting 1994
<i>Leiotriletes</i> spp.	<i>Protohaploxypinus perfectus</i> (Naumova) Samoilovich 1953
<i>Punctatisporites gretensis</i> Balme & Hennelly 1956	<i>Staurosaccites cordubensis</i> Archangelsky & Gamero 1979
<i>Verrucosisporites kaipingiensis</i> Imgrund 1952	<i>Striatoabieites anaverrucosus</i> Archangelsky & Gamero 1979
<i>Verrucosisporites donarii</i> Potonié & Kremp 1955	<i>Striatoabieites multistriatus</i> (Balme & Hennelly) Hart 1964
<i>Verrucosisporites microtuberosus</i> (Loose) Smith & Butterworth 1967	<i>Striatoabieites cf. richteri</i> (Klaus) Hart 1964
<i>Cristatisporites lestai</i> Archangelsky & Gamero 1979	<i>Striatopodocarpites cancellatus</i> (Balme & Hennelly) Hart 1964
<i>Lundbladisporea braziliensis</i> (Marques-Toigo & Pons) Marques-Toigo & Picarelli 1984	<i>Striatopodocarpites cf. fusus</i> (Balme & Hennelly) Potonié 1958
<i>Lundbladisporea riobonitensis</i> Marques-Toigo & Picarelli 1984	<i>Trochosporites reniformis</i> Wilson 1962
<i>Kendosporites striatus</i> (Salujha) Surange & Chandra 1974	<i>Pakhapites fusus</i> (Bose & Kar) Menéndez 1971
<i>Laevigatosporites vulgaris</i> Ibrahim 1933	<i>Pakhapites ovatus</i> (Bose & Kar) Playford & Dino 2000
	<i>Vittatina costabilis</i> Wilson 1962
Grãos de pólen	<i>Vittatina saccata</i> (Hart) Playford & Dino 2000
<i>Caheniasaccites elongatus</i> Bose & Kar 1966	<i>Vittatina subsaccata</i> Samoilovich 1953
<i>Caheniasaccites flavatus</i> (Bose & Kar) Azcuy & di Pasquo 2000	<i>Vittatina vittifera</i> (Luber & Valts) Samoilovich 1953
<i>Plicatipollenites densus</i> Srivastava 1970	<i>Weylandites lucifer</i> (Bharadwaj & Salujha) Foster 1975
<i>Plicatipollenites gondwanensis</i> (Balme & Hennelly) Lele 1964	
<i>Plicatipollenites malabarensis</i> (Potonié & Sah) Foster 1975	Algas
<i>Potonieisporites barrelii</i> Tiwari 1965	<i>Botryococcus braunii</i> Kutzing 1849
<i>Potonieisporites congoensis</i> Bose & Maheshwari 1968	<i>Leiosphaeridia</i> spp.
<i>Potonieisporites lelei</i> Maheshwari 1967	Complexo <i>Pilasporites</i> (Balme & Hennelly 1956) emend. Tiwari & Navale 1967
<i>Striomonosaccites incrassatus</i> Playford & Dino 2000	<i>Quadrisporites horridus</i> Hennelly ex Potonié & Lele 1961
<i>Alisporites</i> spp.	<i>Quadrisporites lobatus</i> (Tiwari & Navale) Kar & Bose 1976
<i>Hamiapollenites fusiformis</i> (Marques-Toigo) Archangelsky & Gamero 1979	<i>Tasmanites</i> spp.
<i>Hamiapollenites karroensis</i> (Hart) Hart 1964	Complexo <i>Tetraporina</i> (Naumova) Naumova emend. Kar & Bose 1976
<i>Lueckisporites agoulaensis</i> (Jardiné) Premaor, Fischer & Souza 2006	
<i>Lueckisporites nyakapendensis</i> Hart 1964	Acritarcos
<i>Lueckisporites stenotaeniatus</i> Menendez 1976	Complexo <i>Michrystidium</i> (Deflandre) Downie & Sarjeant 1963 emend. Sarjeant 1967
	Fungos
	<i>Portalites gondwanensis</i> (Nahuys, Alpern & Ybert 1968) emend. Souza, Félix & Saldanha 2016

É importante ressaltar que a identificação e a classificação de palinomorfos de origem algálica ainda estão sujeitas a controvérsias, uma vez que variações morfológicas de formas semelhantes podem ser interpretadas como espécies distintas ou como fases ontogenéticas de uma mesma espécie. Neste trabalho, optou-se por adotar a proposta taxonômica de Félix (2012). Analisando registros de diversos grupos de algas no Permo-Carbonífero da Bacia do Paraná, a autora realizou avaliações morfológicas detalhadas, proporcionando um reajuste taxonômico para formas mais controversas na sistemática. O estudo levou em consideração a complexidade da ontogenia observada nesses grupos, bem como a interferência de fatores tafonômicos para propor uma nova classificação. Assim, os gêneros *Tetraporina* e *Balmeella* passaram a integrar o “Complexo *Tetraporina*”, representando diferentes fases do ciclo ontogenético de uma mesma espécie. Da mesma forma, os gêneros *Pilasporites* e *Brazilea* foram reunidos no “Complexo *Pilasporites*”. Os gêneros de acritarcos *Michrystidium* e *Veryhachium* também passaram a ser considerados “complexos” (*sensu* Sarjeant & Stancliffe, 1994).

Os estratos mais basais da Formação Rio Bonito apresentam assembleias palinológicas tipicamente relacionadas aos leitos de carvão da unidade, com clara predominância de esporos triletes, sobretudo dos gêneros *Punctatisporites*, *Lundbladispota*, *Horriditriletes*, *Granulatisporites* e *Brevitriletes*, além do esporo de fungo *Portalites gondwanensis* e algas clorofíceas dos gêneros *Quadrisporites*, *Botryococcus* e *Tetraporina*. Grãos de pólen, quando presentes, ocorrem em quantidades extremamente reduzidas. A partir da porção média da unidade, grãos de pólen poliplicados, particularmente do gênero *Vittatina*, e bissacados teniados tornam-se os grupos mais abundantes. Observa-se o primeiro aparecimento de gêneros como *Hamiapollenites*, *Lunatisporites*, *Striatopodocarpites* e *Pakhapites*.

De forma geral, a Formação Palermo se caracteriza por amostras menos ricas em palinomorfos, provavelmente devido a controle litológico, uma vez que sua litologia é composta por rochas de granulometria mais espessa, tais como siltitos e arenitos finos. Quando presente, a composição da microflora é semelhante à observada na porção superior da Formação Rio Bonito.

Na Formação Irati, a dominância de grãos de pólen se mantém e há uma considerável diminuição na quantidade de esporos e algas clorofíceas. Acritarcos do complexo *Michrystidium* ocorrem em dois níveis, onde são os elementos mais abundantes. Nos últimos estratos da seção, relativos à Formação Serra Alta, ocorre um ligeiro aumento na abundância e diversidade de grãos de pólen monossacados,

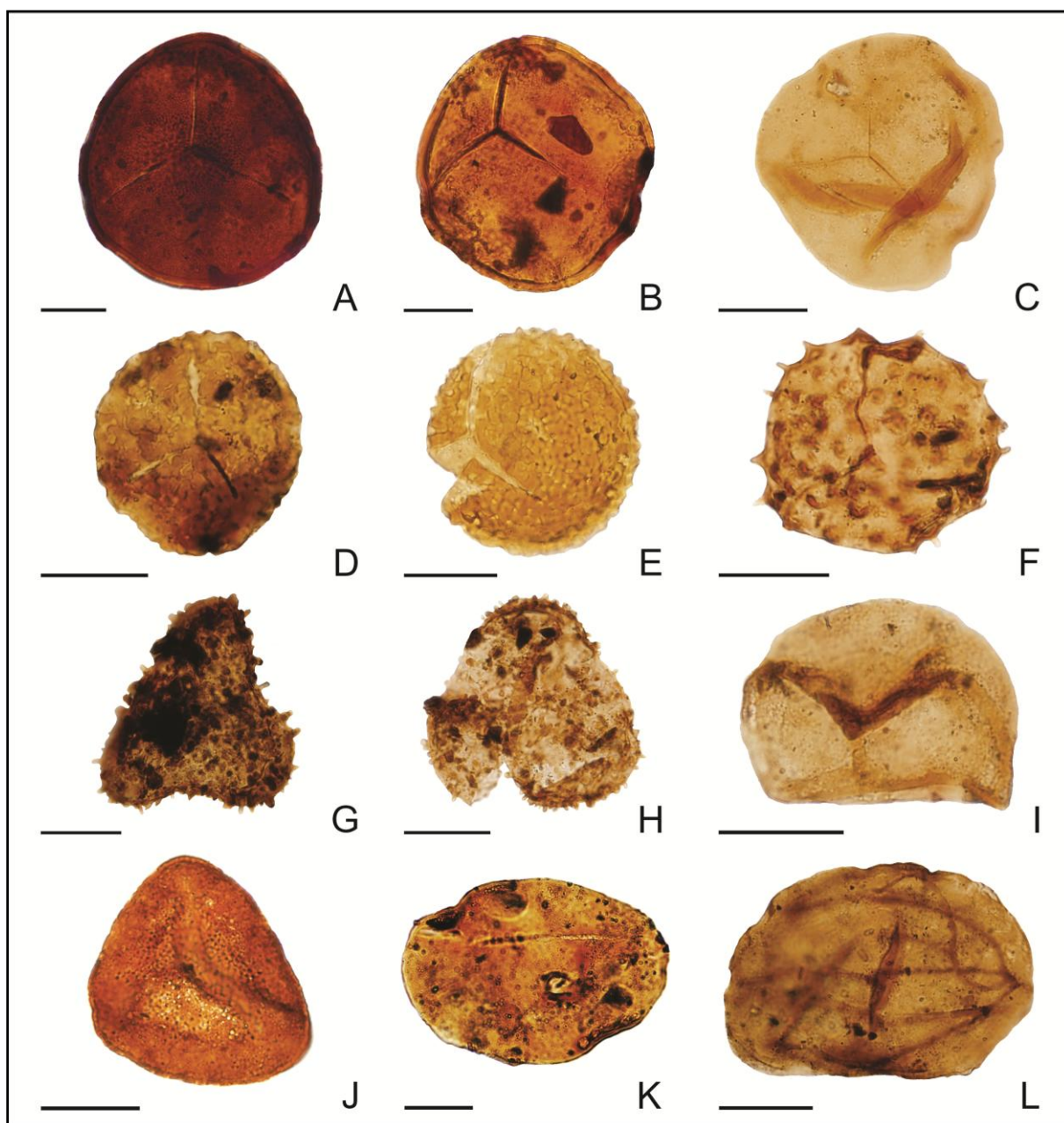


Figura 7. Espécimes selecionados de esporos. A. *Punctatisporites gretensis* (lâmina MP-P: 13398, coordenada England Finder: M54); B. *Punctatisporites gretensis* (13414, M55/1); C. *Calamospora* sp. (13422, N59); D. *Verrucosisporites donarii* (13414, L48/1); E. *Verrucosisporites donarii* (13566, L35); F. *Brevitriletes cornutus* (13398, T53); G. *Horriditriletes uruguayensis* (13398, N58/1); H. *Horriditriletes uruguayensis* (13401, O35/4); I. *Lundbladispora riobonitensis* (13417, P42); J. *Granulatisporites austroamericanus* (13398, V45); K. *Laevigatosporites vulgaris* (13416, C54); L. *Kendosporites striatus* (13417, G44). Escala equivalente a 20 μ m.

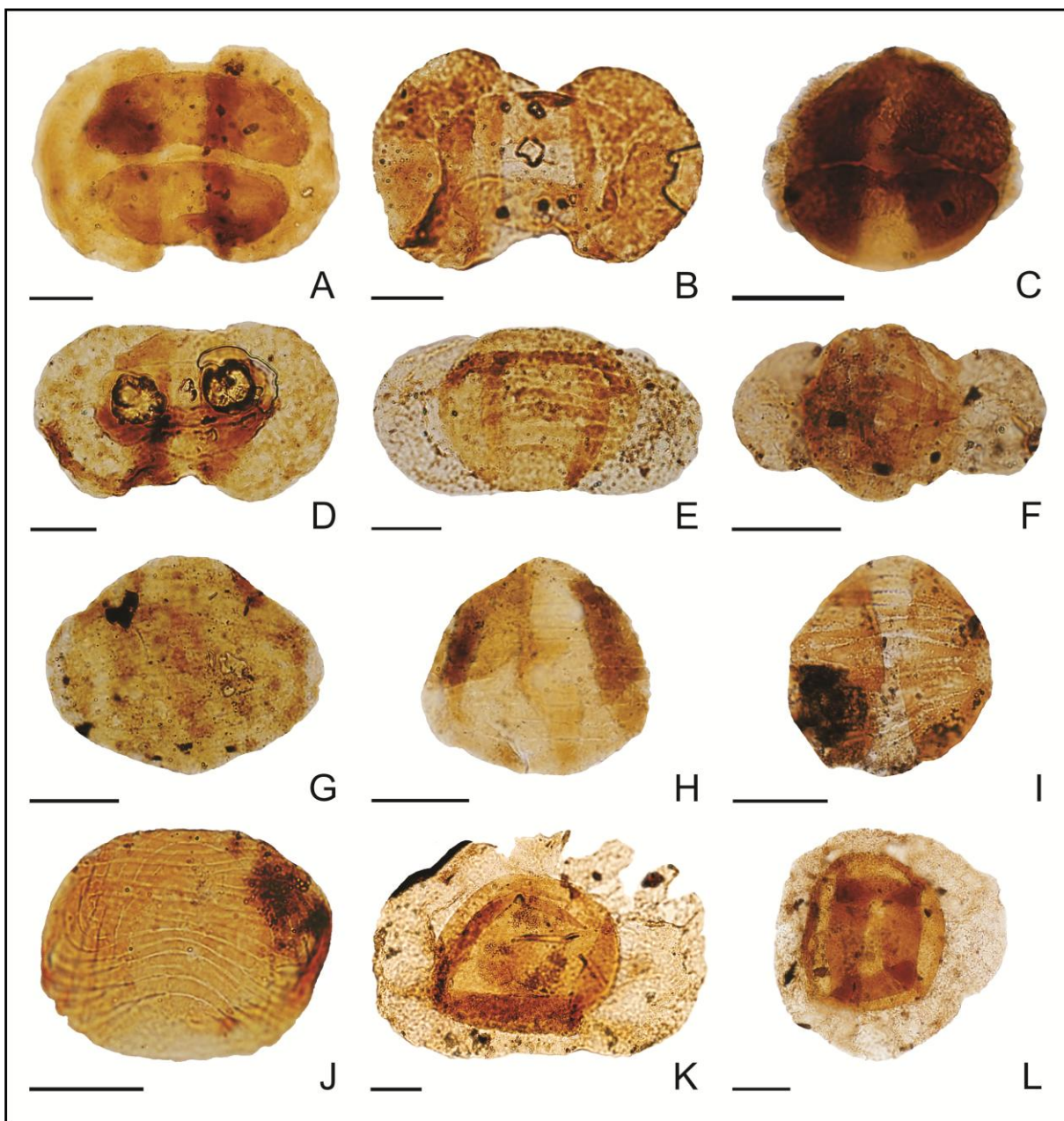


Figura 8. Espécimes selecionados de grãos de pólen. A. *Lueckisporites virkkiae* (lâmina MP-P: 13478, coordenada England Finder: J38/4); B. *Lueckisporites nyakapendensis* (13491, N30/3); C. *Staurosaccites cordubensis* (13468, D45/3); D. *Lunatisporites variesectus* (13477, J37/2); E. *Striatoabieites anaverrucosus* (13477, T39); F. *Hamiapollenites karrooensis* (13417, W54/4); G. *Vittatina subsaccata* (13477, D41/1); H. *Vittatina costabilis* (13477, E47); I. *Pakhapites fusus* (13413, Q40); J. *Weylandites lucifer* (13477, R54/1); K. *Plicatipollenites gondwanensis* (13497, V34/1); L. *Potonieisporites congoensis* (13491, S47). Escala equivalente a 20 μm .

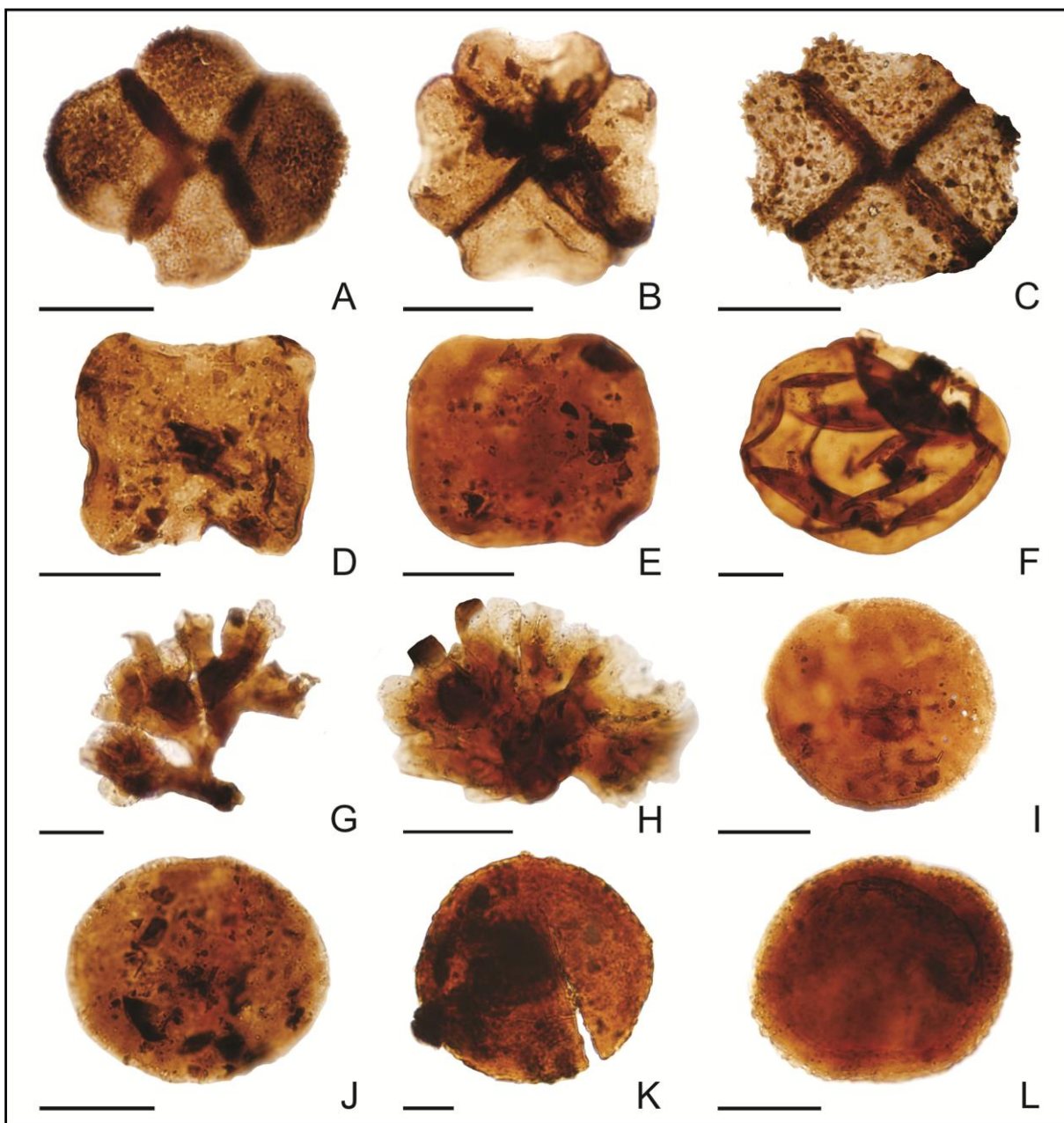


Figura 9. Espécimes selecionados de elementos algálicos e fungos. A. *Quadrisporites horridus* (lâmina MP-P: 13398, coordenada England Finder: Z48/4); B. *Quadrisporites lobatus* (13398, C40); C. *Quadrisporites lobatus* (13398, U54/4); D. *Tetraporina* (13406, G35); E. *Tetraporina* (13406, N35/1); F. *Tasmanites* sp. (13404, S35/2); G. *Botryococcus braunii* (13425, F55/2); H. *Botryococcus braunii* (13417, T56/4); I. *Pilasporites* (13406, U36/3); J. *Pilasporites* (13406, M55/2); K. *Portalites gondwanensis* (13404, R42/4); L. *Portalites gondwanensis* (13417, D55). Escala equivalente a 20 μm .

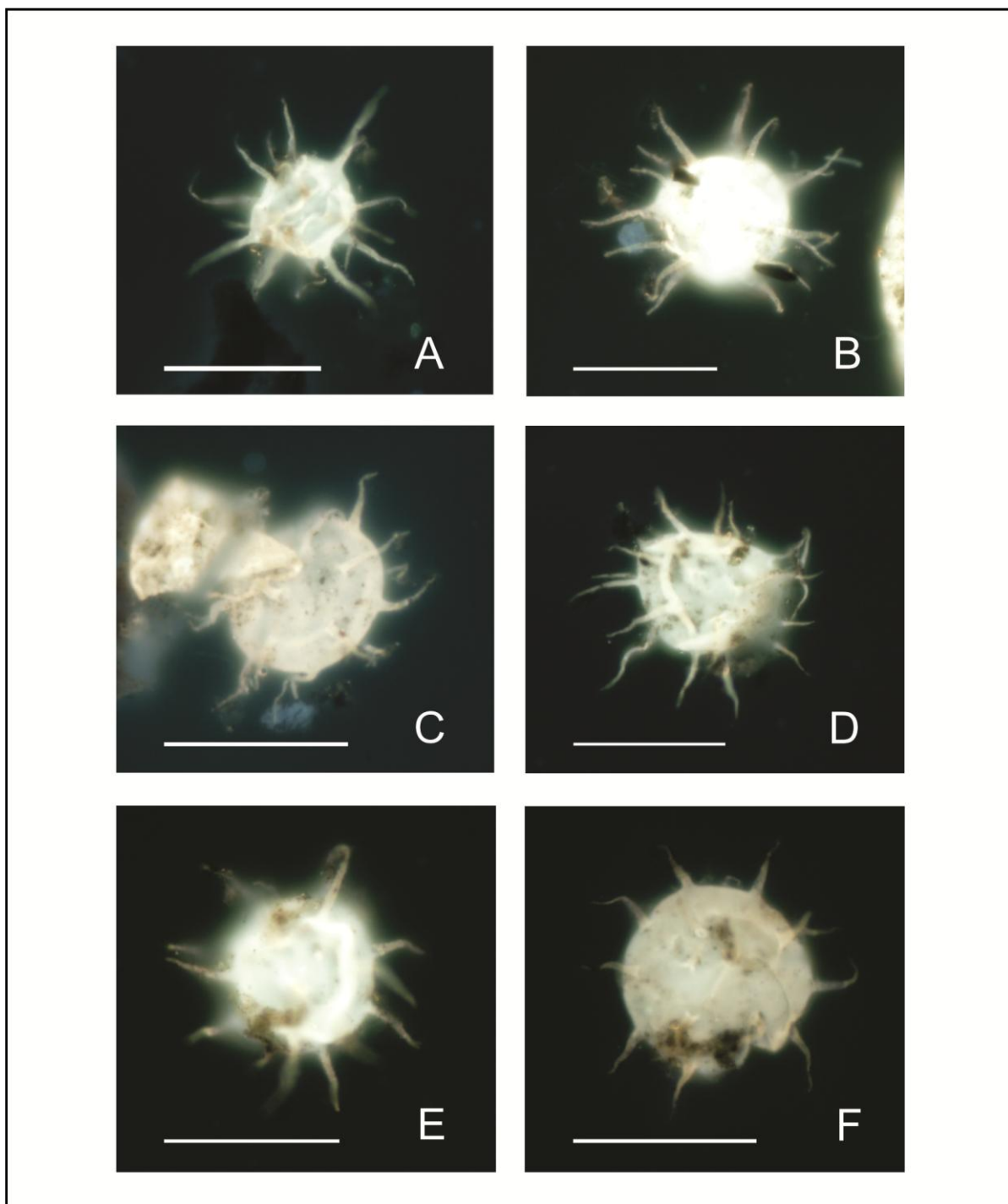


Figura 10. Acritarcos do Complexo *Michrystridium* (fotomicrografias sob luz fluorescente). Lâmina MP-P: 13473, coordenadas England Finder: A. G41; B. J51/4; C. W53/3; D. H36; E. F46/4; F. P29. Escala equivalente a 20 μ m.

1.6 Discussão

1.6.1 Bioestratigrafia

A caracterização palinológica do poço CBM-001-ST-RS e sua posterior contextualização dentro do zoneamento palinoestratigráfico proposto por Souza & Marques-Toigo (2003, 2005) e Souza (2006), permitiu o reconhecimento das zonas *Vittatina costabilis* e *Lueckisporites virkkiae*. Alguns marcadores bioestratigráficos foram reconhecidos fora da distribuição originalmente proposta, possibilitando diferentes interpretações dentro do modelo proposto.

Em termos litoestratigráficos, a literatura atual posiciona a Zona *Vittatina costabilis* entre a porção superior do Grupo Itararé e algum lugar próximo ao limite entre as formações Rio Bonito e Palermo. Contudo, a identificação desse intervalo bioestratigráfico é difícil no início da seção analisada devido à escassez de táxons-guia. *Granulatisporites austroamericanus* ocorre em 630 m e 633 m, ao passo que *Protohaploxylinus goraiensis* é identificado somente no nível 633 m. O gênero *Vittatina* e as espécies *Hamiapollenites karrooensis* e *Hamiapollenites fusiformis* são observados pela primeira vez apenas no nível 605 m, já na metade superior da Formação Rio Bonito. Como *H. fusiformis* e *H. karrooensis* são marcadores das subzonas *Protohaploxylinus goraiensis* e *Hamiapollenites karrooensis* respectivamente (Souza, 2006), o limite entre essas unidades fica indeterminado na seção estudada.

Há um aumento na diversidade de grãos de pólen na porção superior da Formação Rio Bonito, entretanto, táxons relacionados à Subzona *Hamiapollenites karrooensis* e à Zona *Lueckisporites virkkiae* são observados coexistindo nos mesmos níveis estratigráficos. *Hamiapollenites karrooensis* e *Lunatisporites varisectus* ocorrem nos níveis 605 m e 600 m, deixando o limite exato entre as duas unidades em aberto. Além disso, *Hamiapollenites karrooensis* ocorre novamente em 565 m, na porção inferior da Formação Palermo, após a primeira ocorrência de *L. varisectus*.

As assembleias reconhecidas no restante da seção, após a última ocorrência de *Hamiapollenites karrooensis*, são compatíveis com a Zona *Lueckisporites virkkiae*. Táxons relacionados a este intervalo, tais como *Lunatisporites varisectus* e *Staurosaccites cordubensis*, tornam-se progressivamente mais abundantes e frequentes. O gênero *Lueckisporites* tem sua primeira ocorrência na porção intermediária da Formação Palermo (555 m) e torna-se frequente no restante da

seção. *Weylandites lucifer* ocorre em níveis da Formação Irati. A única exceção é a presença de *Potonieisporites congoensis* na Formação Serra Alta, em 513 m, considerando-se que o limite superior da distribuição estratigráfica desta espécie foi situado na Subzona *P. goraiensis* por Souza (2006). Contudo, uma mudança na distribuição deste táxon na Bacia do Paraná já havia sido evidenciada por Di Pasquo *et al.* (2018), que identificaram a espécie em níveis da Formação Serra Alta, no Estado de Santa Catarina.

Embora o reconhecimento de distintas assembleias palinológicas seja possível ao longo da seção, o limite exato entre as biozonas deixa algumas questões em aberto. Devido à relativa escassez de táxons-guia na base da Formação Rio Bonito, e à coexistência de *H. fusiformis* e *H. karrooensis*, é difícil fazer inferências a respeito do limite exato entre as subzonas *Protohaploxylinus goraiensis* e *Hamiapollenites karrooensis*. Certamente há uma mudança na composição da microflora a partir da porção superior da Formação Rio Bonito, contudo, essa mudança está mais provavelmente relacionada a fatores paleoecológicos, visto que a metade inferior desta unidade é rica em níveis de carvão, evidenciando uma paleovegetação diferenciada. O limite entre as zonas *Vittatina costabilis* e *Lueckisporites virkkiae*, por outro lado, mostra-se impreciso devido à coexistência de *Hamiapollenites karrooensis* e *Lunatisporites varisectus* nos níveis 605 m e 600 m, espécies cuja distribuição é considerada não simultânea por Souza & Marques-Toigo (2003, 2005).

O aumento quantitativo e a presença mais consistente de táxons relacionados à Zona *Lueckisporites virkkiae* a partir da porção média da Formação Palermo poderiam constituir indicadores mais fiéis de uma verdadeira mudança na composição da microflora. É possível que o uso de dados quantitativos seja mais adequado para definir esta transição, de tal forma que a base da Zona *Lueckisporites virkkiae* seria mais claramente representada pela ocorrência consistente de certos táxons, e não necessariamente por sua primeira ocorrência. Partindo deste princípio, a porção média da Formação Palermo poderia compreender o limite entre as zonas *Vittatina costabilis* e *Lueckisporites virkkiae* no material estudado. Contudo, a determinação de um limite exato é difícil, já que nenhum dos táxons identificados tem uma distribuição completamente contínua ao longo da seção.

Com o aumento da amostragem palinológica na Bacia do Paraná e a publicação de mais trabalhos de cunho bioestratigráfico, variações na amplitude

estratigráfica de determinadas espécies têm se tornado mais frequentes. No Rio Grande do Sul, tais ocorrências já foram constatadas em diversas localidades, sobretudo ao longo da margem leste da bacia, onde aflora a sequência permocarbonífera. Na região sul do estado, entre os municípios de Bagé e Candiota, Mori & Souza (2010) analisaram a palinoestratigrafia de um afloramento das formações Rio Bonito e Palermo. Os dados palinológicos não permitiram a subdivisão da Zona *Vittatina costabilis*, visto que marcadores da Subzona *Hamiapollenites karroensis* não foram reconhecidos. Ademais, espécies como *Illinites unicus*, *Protohaploxylinus goraiensis* e *Protohaploxylinus limpidus* foram reconhecidas em níveis atribuídos à Zona *Lueckisporites virkkiae*, coexistindo com *Lueckisporites virkkiae* e *Weylandites lucifer* em níveis da Formação Rio Bonito.

Um trabalho mais aprofundado foi realizado por Mori & Souza (2012), na localidade de Hulha Negra. Os autores estudaram a palinologia de dois poços, cujas seções abrangiam o Grupo Itararé e as formações Rio Bonito, Palermo, Irati, Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto. Novamente a análise palinológica não permitiu o reconhecimento da Subzona *Hamiapollenites karroensis* e revelou diversas sobreposições na distribuição estratigráfica dos táxons-guia de distintas unidades. *Weylandites lucifer* foi encontrado em níveis atribuídos a Zona *Vittatina costabilis*, ao passo que *Hamiapollenites karroensis* foi reconhecido tanto em associação com espécies marcadoras da Zona *Lueckisporites virkkiae* como da Subzona *Protohaploxylinus goraiensis*.

Na região central do estado, Leite (2017) registrou a ocorrência de *Lunatisporites variesectus*, espécie restrita à Zona *Lueckisporites virkkiae*, em associação com *Illinites unicus*, marcador da Zona *Vittatina costabilis* e da Subzona *Protohaploxylinus goraiensis*. Embora o autor não tenha realizado um trabalho de cunho propriamente bioestratigráfico, seus resultados indicam uma situação semelhante àquela evidenciada por Mori & Souza (2010, 2012), na qual a Subzona *Hamiapollenites karroensis* estaria ausente e elementos das Zonas *Vittatina costabilis* e *Lueckisporites virkkiae* coexistiriam.

Boardman (2011) apresentou uma análise de novos registros palinológicos para o Afloramento Quitéria e Mina do Faxinal, além de uma análise integrativa entre essas localidades e o Afloramento Morro do Papaléo, situado no município de Mariana Pimentel. O trabalho associou dados da fito- e da palinoestratigrafia, da estratigrafia de sequências e de datações radiométricas para melhor compreender a geocronologia da região estudada. No Afloramento Quitéria, observou-se uma

assembleia palinológica correspondente à Subzona *Protohaploxylinus goraiensis*, incluindo espécies como *Vittatina costabilis*, *Vittatina subsaccata*, *Vittatina vittifera* e *Protohaploxylinus limpidus*. Nenhum táxon diagnóstico da Subzona *Hamiapollenites karrooensis* foi observado, contudo, em dois níveis foram registrados *Striatopodocarpites pantii* e *Weylandites* sp., formas típicas da Zona *Lueckisporites virkkiae*. A Mina do Faxinal apresentou resultados muito semelhantes àqueles do Afloramento Quitéria. A presença de *Protohaploxylinus goraiensis* e *Illinites unicus* permitiu sua associação com a Subzona *Protohaploxylinus goraiensis*, muito embora *Lueckisporites virkkiae* tenha sido encontrado em um nível.

Diferentemente das duas seções analisadas por Boardman (2011), no Afloramento Morro do Papaléo observa-se uma associação palinológica inteiramente compatível com a Subzona *Protohaploxylinus goraiensis*. Smaniotto *et al.* (2006) analisaram a palinologia de três níveis estratigráficos desta localidade, dois relativos à Formação Rio Bonito e um ao Grupo Itararé. O estudo revelou uma associação dominada por esporos, na qual também ocorriam os três marcadores da subzona supracitada: *Protohaploxylinus goraiensis*, *Protohaploxylinus limpidus* e *Illinites unicus*. Nenhuma forma relacionada à Subzona *Hamiapollenites karrooensis* ou à Zona *Lueckisporites virkkiae* foi recuperada. Boardman (2011) sugere que a diferença entre a constituição das assembleias palinológicas das localidades analisadas em seu trabalho e aquela do Afloramento Morro do Papaléo poderia se dever à posição geográfica deste último na região do Paleovale Mariana Pimentel. Segundo a autora, o posicionamento na porção mais distal do paleovale poderia ter implicado em uma erosão mais intensa com as mudanças do nível de base, eliminando uma possível zona de transição entre as duas biozonas na parte superior da Formação Rio Bonito.

Levando em consideração os dados apresentados neste estudo, bem como os de diversos trabalhos realizados no Rio Grande do Sul, é possível observar cenários semelhantes do ponto de vista bioestratigráfico. Embora as zonas *Vittatina costabilis* e *Lueckisporites virkkiae* tenham sido reconhecidas sistematicamente em diversas porções da Bacia do Paraná, a coexistência de espécies-guia de ambas as zonas é recorrente. Com isso em mente, é importante lembrar que esquemas bioestratigráficos são modelos teóricos, representando condições naturais complexas e sujeitas a inúmeros complicadores de natureza biológica e geológica. Variações regionais da paleoflora, a velocidade de dispersão das espécies, assim como hiatos no registro geológico são fenômenos aos quais se pode atribuir a

inexistência de um limite perfeito entre unidades bioestratigráficas. No caso da Bacia do Paraná em particular, a amostragem parece sugerir que tais fatores poderiam ter desempenhado um papel em certas localidades, causando flutuações no limite exato entre as zonas *Vittatina costabilis* e *Lueckisporites virkkiae*. Por outro lado, a identificação da Subzona *Hamiapollenites karroensis* tem se mostrado problemática, estando ausente em muitos dos locais estudados no Rio Grande do Sul. Uma possível solução seria a eliminação da subdivisão da Zona *Vittatina costabilis*.

Variações na microflora semelhantes àquela descrita em Souza & Marques-Toigo (2003, 2005) observadas no exterior também originaram esquemas bioestratigráficos correlacionáveis com este, porém com abordagens ligeiramente distintas. Na Argentina, Vergel (1993) propôs um zoneamento palinológico para a Bacia do Chacoparaná, o qual foi posteriormente aprimorado por Archangelsky & Vergel (1996) e Gutiérrez & Balarino (2019). Para o Permiano, são descritas duas zonas de assembleia: Zona *Cristatisporites* e Zona *Striatites*, equivalentes às zonas *Vittatina costabilis* e *Lueckisporites virkkiae* da Bacia do Paraná. Vergel (1993), de modo similar ao modelo proposto por Marques-Toigo (1988), subdividiu a Zona *Cristatisporites* em três subzonas, as quais chamou de inferior, média e superior. De acordo com o autor, a Zona *Cristatisporites* tem seu limite inferior definido pela presença constante de grãos de pólen estriados, além de outros constituintes representados por uma diversidade de grãos de pólen monossacados e esporos, já presentes desde a biozona carbonífera subjacente (Zona *Potonieisporites-Lundbladispóra*). As três subzonas representam um progressivo câmbio palinoflorístico, desde níveis inferiores dominados por esporos e grãos de pólen monossacados, até níveis com dominância de bissacados estriados.

Em linhas gerais, as assembleias palinológicas características das zonas *Cristatisporites* e *Vittatina costabilis* apresentam alto grau de semelhança, contudo, há algumas pequenas diferenças. Na Bacia do Paraná, o primeiro aparecimento de *Protohaploxypinus limpidus* é marcador do início da Zona *Vittatina costabilis*, ao passo que o início da Zona *Cristatisporites* é marcado pelo desaparecimento da mesma espécie. A espécie *Lunatisporites variesectus*, restrita à Zona *Lueckisporites virkkiae*, é considerada marcadora da Zona *Cristatisporites* superior. Vale ressaltar que a ocorrência de *Lunatisporites variesectus* nos níveis superiores da Zona *Vittatina costabilis* já foi registrado por Leite (2017) além do presente estudo. As Zonas *Striatites* e *Lueckisporites virkkiae* caracterizam-se pela predominância

absoluta de grãos de pólen bissacados estriados. No material aqui estudado, equivalem à assembléia observada a partir do nível 560 m.

Nas bacias da região centro-oeste da Argentina, um zoneamento palinoestratigráfico foi elaborado por Césari & Gutierrez (2000). Novamente, os estratos permianos foram divididos em duas biozonas: Zona de Intervalo *Fusacolpites fusus-Vittatina subsaccata* e Zona de Assembleia *Lueckisporites-Weylandites*, equivalentes, respectivamente, às zonas *Vittatina costabilis* e *Lueckisporites virkkiae*. Assim como na Bacia do Chacoparaná, a semelhança entre a palinologia da Bacia do Paraná e aquela das bacias do oeste argentino é evidente. A Zona *Fusacolpites fusus-Vittatina subsaccata* tem seu limite inferior marcado pelo primeiro aparecimento de *Fusacolpites fusus*, assim como de outros táxons comuns na Bacia do Paraná como *Vittatina subsaccata*, *Hamiapollenites fusiformis*, *Striatoabieites multistriatus*, entre outros. A Zona *Lueckisporites-Weylandites* é caracterizada pelo predomínio de grãos de pólen estriados e poliplicados, tais como espécies do gênero *Lueckisporites*, *Lunatisporites variesectus*, *Staurosaccites cordubensis* e *Weylandites lucifer*.

Outro importante esquema bioestratigráfico foi elaborado por Beri (2011) para o Permiano da porção uruguaia da Bacia do Paraná. A Zona de Assembleia *Cristatisporites inconstans-Vittatina saccata* equivale à Zona *Vittatina costabilis* de Souza & Marques-Toigo (2005) e caracteriza-se pela dominância de esporos trilete e grãos de pólen monossacados, além de raros grãos de pólen bissacados, teniados e plicados, e a presença conspícua de espécies do gênero *Cristatisporites*. Sobreposta, situa-se a Zona de Assembleia *Striatoabieites anaverrucosus-Staurosaccites cordubensis*, relacionada com a Zona *Lueckisporites virkkiae*. Tanto a biozona uruguaia como a brasileira são tipicamente dominadas por grãos de pólen bissacados e tem seu início marcado, entre outros fatores, pela primeira ocorrência de espécies do gênero *Lueckisporites*.

A comparação do zoneamento palinoestratigráfico de Souza & Marques-Toigo (2005) com outros zoneamentos desenvolvidos na Bacia do Paraná e arredores evidencia uma série de semelhanças na evolução da microflora regional durante o Permiano Inferior. A mudança ocorrida entre as assembleias relativas às zonas *Vittatina costabilis* e *Lueckisporites virkkiae*, bem como seus equivalentes em outros zoneamentos, é particularmente bem marcada. O surgimento do gênero *Lueckisporites* e de espécies como *Weylandites lucifer* e *Staurosaccites cordubensis* parece representar um horizonte bem definido. Por outro lado, a subdivisão da Zona

Vittatina costabilis e seus equivalentes ainda apresenta problemas, embora um aumento progressivo na quantidade de grãos de pólen estriados ao longo dessas zonas já seja bem documentado.

Em linhas gerais, correlações da Bacia do Paraná com esquemas palinoestratigráficos desenvolvidos em outras regiões do Gondwana são difíceis e apresentam resultados imprecisos, possivelmente devido a diferentes distribuições fitogeográficas (Stephenson *et al.*, 2003). Contudo, um grande número de táxons é comum ao longo de diversas regiões do paleocontinente, possibilitando correlações de natureza especulativa entre a palinologia reconhecida na Bacia do Paraná e aquela de localidades como África (Falcon, 1975; Anderson, 1977; McRae, 1988; Modie & Le Herissé, 2009), Antártida (Lindström, 1995; Lindström, 1996), Índia (Tiwari & Tripathi, 1992), Austrália (Kemp *et al.*, 1977; Backhouse, 1991; Jones & Truswell, 1992; Backhouse, 1993) e o Oriente Médio (Stephenson *et al.*, 2003). Destaca-se o zoneamento proposto por Modie & Le Herissé (2009) para sequência Karroo inferior (Botswana), o qual apresenta grande similaridade com os esquemas de Souza & Marques-Toigo (2003, 2005) e Souza (2006).

1.6.2 Considerações paleoambientais

Por ser diretamente relacionada com a composição da vegetação, do fitoplâncton e dos fungos, refletindo suas preferências ecológicas, a palinologia é uma ferramenta de grande potencial para interpretações paleoambientais. A análise palinológica do poço CBM-001-ST-RS fundamentou inferências paleoambientais e paleoecológicas, de acordo com as afinidades dos palinomorfos identificados.

As assembleias encontradas nos níveis inferiores da Formação Rio Bonito, sobretudo as relacionadas aos níveis de carvão, representam a típica palinoflora de ambiente pantanoso, relacionada com os ambientes de lagunas costeiras atribuídos à base da unidade. Esses níveis caracterizam-se pela dominância absoluta de esporos em relação a grãos de pólen, refletindo uma vegetação predominantemente pteridofítica e higrófila. Observa-se também a maior diversidade de algas de toda a seção estudada, representada sobretudo por espécies das classes Chlorophyceae (*Botryococcus braunii*, *Quadrisporites horridus* e *Quadrisporites lobatus*) e Zygnemaphyceae (*Tetraporina* e *Pilasporites*), associadas a ambientes de água doce ou salobra. O esporo de fungo *Portalites gondwanensis* também foi identificado, corroborando essa interpretação. A eventual presença de algas da

classe Prasinophyceae (*Leiosphaeridia* sp. e *Tasmanites* sp.) evidencia eventos de influência marinha.

A partir dos níveis finais da Formação Rio Bonito, esporomorfos de afinidade ginnospérmica (grãos de pólen), começam a dominar as assembleias, denotando uma paleoflora de afinidade xerófila. Tal transição representa um distanciamento dos ambientes costeiros identificados na base da formação e a deposição em um ambiente cada vez mais distal. Na Formação Irati, o ambiente marinho franco é evidenciado pela presença de acritarcos do Complexo *Micrhystridium*, os quais são os elementos mais abundantes em dois níveis (532 m e 528 m). *Leiosphaeridia* sp., outro indicador marinho, é observada em níveis das formações Irati e Serra Alta, mas em quantidades reduzidas.

Por não constituir o objetivo principal deste trabalho, dados quantitativos não foram coletados. As inferências supramencionadas são, portanto, de caráter especulativo, baseadas na presença ou ausência de táxons e na composição geral das amostras.

1.7 Conclusões

A análise do poço CBM-001-ST-RS revelou assembleias palinológicas diversas e abundantes. A porção basal da seção estudada, composta pelos níveis inferiores da Formação Rio Bonito, é caracterizada pela dominância de esporos, com pouca ou nenhuma presença de grãos de pólen. A partir dos níveis superiores da unidade, há um aumento na quantidade de grãos de pólen teniados e plicados, os quais se tornam dominantes nos estratos sobrepostos. *Granulatisporites austroamericanus* ocorre em 638 m e 633 m, ao passo que *Protohaploxypinus goraiensis* ocorre apenas em 633 m, sendo as primeiras espécies-guia da Zona *Vittatina costabilis* e da Subzona *P. goraiensis* a ser identificadas. O gênero *Vittatina* ocorre pela primeira vez em 605 m, em associação com as espécies *Hamiapollenites fusiformis* e *Hamiapollenites karrooensis*. A coexistência destas últimas impossibilita a definição exata do limite entre as subzonas da Zona *Vittatina costabilis*. Um táxon relacionado à Zona *Lueckisporites virkkiae* (*Lunatisporites variesectus*) também ocorre pela primeira vez em 605 m. Com base na composição geral das assembleias palinológicas estudadas aqui, assim como na distribuição das espécies-guia, optamos por tentativamente posicionar o limite entre as zonas *Vittatina costabilis* e

Lueckisporites virkkiae na porção média da Formação Palermo, entre 555 m e 560 m.

A identificação do conteúdo palinológico do poço CBM-001-ST-RS e sua comparação com amostragens palinológicas em diversas regiões do Rio Grande do Sul revelam uma evolução microflorística semelhante. As zonas *Vittatina costabilis* e *Lueckisporites virkkiae* são reconhecidas de forma consistente, embora haja eventuais sobreposições na distribuição estratigráfica de táxons atribuídos às duas biozonas. A literatura atual evidencia a existência de variações no limite exato entre as unidades, de forma que a distribuição estratigráfica de espécies-guia anteriormente atribuídas a diferentes zonas poderia coincidir. A presença ou ausência de tais flutuações seria condicionada por fatores locais como os paleoambientes ou a preservação do registro estratigráfico. Sugere-se que os intervalos bioestratigráficos em questão poderiam ser mais fielmente representados pela abundância e pela ocorrência consistente de determinados táxons-guia, de modo que a identificação das biozonas não seria prejudicada pelos fatores acima mencionados. Essa nova abordagem levaria em consideração as assembleias palinológicas como um todo, descrevendo um quadro palinoestratigráfico mais condizente com aquele observado na literatura.

A subdivisão da Zona *Vittatina costabilis*, no entanto, é de difícil reconhecimento, estando a Subzona *Hamiapollenites karrooensis* ausente na maior parte da amostragem analisada. Uma possível solução seria sua eliminação, tornando a unidade indivisa.

A partir dos dados geocronológicos mais recentes, apresentados por Griffis *et al.* (2018) e Rocha-Campos *et al.* (2019), atribui-se uma idade asseliana para a base da Formação Rio Bonito e kunguriana para a Formação Irati. Dados radiométricos relativos às formações Palermo e Serra Alta ainda não foram publicados, devido à escassez de estratos vulcanogênicos nessas unidades. Assim, infere-se uma idade asseliana-wordiana para a seção completa.

A análise quantitativa do conteúdo palinológico observado no material estudado permitiu interpretações paleoambientais. A abundância de esporos e algas de água doce a salobra na porção basal da Formação Rio Bonito indica um sistema costeiro, dominado por vegetação higrófila. O subsequente aumento na quantidade de grãos de pólen indica deposição em um ambiente gradualmente mais distal. A presença de acritarcos em dois níveis da Formação Irati corrobora a interpretação de deposição em um mar epicontinental.

A comparação de diferentes zoneamentos na Bacia do Paraná e arredores denota a existência de uma mesma mudança na composição da paleoflora com variações em escala regional, representada pelo compartilhamento de táxons-guia em diversas unidades. Conclui-se que o zoneamento bioestratigráfico proposto por Souza & Marques-Toigo (2003, 2005) é eficiente, embora esteja sujeito a variações locais ou regionais. A elaboração de um esquema mais sofisticado para a Bacia do Paraná depende de maior amostragem e da posterior integração dos dados.

REFERÊNCIAS

- Anderson, J.M. 1977. The biostratigraphy of the Permian and Triassic. Part 3: a review of Gondwana palynology with particular reference to the northern Karoo basin, South Africa. *Memoirs of the Botanical Survey of South Africa*, 41:1–133.
- Arai, M. 1980. Contribuição dos pólenes estriados na bioestratigrafia neopaleozóica da parte NE da Bacia do Paraná. *Boletim IG-USP*, 11: 125–134.
- Araujo, L.M. 2001. *Análise da expressão estratigráfica dos parâmetros de geoquímica orgânica e inorgânica nas sequências Irati*. Porto Alegre, 301p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Archangelsky, S. & Vergel, M.M. 1996. Capítulo 2. Cuenca Chacoparanense. Paleontología, bioestratigrafía y paleoecología. In: Archangelsky, S. (Ed.). *El Sistema Pérmico en la Republica Argentina y en la República Oriental del Uruguay*. Córdoba, Academia Nacional de Ciencias, p. 40–44.
- Assine, M.L., Zacharias, A.A. & Perinotto, J.A. 2003. Paleocorrentes, paleogeografia e sequências deposicionais da Formação Tatuí, Centro-Leste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, 33(1): 33–40.
- Azcuy, C.L. & Jelín, R. 1980. Las Palinozonas del límite Carbónico-Pérmico en La Cuenca Paganzo. In: 2º CONGRESO ARGENTINO DE PALEONTOLOGÍA Y BIOESTRATIGRAFÍA e 1º CONGRESO LATINOAMERICANO DE PALEONTOLOGÍA, 1978, Buenos Aires. *Actas...* v. 4, p. 51–67.
- Backhouse, J. 1991. Permian palynostratigraphy of the Collie Basin, Western Australia. *Review of Paleobotany and Palynology*, 67: 237–314.
- Backhouse, J. 1993. Palynology and correlation of Permian sediments in the Perth, Collie and Officer Basins. *Geological Survey of Western Australia*, Report 34: 111–128.
- Barbosa, O. & Almeida, F.F.M. 1949. Nota sobre a estratigrafia da série Tubarão no Estado de São Paulo. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 21(1): 65–68.

- Barbosa, O. & Gomes, F.A. 1958. Pesquisa de petróleo na Bacia do Rio Corumbataí, Estado de São Paulo. *Boletim da Divisão de Geologia e Minas - DNPM*, 171: 1–40.
- Barss, M.S. 1967. Carboniferous and Permian Spores of Canada. *Geological Survey of Canada*, Paper 67-11: 1–94.
- Barss, M.S. & Hacquebard, P.A. 1967. Age and the stratigraphy of the Pictou Group in the Maritime Provinces as revealed by fossil spores. *Geological Association of Canada*, Special Paper 4: 267–282.
- Barss, M.S., Hacquebard, P.A. & Howie, R.D. 1963. Palynology and stratigraphy of some Upper Pennsylvanian and Permian rocks of the Maritime Provinces. *Geological Survey of Canada*, Paper 63-3: 1–13.
- Beri, A., Gutiérrez, P. & Balarino, R. 2011. Palynostratigraphy of the late Palaeozoic of Uruguay, Paraná Basin. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 167: 16–29.
- Bharadwaj, D.C. 1974. Palynological subdivisions of Damuda series. *In*: Surange, K.R., Lakhanpal, R.N. & Bharadwaj, D.C. (Eds.). *Aspects and appraisal of Indian palaeobotany*. Lucknow, Birbal Sahni Institute of Palaeobotany, p. 392–396.
- Bharadwaj, D.C., Kar, R.K. & Navale, K.B. 1976. Palynostratigraphy of the Lower Gondwana deposits in Paraná and Maranhão basins, Brazil. *Biological Memoirs*, Paleopalynological Serie-3, 1(1–2): 53–108.
- Bharadwaj, D.C. & Tiwari, R.S. 1963. On two monosaccate genera from Barakar Stage of India. *The Palaeobotanist*, 12(2): 139–146.
- Boardman, D.R. 2011. *Paleobotânica e palinologia dos depósitos Eopermianos do Paleovale Mariana Pimentel, Rio Grande do Sul, Brasil (Formação Rio Bonito, Bacia do Paraná): Análise taxonômica e bioestratigráfica*. Porto Alegre, 223p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Boardman, D.R., Iannuzzi, R., Souza, P.A. & Lopes, R.C. 2012a. Paleobotanical and palynological analysis of Faxinal coalfield (Lower Permian, Rio Bonito

- Formation, Paraná Basin), Rio Grande do Sul, Brazil. *International Journal of Coal Geology*, 102: 12–25.
- Boardman, D.R., Souza, P.A., Iannuzzi, R. & Mori, A.L.O. 2012b. Paleobotany and palynology of the Rio Bonito Formation (Lower Permian, Paraná Basin, Brazil) at the Quitéria outcrop. *Ameghiniana*, 49(4): 451–472.
- Burjack, M.I.A. 1984. *Caracterização da matéria orgânica dispersa nos sedimentos da Formação Irati, Permiano Superior da Bacia do Paraná*. Porto Alegre, 231p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Cagliari, J., Philipp, R.P., Buso, V.V., Netto, R.G., Hillebrand, P.K., da Cunha Lopes, R., Basei, M.A.S. & Faccini, U.F. 2016. Age constraints of the glaciation in the Paraná Basin: Evidence from new U-Pb dates. *Journal of the Geological Society*, 173(6): 871–874.
- Castro, J.C., Maciel, U., Alves, C.F.C. & Grecchi, R.C. 1993. O Grupo Guatá (Permiano Inferior) na margem aflorante paulista. *In: SIMPÓSIO SOBRE CRONOESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ, 1., 1993, Rio Claro. Resumos...* Rio Claro, UNESP, p. 55–56.
- Cazzulo-Klepzig, M., Menegat, R. & Guerra-Sommer, M. 2005. Palynology and paleobotany in the reconstruction of landscape units from the Candiota coalfield, Permian of Paraná Basin, Brazil. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 8(1): 83–98.
- Cazzulo-Klepzig, M., Piccoli, A.E.M. & Marques-Toigo, M. 1989. Reconhecimento de um marco estratigráfico com significado paleoecológico no Permiano da Bacia do Paraná (Grupos Guatá e Passa Dois). *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 11., 1989, Curitiba. Anais...* SBG, v.2, p. 971–982.
- Césari, S.N. & Gutiérrez, P.R. 2000. Palynostratigraphy of Upper Paleozoic sequences in central-western Argentina. *Palynology*, 24: 113–146.
- Chahud, A. 2007. *Paleontologia de vertebrados da transição entre os Grupos Tubarão e Passa Dois (Neopaleozóico) no centro-leste do Estado de São Paulo*. São Paulo, 172p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-

graduação em Geologia Sedimentar, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

- Clarke, R.F.A. 1965. Keuper miospores from Worcestershire, England. *Palaeontology*, 8(2): 294–321.
- Clarke, R.F.A. 1965. British Permian Saccate and Monosulcate Miospores. *Palaeontology*, 8(2): 322–354.
- Corrêa da Silva, Z. & Marques-Toigo, M. 1975. Carvão no Brasil: Mina de Candiota-Rio Grande do Sul. *In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE GEOLOGIA ECONÔMICA*, 2., 1975, Buenos Aires. *Actas...* Buenos Aires, v.1, p. 263–286.
- Daemon, R.F. 1966. Ensaio sobre a distribuição e zoneamento dos esporomorfos do Paleozoico Superior da Bacia do Paraná. *Boletim Técnico da Petrobrás*, 9: 211–218.
- Daemon, R.F. & Quadros, L.P. 1970. Bioestratigrafia do Neopaleozoico da Bacia do Paraná. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 24., 1970, Brasília. *Anais...* Brasília, SBG, v.1, p. 359–412.
- Di Pasquo, M., Grader, G.W., Isaacson, P., Souza, P.A., Iannuzzi, R. & Díaz-Martínez, E. 2015. Global biostratigraphic comparison and correlation of an early Cisuralian palynoflora from Bolivia. *Historical biology*, 27(7): 868–897.
- Di Pasquo, M., Souza, P. A., Kavali, P.S. & Felix, C.M. 2018. Seasonally warmer and humid climates in a lower paleolatitude position of southern Brazil (Paraná Basin): new findings of the *Lueckisporites virkkiae* Zone (late Cisuralian-Guadalupian) in the Serra do Rio do Rastro and neighboring localities. *Journal of South American Earth Sciences*, 82: 143–164.
- Dunn, M.T. 2001. Palynology of the Carboniferous-Permian boundary stratotype, Aidaralash Creek, Kazakhstan. *Review of Paleobotany and Palynology*, 116: 175–194.
- Du Toit, A.L. 1927. *A geological comparison of South America with South Africa*. Washington, The Carnegie Institution, Publication 381, 157p.

- Evans, C.R. 1969. Upper Carboniferous and Permian palynological stages and their distribution in Eastern Australia. *In: GONDWANA STRATIGRAPHY: IUGS SYMPOSIUM, 1967, Buenos Aires. Anais... Paris, UNESCO, v.2, p. 41–54.*
- Fairchild, T.R., Coimbra, A.M. & Boggiani, P.C., 1985. Ocorrência de estromatólitos silicificados na Formação Irati (Permiano) da borda setentrional da Bacia do Paraná (MT, GO). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 57(1): 117.
- Falcon, R.M.S. 1975. Palynostratigraphy of the Lower Karroo sequence in Sebungwe District, Mid Zambezi Basin, Rhodesia. *Paleontologia Africana*, 18:1–29.
- Falcon, R.M.S., Pinheiro, H.J. & Sheperd, P. 1984. The Palynobiostratigraphy of the major coal seams in the Witbank Basin with Lithostratigraphic, Chronostratigraphic and Palaeoclimatic implications. *Portugal Geological Services Communications*, 70(2): 215–243.
- Félix, C.M. 2012. *Nova abordagem para o tratamento taxonômico de determinadas espécies de palinómorfs do Paleozóico Superior do Gondwana, com ênfase na Bacia do Paraná, Brasil*. Porto Alegre, 227p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Fielding, C.R., Frank, T.D., Birgenheier, L.P., Rygel, M.C., Jones, A.T. & Roberts, J. 2008. Stratigraphic imprint of the Late Paleozoic Ice Age in eastern Australia: A record of alternating glacial and nonglacial climate regime. *Journal of the Geological Society*, 165(1): 129–140.
- Foster, C.B. 1975. Permian plant microfossils from the Blair Athol Coal Measures, Central Queensland, Australia. *Palaeontographica B*, 154: 121–171.
- Griffis, N.P., Mundil, R., Montanez, I.P., Isbell, J., Fedorchuk, N., Vesely, F., Iannuzzi, R. & Yin, Q.Z. 2018. A new stratigraphic framework built on U-Pb single-zircon TIMS ages and implications for the timing of the penultimate icehouse (Paraná Basin, Brazil). *Geological Society of America Bulletin*, 130(5–6): 848–858.
- Guerra-Sommer, M., Cazzulo-Klepzig, M., Formoso, M.L.L., Menegat, R. & Basei, M.A.S. 2005. New radiometric data from ash fall rocks in Candiota coal-bearing strata and the palynostratigraphic framework in southern Paraná Basin (Brazil). *In: Pankhurst, R.J. & Veiga, G.D. (Eds.). Gondwana 12:*

Geological and Biological Heritage of Gondwana, Abstracts. Córdoba, Academia Nacional de Ciencias, p. 89.

Guerra-Sommer, M., Cazzulo-Klepzig, M., Laquintinie Formoso, M.L., Menegat, R. & Mendonca-Filho, J.G. 2008c. U-Pb dating of tonstein layers from a coal succession of the southern Paraná Basin (Brazil): A new geochronological approach. *Gondwana Research*, 14(3): 474–482.

Guerra-Sommer, M., Cazzulo-Klepzig, M., Menegat, R., Formoso, M.L.L., Stipp Basei, M.A., Barboza, E.G. & Simas, M.W. 2008b. Geochronological data from the Faxinal coal succession, southern Paraná Basin, Brazil: A preliminary approach combining radiometric U-Pb dating and palynostratigraphy. *Journal of South American Earth Sciences*, 25(2): 246–256.

Guerra-Sommer, M., Cazzulo-Klepzig, M., Santos, J.O.S., Hartmann, L.A., Ketzer, J.M. & Formoso, M.L.L. 2008a. Radiometric age determination of tonsteins and stratigraphic constraints for the Lower Permian coal succession in southern Paraná Basin, Brazil. *International Journal of Coal Geology*, 74(1): 13–27.

Guerra-Sommer, M., Schmidt, I.D., Mussa, D., Kavali, P.S. & Shivanna, M. 2014. The stratigraphic significance of the Solenoid Complex in the Permian of Gondwana. *Geologia USP: Série Científica*, 14(2): 139–148.

Gutiérrez, P.R. & Balarino, M.L. 2019. A new palynological assemblage (Carboniferous) from the Chacoparaná Basin, Western Gondwana, and revision of the biostratigraphic scheme. *Journal of South American Earth Sciences*, 96: 1–16.

Hart, G.F. 1969. The stratigraphic subdivision and equivalents of the Karoo Sequence as suggested by palynology. *In: GONDWANA STRATIGRAPHY: IUGS SYMPOSIUM, 1967, Buenos Aires. Anais...* Paris, UNESCO, v.2, p. 23–32.

Hart, G.F. 1970. The biostratigraphy of Permian palynofloras. *Geoscience and Man*, 1: 89–131.

Holz, M., França, A.B., Souza, P.A., Iannuzzi, R. & Rohn, R. 2010. A stratigraphic chart of the Late Carboniferous/Permian succession of the eastern border of

- the Paraná Basin, Brazil, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 29: 381–399.
- Iannuzzi, R. & Souza, P.A. 2005. Floral succession in the Lower Permian deposits of the Brazilian Paraná Basin: an up-to-date overview. *In*: Lucas, S.G. & Zeigler, K.E. (Eds.). *The Nonmarine Permian*. New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin, v. 30, p. 144–149.
- Jasper, A., Menegat, R., Guerra-Sommer, M., Cazzulo- Klepzig, M. & Souza, P.A. 2006. Depositional cyclicity and paleoecological variability in an outcrop of Rio Bonito Formation, Early Permian, Paraná Basin, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 21: 276–293.
- Jones, M.J. & Truswell, E.M. 1992. Late Carboniferous and Early Permian palynostratigraphy of the Joe Joe Group, southern Galilee Basin, Queensland, and implications for Gondwanan stratigraphy. *BMR Journal of Australian Geology & Geophysics*, 13: 143–185.
- Kallkreuth, W.D., Holz, M., Levandowsky, J., Kern, M., Casagrande, J., Weniger, P. & Krooss, B. 2013. The coalbed methane (CBM) potential and CO₂ storage capacity of the Santa Terezinha Coalfield, Paraná Basin, Brazil – 3D modelling, and coal and carbonaceous shale characteristics and related desorption and adsorption capacities in samples from exploration borehole CBM001-ST-RS. *Energy Exploration & Exploitation*, 31(4): 485–527.
- Kemp, E.M., Balme, B.E., Helby, R.J., Kyle, R.A., Playford, G. & Price, P.L. 1977. Carboniferous and Permian palynostratigraphy in Australia and Antarctica; a review. *BMR Journal of Australian Geology and Geophysics*, 2: 177–208.
- Lages, L.C. 2004. *A Formação Irati (Grupo Passa Dois, Permiano, Bacia do Paraná) no furo de sondagem FP-01-PR (Sapopema, PR)*. Rio Claro, 117p. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- Lavina, E.L. 1991. *Geologia sedimentar e paleogeografia do Neopermiano e Eotriássico (Intervalo Kazaniano-Scythiano) da Bacia do Paraná*. Porto Alegre, 2v., 333p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- Lavina, E.L. & Lopes, R.C. 1986. A transgressão marinha do Permiano Inferior e a evolução paleogeográfica do Supergrupo Tubarão no Estado do Rio Grande do Sul. *Paula Coutiana*, 1: 51–103.
- Leite, M.G. 2017. *Palinologia e paleoambientes do Grupo Itararé e da Formação Rio Bonito (poço ST-01-RS, Cachoeira do Sul, RS, Brasil), Permiano Inferior da Bacia do Paraná*. Porto Alegre, 82p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Lele, K.M. 1963. Studies in the Talchir Flora of India: 2. Resolution of the Spore Genus *Nuskoisporites*. *The Palaeobotanist*, 12(2): 147–168.
- Lindström, S. 1995. Early Permian palynostratigraphy of the northern Heimefrontfjella mountain-range, Dronning Maud Land, Antarctica. *Review of Paleobotany and Palynology*, 89: 359–415.
- Lindström, S. 1996. Late Permian palynology of Fossilryggen, Vestfjella, Dronning Maud Land, Antarctica. *Palynology*, 20: 15–48.
- López-Gamundi, O.R. & Buatois, L.A. 2010. Introduction: Late Paleozoic glacial events and postglacial transgressions in Gondwana. In: López-Gamundi, O.R. & Buatois, L.A. (Eds.). *Late Paleozoic Glacial Events and Postglacial Transgressions in Gondwana*. Geological Society of America Special Paper 468, p. 5–8.
- Marques-Toigo, M. 1988. *Palinologia, bioestratigrafia e paleoecologia do Neopaleozóico da Bacia do Paraná nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, Brasil*. Porto Alegre, 259p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Marques-Toigo, M. 1991. Palynobiostratigraphy of the southern Brazilian Neopaleozoic Gondwana sequence. In: INTERNATIONAL GONDWANA SYMPOSIUM, 7., 1988, São Paulo. *Proceedings...* São Paulo, p. 503–515.
- Marques-Toigo, M., Corrêa da Silva, Z. & Herter, G.G. 1975. Geology and palynology of Candiota Coal Mine, RS, Brazil. In: CONGRESO ARGENTINO DE

- PALEONTOLOGÍA Y BIOESTRATIGRAFÍA, 1., 1974, Tucumán. *Actas...* Asociación Paleontológica Argentina, v.1, p. 401–427.
- Matos, S.L.F., Yamamoto, J.K., Riccomini, C., Hachiro, J. & Tassinari, C.C.G. 2001. Absolute dating of Permian ash-fall in the Rio Bonito Formation, Paraná Basin, Brazil. *Gondwana Research*, 4(3): 421–426.
- McRae, C.S. 1988. Palynostratigraphic correlation between the Lower Karoo sequence of the Waterberg and Pafuri coal-bearing basins and the Hammanskraal plant macrofossil locality, Republic of South Africa. *Geological Survey Memoir*, 75: 1–217.
- Meglhioratti, T. 2006. *Estratigrafia de seqüências das formações Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto (Permiano, Bacia do Paraná) na porção nordeste do Paraná e centro-sul de São Paulo*. Rio Claro, 133p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- Meyer, K.E.B. & Marques-Toigo, M. 2000. O Significado paleoambiental da microflora dos carvões da Malha IV, Mina de Candiota, RS, Permiano da Bacia do Paraná, Brasil. *Revista Universidade de Guarulhos, Geociências*, V (volume especial): 17–20.
- Milani, E.J. 1997. *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-oriental*. Porto Alegre, 255p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Milani, E.J., Melo, J.H.G., Souza, P.A., Fernandes, L.A. & França, A.B. 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 15(2): 265–287.
- Modie, B.N. & Le Hérissé, A. 2009. Late Paleozoic palynomorph assemblages from the Karoo Supergroup and their potential for biostratigraphic correlation, Kalahari Karoo Basin, Botswana. *Bulletin of Geosciences*, 84(2): 337–358.
- Mori, A.L.O. & Souza, P.A. 2010. Palinologia das formações Rio Bonito e Palermo (Permiano Inferior, Bacia do Paraná) em Candiota, Rio Grande do Sul, Brasil: novos dados e implicações bioestratigráficas. *Ameghiniana*, 47(1): 61–78.

- Mori, A.L.O. & Souza, P.A. 2012. Análise palinoestratigráfica dos depósitos permianos (poço HN-05-RS e HN-25-RS) do sul da Bacia do Paraná. *Ameghiniana*, 49(3): 319–342.
- Mori, A.L.O., Souza, P.A., Marques, J.C. & Cunha Lopes, R. 2012. A new U–Pb zircon age dating and palynological data from a Lower Permian section of the southernmost Paraná Basin, Brazil: Biochronostratigraphical and geochronological implications for Gondwanan correlations. *Gondwana Research*, 21(3): 654–669.
- Nahuys, J., Alpern, B. & Ybert, J.P. 1968. Estudo palinológico e petrográfico de alguns carvões do sul do Brasil. *Boletim Instituto Tecnológico do Rio Grande do Sul*, 46: 1–61.
- Pant, D.D. & Srivastava, G.K. 1965. Some Lower Gondwana miospores from Brazil. *Micropaleontology*, 11(4): 468–478.
- Petri, S. & Fúlfaro, V.J. 1966. Sobre a geologia da área balizada pelas cidades de Barra do Garças e Guiratinga, MT e Jataí e Amovinópolis, GO. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 15(3): 59–80.
- Pinto, I.D. & Ornellas, L.P. 1981. Permian insects from Paraná Basin, South Brazil. III Homoptera -1-Pereboridae. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE PALEONTOLOGIA, 2., 1981, Porto Alegre. *Anais...* v.1, p. 209–219.
- Playford, G. & Dino, R. 2000. Palynostratigraphy of upper Paleozoic strata (Tapajós Group), Amazonas Basin, Brazil: Part Two. *Palaeontographica B*, 255: 87–145.
- Putzer, H. 1954. Divisão da Formação “Palermo” no Sul de Santa Catarina e tentativa de interpretação genética. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 3(1): 1–28.
- Quadros, L.P. & Melo, J.H.G. 1987. Método prático de preparação palinológica em sedimentos pré-mesozóicos. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 1(2): 205–214.
- Ricardi-Branco, F., Caires, E.T. & Silva, A.M. 2006. Campo de estromatólitos gigantes de Santa Rosa de Viterbo, SP – Excelente registro do litoral do mar permiano Irati, Bacia do Paraná, Brasil. In: Winge, M., Schobbenhaus, C.,

Berbert-Born, M., Queiroz, E.T., Campos, D.A., Souza, C.R.G. & Fernandes, A.C.S. (Eds.). *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. Disponível em: < <http://sigep.cprm.gov.br/sitio125/sitio125.pdf> >. Acesso em: 13 jul. 2019.

Rocha-Campos, A. C., Basei, M. A. S., Nutman, A. P., Kleiman, L., Varela, R., Llambias, E., Canile, F.M. & Rosa, O. C. R. 2011. 30 million years of Permian volcanism recorded in the Choiyoi igneous Province (W Argentina) and their source for younger ash fall deposits in the Paraná Basin: SHRIMP U-Pb zircon geochronology evidence. *Gondwana Research*, 19(2): 509–523.

Rocha-Campos, A.C., Basei, M.A.S., Nutman, A.P. & Santos, P.R. 2006. SHRIMP U-Pb Zircon geochronological calibration of the Late Paleozoic Supersequence, Paraná Basin, Brazil. *In: SOUTH AMERICAN SYPOSIUM ON ISOTOPIC GEOLOGY*, 5., 2006, Punta del Este. *Short Papers...* p. 322–325.

Rocha-Campos, A.C., Basei, M.A.S., Nutman, A.P. & Santos, P.R. 2007. SHRIMP U-Pb zircon ages of the late Paleozoic sedimentary sequence, Paraná Basin, Brazil. *In: SIMPÓSIO SOBRE CRONOESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ*, 4., 2007, Armação de Búzios. *Boletim de Resumos...* Sociedade Brasileira de Paleontologia, p. 33.

Rocha-Campos, A.C., Basei, M.A.S., Nutman, A.P., Santos, P.R., Passarelli, C.R., Canile, F.M., Rosa, O.C.R., Fernandes, M.T., Santa Ana, H. & Veroslavsky, G. 2019. U-Pb Zircon Dating of Ash Fall Deposits from the Paleozoic Paraná Basin of Brazil and Uruguay: A Reevaluation of the Stratigraphic Correlations. *The Journal of Geology*, 127: 167–182.

Rocha-Campos, A.C. & Rösler, O. 1978. Late Paleozoic faunal and floral successions in the Paraná Basin, southeastern Brazil. *Boletim IG-USP*, 9: 1–16.

Rösler, O. 1978. The Brazilian Eogondwanic Floral Succession. *Boletim IG-USP*, 9: 85–91.

Rösler, O., Rohn, R. & Albamonte, L. 1981. Libélula permiana do Estado de São Paulo, Brasil (Formação Irati): *Gondvanoptilon Brasiliense* gen. et sp. nov. *In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE PALEONTOLOGIA*, 2., 1981, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre, CNPq/PETROBRÁS/FAPERGS, v.1, p. 221–232.

- Saad, A.R. 1977. *Estratigrafia do Subgrupo Itararé no Centro e Sul do Estado de São Paulo*. São Paulo, 107p. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Santos, R.V., Souza, P.A., Alvarenga, C.J.S., Dantas, E.L., Pimentel, M.M., Oliveira, C.G. & Araújo, L.M. 2006. Shrimp U-Pb Zircon dating and palinology of bentonitic layers from the Permian Irati Formation, Paraná Basin, Brazil. *Gondwana Research*, 9: 456–463.
- Sarjeant, W.A.S. & Stancliffe, R.P.W. 1994. The *Michrystridium* and *Veryhachium* complexes (Acritarcha: Acanthomorphae and Polygonomorphae): a taxonomic reconsideration. *Micropaleontology*, 40(1): 1–77.
- Schneider, R.L., Mühlmann, H., Tommasi, E., Medeiros, R.A., Daemon, R.F. & Nogueira, A.A. 1974. Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre, SBG, v. 1, p. 41–66.
- Silva, A.L.S.B. 2011. *Taxonomia de Ostracodes e Fácies Sedimentares das Formações Irati e Estrada Nova, nas Regiões de Alto Garças (MT) e Portelândia (GO)*. Cuiabá, 72p. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Mato Grosso.
- Simas, M.W., Guerra-Sommer, M., Cazzulo-Klepzig, M., Menegat, R., Schneider Santos, J.O., Fonseca Ferreira, J.A. & Degani-Schmidt, I. 2012. Geochronological correlation of the main coal interval in Brazilian Lower Permian: Radiometric dating of tonstein and calibration of biostratigraphic framework. *Journal of South American Earth Sciences*, 39: 1–15.
- Smaniotto, L.P., Fischer, T.V., Souza, P.A. & Ianuzzi, R. 2006. Palinologia do Morro do Papaléo, Mariana Pimentel (Permiano Inferior, Bacia do Paraná), Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 9(3): 311–322.
- Soares, M.B. 2003. A taphonomic model for the Mesosauridae assemblage of the Irati Formation (Paraná Basin, Brazil). *Geologica Acta*, 1(4): 349–361.
- Souza, P.A. 2006. Late Carboniferous palynostratigraphy of the Itararé Subgroup, northeastern Paraná Basin, Brazil. *Review of Paleobotany & Palynology*, 138: 9–29.

- Souza, P.A. & Marques-Toigo, M. 2001. Zona *Vittatina*: marco palinobioestratigráfico do Permiano Inferior da Bacia do Paraná. *Ciência Técnica-Petróleo*, 20: 153–159.
- Souza, P.A. & Marques-Toigo, M. 2003. An overview on the palynostratigraphy of the Upper Paleozoic Brazilian Paraná Basin. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*, 5(2): 205–214.
- Souza, P.A. & Marques-Toigo, M. 2005. Progress on the palynostratigraphy of the Permian strata in Rio Grande do Sul State, Paraná Basin, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 77(2): 353–365.
- Stephenson, M.H., Osterloff, P.L. & Filatoff, J. 2003. Palynological biozonation of the Permian of Oman and Saudi Arabia: progress and challenges. *GeoArabia*, 8(3): 467–496.
- Suguió, K. & Sousa, S.H.M. 1985. Restos de mesossaurídeos na Formação Corumbataí, Permiano da Bacia do Paraná, no Estado de São Paulo. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 57(3): 339–347.
- Sundaram, D. 1980. Observações palinológicas sobre alguns sedimentos do Gondwana Inferior da Bacia do Paraná, Brasil. *Boletim IG-USP*, 11: 135–142.
- Tiwari, R.S. & Navale, G.K.B. 1967. Pollen and Spore assemblage in some coals of Brazil. *Revue de Pollen et Spores*, 9(3): 583–603.
- Tiwari, R.S. & Tripathi, A. 1992. Marker Assemblage Zones of spores and pollen species through Gondwana Paleozoic and Mesozoic sequence in India. *The Palaeobotanist*, 40: 194–236.
- UFRGS. 2014. *Micropaleontologia das bacias do Amazonas e Solimões: refinamento bioestratigráfico da seção pensilvaniana e permiana com base em palinologia, fusulinídeos e conodontes*. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Relatório final, 4 vol., 3 anexos.
- Valdez Buso, V., Aquino, C.D., Paim, P.S.G., Souza, P.A., Mori, A.L.O., Fallgatter, C., Milana, J.P. & Kneller, B. 2019. Late Paleozoic glacial cycles and subcycles in western Gondwana: Correlation of surface and subsurface data of the Paraná Basin, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 531: 1–16.

- Valdez Buso, V., Milana, J.P., di Pasquo, M., Paim, P.S.G., Philipp, R.P., Aquino, C.D., Cagliari, J., Junior, F.C. & Kellner B. 2020. Timing of the Late Paleozoic glaciation in western Gondwana: New ages and correlations from Paganzo and Paraná Basins. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 544: 1–23.
- Vergel, M.M. 1993. Palinoestratigrafía de La secuencia neopaleozoica em la Cuenca Chacoparanense, Argentina. *In: CONGRÈS INTERNATIONAL DE LA STRATIGRAPHIE ET GÉOLOGIE DU CARBONIFÈRE ET PERMIEN*, 12., 1991, Buenos Aires. *Comptes Rendus...* v.1, p. 201–212.
- White, I.C. 1908. *Relatório sobre as coal measures e rochas associadas do sul do Brasil*. Rio de Janeiro, Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brazil, 300p. (Internal Report).
- Ybert, J.P. 1975. Etude des miospores du bassin houiller de Candiota-Hulha Negra, Rio Grande do Sul, Bresil. *Pesquisas em Geociências*, 5(1): 181–226.

2 ARTIGO

PALYNOSTRATIGRAPHIC ANALYSIS OF A PERMIAN SECTION FROM SOUTHERN PARANÁ BASIN IN BRAZIL, WESTERN GONDWANA

Rafael R. Bender^{a,*}, Paulo A. Souza^a, Pauline S. Kavali^{b,c}, Mahesh Shivanna^a & Cristina M. Félix^a

^a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Departamento de Paleontologia e Estratigrafia, Laboratório de Palinologia Marleni Marques Toigo, Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91.540-000, Porto Alegre, RS, Brazil

^b Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Rua do Lago, 562, São Paulo, SP, Brazil

^c Birbal Sahni Institute of Palaeosciences, 53 University Road, Lucknow 226007, Uttar Pradesh State, India

* Corresponding author. Address: Rua Sete de Setembro, 2846, Taquari, RS, Brazil CEP. 95.860-000

Tel.: +55 51 98040 2424

E-mail address: rafael.reisbender@yahoo.de

ABSTRACT

Palynological data have been intensively used for correlation and age assignments for the Upper Paleozoic deposits of Western Gondwana. In Paraná Basin, these data are relatively scarce from sections overlying the Permian coal beds, hampering paleoenvironmental and biostratigraphical interpretations. In this paper, new palynological assemblages from the CBM-001-ST-RS borehole, drilled in the Santa Terezinha coalfield, Rio Grande do Sul State, southernmost Brazil, are presented. The section comprises the Rio Bonito, Palermo, Irati and Serra Alta formations, Permian of Paraná Basin. Samples from 36 stratigraphic levels were analysed, allowing the recognition of 61 palynotaxa, including 16 taxa related to spores, 36 to pollen grains, 7 to algae, 1 to acritarchs and 1 to a fungal spore. According to stratigraphic distribution of guide-species and general composition of the palynological associations, two palynozones are recognized, in ascending order: the *Vittatina costabilis* (VcZ) and the *Lueckisporites virkkiae* (LvZ) zones. Differences in the stratigraphic range of certain taxa are observed when compared to those proposed by former palynostratigraphic schemes. Subdivision of the *Vittatina costabilis* Zone into two subzones is not verified in the studied material. Considering radiometric datings available for some equivalent levels within the Paraná Basin, as well as correlations with other Gondwana palynological associations, an Asselian-Wordian age is suggested for the studied section.

Keywords: Paraná Basin, Permian, Biostratigraphy, Palynostratigraphy, Palynology, Gondwana.

INTRODUCTION

The Pennsylvanian-Permian strata of Paraná Basin correspond to the Gondwana I Supersequence (Milani, 1997), which comprises a thick sedimentary sequence related to the end of the Late Paleozoic Gondwanic Ice Age (Fielding *et al.*, 2008; López-Gamundi & Buatois, 2010) and to the subsequent climatic amelioration that occurred in southern Gondwana from the Pennsylvanian to Permian times (Milani *et al.*, 2007). This interval corresponds to the Itararé (Pennsylvanian), Tubarão and Passa Dois groups (Permian), which are composed of several lithostratigraphic units, related to diverse and complex paleoenvironments (Holz *et al.*, 2010).

An abundant and diverse fossil record is known from these units, including vertebrates, invertebrates, plants, microfossils (e.g., palynomorphs, foraminifers) and ichnofossils (see synthesis in Petri & Souza, 1993; Iannuzzi & Souza, 2005; Holz *et al.*, 2010). However, due to the absence of fossil groups correlatable to international time charts, such as ammonoids and conodonts, the elaboration of a sophisticated chronostratigraphic framework is still difficult. In this context, palynomorphs have been one of the most successful tools used in the biostratigraphic zonation of this portion of the Paraná Basin, mainly due to their wide geographic distribution and abundance, resulting in a reliable resource for correlation.

The palynostratigraphic scheme for the Pennsylvanian and the Permian strata of this basin was presented by Souza (2006) and Souza & Marques-Toigo (2003, 2005), respectively. Posteriorly, new assemblages of organic-walled microfossils were recorded, improving the knowledge on the diversity of the spore-pollen succession and other palynological groups, such as fungal spores and chlorophyte algae, derived from local outcrop sections (e.g., Premaor *et al.*, 2006; Smaniotto *et al.*, 2006; Mori & Souza, 2010; Boardman *et al.*, 2012), as well as from continuous subsurface sections (e.g., Neregato *et al.*, 2008; Mori & Souza, 2012). The latter sections are especially potential for a better understanding of the biostratigraphic succession in this portion of the Paraná Basin, since they allow the vertical delimitation of biohorizons. On this basis, this study presents new palynological assemblages retrieved from the CBM-001-ST-RS borehole, Santa Terezinha Coalfield (Rio Grande do Sul State, Brazil), as well as a palynostratigraphic correlation to the Permian palynozones of Souza & Marques-Toigo (2003, 2005).

GEOLOGICAL AND PALYNOSTRATIGRAPHICAL SYNOPSIS

Geological setting

The Paraná Basin is one of the largest intracratonic basins in the South American Platform; its surface covers an area of about 1,700,000 km² and spans over territorial portions of Brazil, Argentina, Uruguay and Paraguay (Fig. 1). The sedimentary filling of the basin was influenced by Paleozoic and Mesozoic tectonic-eustatic cycles and is comprised of a thick sequence, reaching over 7,000 m in its depocenter (Milani *et al.*, 2007).

The deposition of Gondwana I Supersequence took place in the context of the deglaciation that occurred in Southern Gondwana by the end of the Carboniferous and the climatic amelioration that followed during the Early Permian. The melting of the glaciers had a direct influence in the rise of sea levels and the subsequent transgression that characterized the beginning of Permian sedimentation in the Paraná Basin (Milani *et al.*, 2007). According to Holz *et al.* (2010), the rocks of the Rio Bonito Formation were deposited in this post-glacial context, associated with lagunar and fluvio-deltaic systems and comprise a facies association of orthoconglomerates and coarse to fine subarcose sandstones topped by mudstones and thick coal beds. The Palermo Formation, on the other hand, is interpreted as a shallow marine environment and is typically composed of siltstones and fine grained sandstones.

This transgressive tendency continued during the deposition of Irati and Serra Alta formations, characterized, respectively, by the development of an epicontinental sea and its subsequent flooding, forming a low energy shallow marine environment (Holz *et al.*, 2010). The main facies associations of these units are siltstones, mudstones and black shales, besides carbonates.

The overlying units were deposited following a regressive trend in great scale. Mainly pelitic deposits, interlaminated with very fine sandstones, showing storm-influenced sedimentary structures characterize the Teresina Formation, which is interpreted as an offshore to coastal plain environment (Holz *et al.*, 2010). The Rio do Rasto Formation consists of a progradational complex, including delta lobes, lacustrine mudstones, eolian sandstones and fluvial deposits (Milani *et al.*, 2007). A stratigraphic chart of this basin is presented in figure 2A, based on Milani *et al.* (2007) and Holz *et al.* (2010).

Previous palynostratigraphy

Although being subject of a great number of studies, the chronostratigraphic framework of the Paraná Basin is still not perfectly understood and encompasses a series of questions. The publication of a vast literature since the beginning of the twentieth century has led to a good understanding of the basin's sedimentary sequence from a lithostratigraphic point of view, however, precise dating and correlation of the rock strata is prevented by the lack of fossil groups correlatable with international time charts and the scarce radiometric data. In these circumstances, palynology serves as a potential biostratigraphic tool in this basin, providing correlatable biozones across Gondwana areas.

The first palynostratigraphic zonations for the Upper Paleozoic of the Paraná Basin were those of Daemon (1966) and Daemon & Quadros (1970). They proposed a biostratigraphic scheme that divided the Permo-carboniferous sequence into six interval zones, designated by letters (G, H, I, J, K, L), subdivided into eight subintervals (G, H₁, H₂, H₃, I₁, I₂+I₃+I₄, J, K, L₁, L₂ and L₃). Since the elaboration of these pioneer studies, many contributions have been made for the purposes of formalization and improvement of the palynostratigraphy of the Upper Paleozoic of Paraná Basin. Such contributions were based on samplings in variable scales and used diverse biostratigraphical approaches (Bharadwaj *et al.*, 1976; Arai, 1980; Burjack, 1984; Marques-Toigo, 1988; Marques-Toigo, 1991; Souza & Marques-Toigo, 2001; Souza & Marques-Toigo, 2003; Souza & Marques-Toigo, 2005; Souza, 2006).

Souza & Marques-Toigo (2003, 2005) and Souza (2006) recognized four interval palynozones through the Gondwana I Supersequence of the Paraná Basin based on spore-pollen taxa: *Ahrensia sporites cristatus* (AcZ), *Crucisaccites monoletus* (CmZ), *Vittatina costabilis* (VcZ) and *Lueckia sporites virkkiae* (LvZ). The two former are Pennsylvanian in age (correlatable to the G-H₂ intervals of Daemon & Quadros, 1970), whilst VcZ and LvZ (equivalent to the H₃-L₃ intervals) are Permian. However, recent radiometric dates suggest a latest Pennsylvanian age to the VcZ basal limit. The VcZ is further subdivided into two subzones: *Protohaploxylinus goraiensis* Subzone and *Hamiapollenites karrooensis* Subzone.



Figure 1. Geographic location of well CBM-001-ST-RS.

MATERIALS AND METHODS

This study is based on samples from 36 stratigraphic levels of borehole CBM-001-ST-RS, drilled in the Santa Terezinha coalfield, Rio Grande do Sul State, Brazil (Figs. 1, 2B). The studied section is lithostratigraphically composed of the Permian Rio Bonito, Palermo, Irati and Serra Alta formations. Processing of the samples was carried out in the Laboratório de Palinologia Marleni Marques-Toigo (Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul) following the standard procedure for Paleozoic palynological samples (Quadros & Mello, 1987).

The procedures consisted of physical disaggregation of the rock samples by maceration, followed by dissolution in hydrochloric and hydrofluoric acids for carbonate and silicate removal respectively. The remaining residue was sieved in order to concentrate organic particles between 20 μm and 250 μm . Glass slides were

mounted and stored in the Palynological Collection of the above mentioned laboratory, under the codification MP-P 13398 to MP-P 13567. Palynological analysis of the slides was performed through optical microscopy, with magnification of 200-1000 x. Photomicrographs of selected specimens were taken using an Olympus DP71 camera.

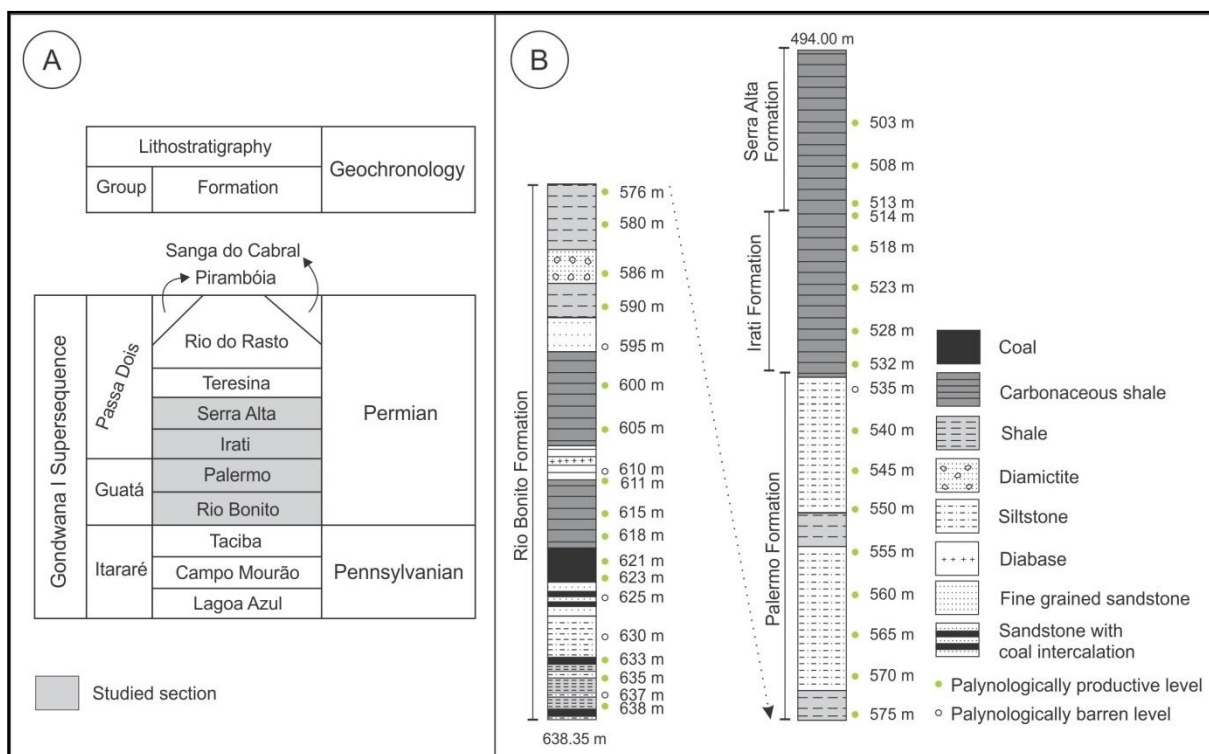


Figure 2. A. Stratigraphic setting of the studied section; B. Lithostratigraphic profile of well CBM-001-ST-RS.

RESULTS

Among the 36 studied samples, 6 were palynologically barren, the remaining were productive. The content of phytoclasts, amorphous organic matter and palynomorphs, as well as the degree of preservation of the latter ones, shows great variation throughout the section, constituting the subject of a further study. Palynological analysis revealed a total of 61 species, including 16 related to spores, 36 to pollen grains, 7 to algae, 1 to acritarchs and 1 to a fungal spore (Fig. 3).

It's important to emphasize that the identification and classification of algae related palynomorphs is still subject to controversy, since the morphological variation of similar taxa can be interpreted as either distinct species or different ontogenetic stages of a single taxon. In this study we opted for the taxonomic approach of Félix

(2012). Based on occurrences of algae in the Permocarboniferous of Paraná Basin, the author carried out detailed morphological evaluations, providing a taxonomic readjustment to certain algal taxa. The taxonomic study took into consideration the complex ontogeny of those groups, as well as the interference of taphonomic factors. Thus, the genera *Tetraporina* and *Balmeella* became part of the “*Tetraporina* Complex”, representing different phases of the ontogenetic cycle of a single species. Similarly, the genera *Pilasporites* and *Brazilea* were included in the “*Pilasporites* Complex”. The acritarch genera *Michrystidium* and *Veryhachium* are also considered “complexes”. Photomicrographs depicted in figure 7 show acritarchs of the *Michrystidium* Complex and were taken under fluorescent light, since the translucent nature of these palynomorphs renders their observation difficult under white light.

The basal strata of Rio Bonito Formation constitute the typical palynological assemblages associated with coal layers, with clear dominance of trilete spores, especially the genera *Punctatisporites*, *Lundbladispota*, *Horriditriletes*, *Granulatisporites* and *Brevitriletes*, besides the fungus species *Portalites gondwanensis* and algae of the genera *Quadrifurcata*, *Botryococcus* and *Tetraporina*. If present, pollen grains occur in extremely reduced amounts. As from the middle portion of Rio Bonito Formation, polyplicate and taeniate pollen grains become the most abundant palynomorphs, accompanied by the first occurrence of genera like *Vittatina*, *Hamiapollenites*, *Lunatisporites*, *Striatopodocarpites* and *Pakhapites*.

As a general rule, the Palermo Formation is characterized by less fertile samples, probably due to lithologic control, since it is comprised of more coarse grained rocks, such as siltstones and fine grained sandstones. When present, the microfloral composition is similar to that observed in the upper portion of Rio Bonito Formation.

Within the Irati Formation the dominance of pollen grains continues and there is a considerable decrease in the amount of spores and algae. Acritarchs of the *Michrystidium* Complex occur in two levels, where they represent the most abundant palynomorphs. In the last strata of the studied section, related to the Serra Alta Formation, a slight increase in the amount of monosaccate pollen grains is observed, the most common genera being *Caheniasaccites*, *Plicatipollenites* and *Potonieisporites*. Nevertheless, polyplicate and taeniate pollen grains are still the most abundant palynomorphs.

The stratigraphic distribution of each taxon along the studied section is presented in figure 4. Selected photomicrographs of the identified palynomorphs are presented in figures 5, 6 and 7.

PALYNOLOGICAL CONTENT	
Spores	
<i>Brevitriletes cornutus</i> (Balme & Hennelly) Backhouse 1991	<i>Lueckisporites virkikae</i> (Potonié & Klaus) Clarke 1965
<i>Calamospora</i> spp.	<i>Lunatisporites onerosus</i> Playford & Dino 2000
<i>Cyclogranisporites gondwanensis</i> Bharadwaj & Salujha 1964	<i>Lunatisporites variesectus</i> Archangelsky & Gamero 1979
<i>Granulatisporites austroamericanus</i> Archangelsky & Gamero 1979	<i>Protohaploxypinus amplus</i> (Balme & Hennelly) Hart 1964
<i>Horriditriletes gondwanensis</i> (Tiwari & Moiz) Foster 1975	<i>Protohaploxypinus goraiensis</i> (Potonié & Lele) Hart 1964
<i>Horriditriletes uruguaiensis</i> (Marques-Toigo) Archangelsky & Gamero 1979	<i>Protohaploxypinus panaki</i> Utting 1994
<i>Leiotriletes</i> spp.	<i>Protohaploxypinus perfectus</i> (Naumova) Samoilovich 1953
<i>Punctatisporites gretensis</i> Balme & Hennelly 1956	<i>Staurosaccites cordubensis</i> Archangelsky & Gamero 1979
<i>Verrucosisporites kaipingiensis</i> Imgrund 1952	<i>Striatoabieites anaverrucosus</i> Archangelsky & Gamero 1979
<i>Verrucosisporites donarii</i> Potonié & Kremp 1955	<i>Striatoabieites multistriatus</i> (Balme & Hennelly) Hart 1964
<i>Verrucosisporites microtuberosus</i> (Loose) Smith & Butterworth 1967	<i>Striatoabieites cf. richteri</i> (Klaus) Hart 1964
<i>Cristatisporites lestai</i> Archangelsky & Gamero 1979	<i>Striatopodocarpites cancellatus</i> (Balme & Hennelly) Hart 1964
<i>Lundbladisporea braziliensis</i> (Marques-Toigo & Pons) Marques-Toigo & Picarelli 1984	<i>Striatopodocarpites cf. fusus</i> (Balme & Hennelly) Potonié 1958
<i>Lundbladisporea riobonitensis</i> Marques-Toigo & Picarelli 1984	<i>Trochosporites reniformis</i> Wilson 1962
<i>Kendosporites striatus</i> (Salujha) Surange & Chandra 1974	<i>Pakhapites fusus</i> (Bose & Kar) Menéndez 1971
<i>Laevigatosporites vulgaris</i> Ibrahim 1933	<i>Pakhapites ovatus</i> (Bose & Kar) Playford & Dino 2000
	<i>Vittatina costabilis</i> Wilson 1962
	<i>Vittatina saccata</i> (Hart) Playford & Dino 2000
	<i>Vittatina subsaccata</i> Samoilovich 1953
	<i>Vittatina vittifera</i> (Luber & Valts) Samoilovich 1953
	<i>Weylandites lucifer</i> (Bharadwaj & Salujha) Foster 1975
Pollen grains	
<i>Caheniasaccites elongatus</i> Bose & Kar 1966	
<i>Caheniasaccites flavatus</i> (Bose & Kar) Azcuy & di Pasquo 2000	
<i>Plicatipollenites densus</i> Srivastava 1970	
<i>Plicatipollenites gondwanensis</i> (Balme & Hennelly) Lele 1964	
<i>Plicatipollenites malabarensis</i> (Potonié & Sah) Foster 1975	
<i>Potonieisporites barreli</i> Tiwari 1965	
<i>Potonieisporites congoensis</i> Bose & Maheshwari 1968	
<i>Potonieisporites lelei</i> Maheshwari 1967	
<i>Striomonosaccites incrassatus</i> Playford & Dino 2000	
<i>Alisporites</i> spp.	
<i>Hamiapollenites fusiformis</i> (Marques-Toigo) Archangelsky & Gamero 1979	
<i>Hamiapollenites karroensis</i> (Hart) Hart 1964	
<i>Lueckisporites agoulaensis</i> (Jardiné) Premaor, Fischer & Souza 2006	
<i>Lueckisporites nyakapendensis</i> Hart 1964	
<i>Lueckisporites stenoaeniatus</i> Menendez 1976	
	Algae
	<i>Botryococcus braunii</i> Kutzing 1849
	<i>Leiosphaeridia</i> spp.
	<i>Pilasporites</i> Complex (Balme & Hennelly 1956) emend. Tiwari & Navale 1967
	<i>Quadrisporites horridus</i> Hennelly ex Potonié & Lele 1961
	<i>Quadrisporites lobatus</i> (Tiwari & Navale) Kar & Bose 1976
	<i>Tasmanites</i> spp.
	<i>Tetraporina</i> Complex (Naumova) Naumova emend. Kar & Bose 1976
	Acritarchs
	<i>Michrystidium</i> Complex (Deflandre) Downie & Sarjeant 1963 emend. Sarjeant 1967
	Fungi
	<i>Portalites gondwanensis</i> (Nahuyts, Alpern & Ybert 1968) emend. Souza, Félix & Saldanha 2016

Figure 3. Taxonomic list of palynomorphs recorded in well CBM-001-ST-RS.

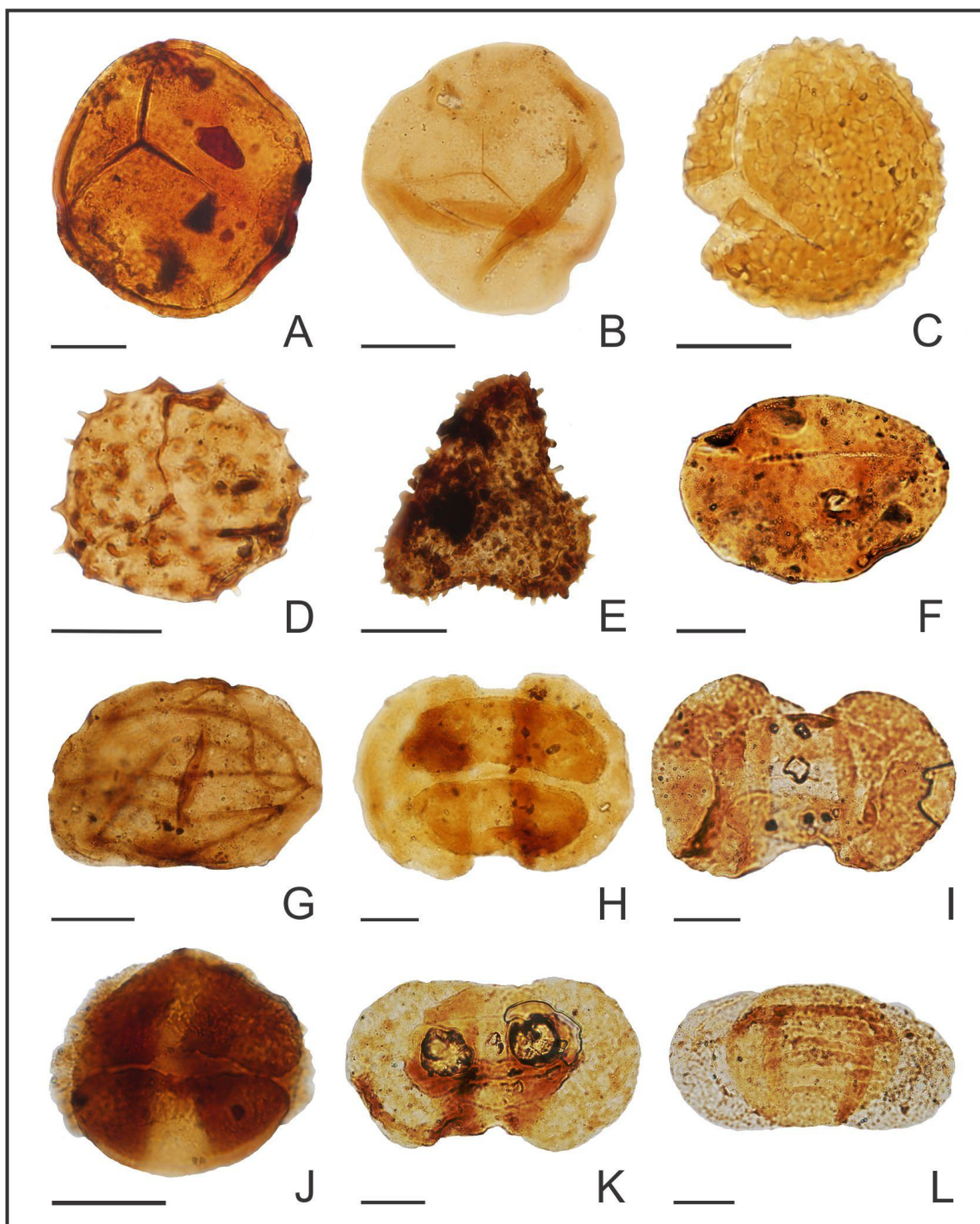


Figure 5. Selected photomicrographs. A. *Punctatisporites gretensis* (slide MP-P: 13414, England Finder coordinate: M55/1); B. *Calamospora* sp. (13422, N59); C. *Verrucosporites donarii* (13566, L35); D. *Brevitriletes cornutus* (13398, T53); E. *Horriditriletes uruguayensis* (13398, N58/1); F. *Laevigatosporites vulgaris* (13416, C54); G. *Kendosporites striatus* (13417, G44); H. *Lueckisporites virkkiae* (13478, J38/4); I. *Lueckisporites nyakapendensis* (13491, N30/3); J. *Staurosaccites cordubensis* (13468, D45/3); K. *Lunatisporites variesectus* (13477, J37/2); L. *Striatoabieites anaverrucosus* (13477, T39). Scale bar corresponds to 20 μ m.

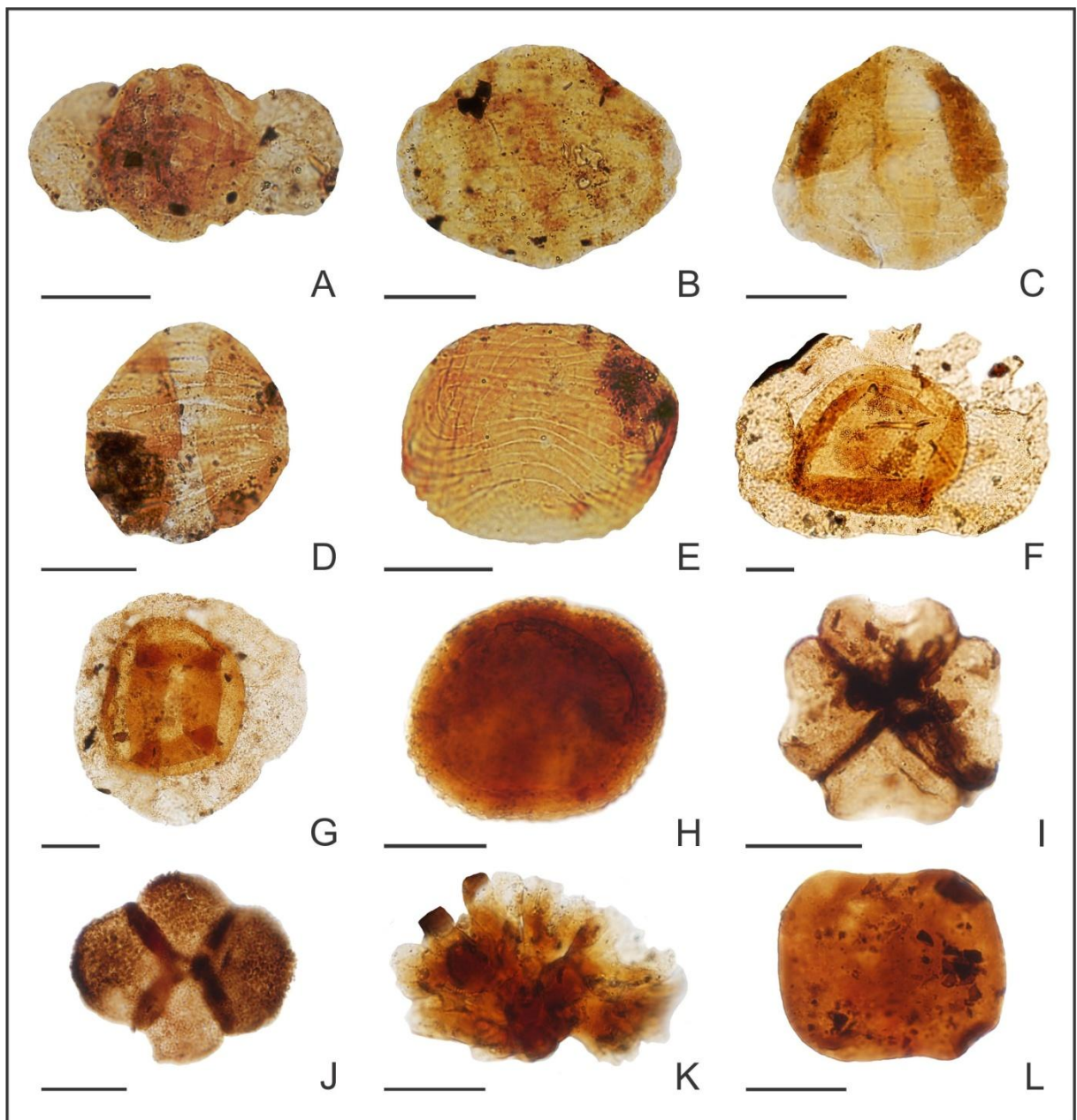


Figure 6. Selected photomicrographs. A. *Hamiapollenites karrooensis* (slide MP-P:13417, England Finder coordinate: W54/4); B. *Vittatina subsaccata* (13477, D41/1); C. *Vittatina costabilis* (13477, E47); D. *Pakhapites fusus* (13413, Q40); E. *Weylandites lucifer* (13477, R54/1); F. *Plicatipollenites gondwanensis* (13497, V34/1); G. *Potonieisporites congoensis* (13491, S47); H. *Portalites gondwanensis* (13417, D55); I. *Quadrisporites lobatus* (13398, C40); J. *Quadrisporites horridus* (13398, Z48/4); K. *Botryococcus braunii* (13417, T56/4); L. *Tetraporina* (13406, N35/1). Scale bar corresponds to 20 μm .

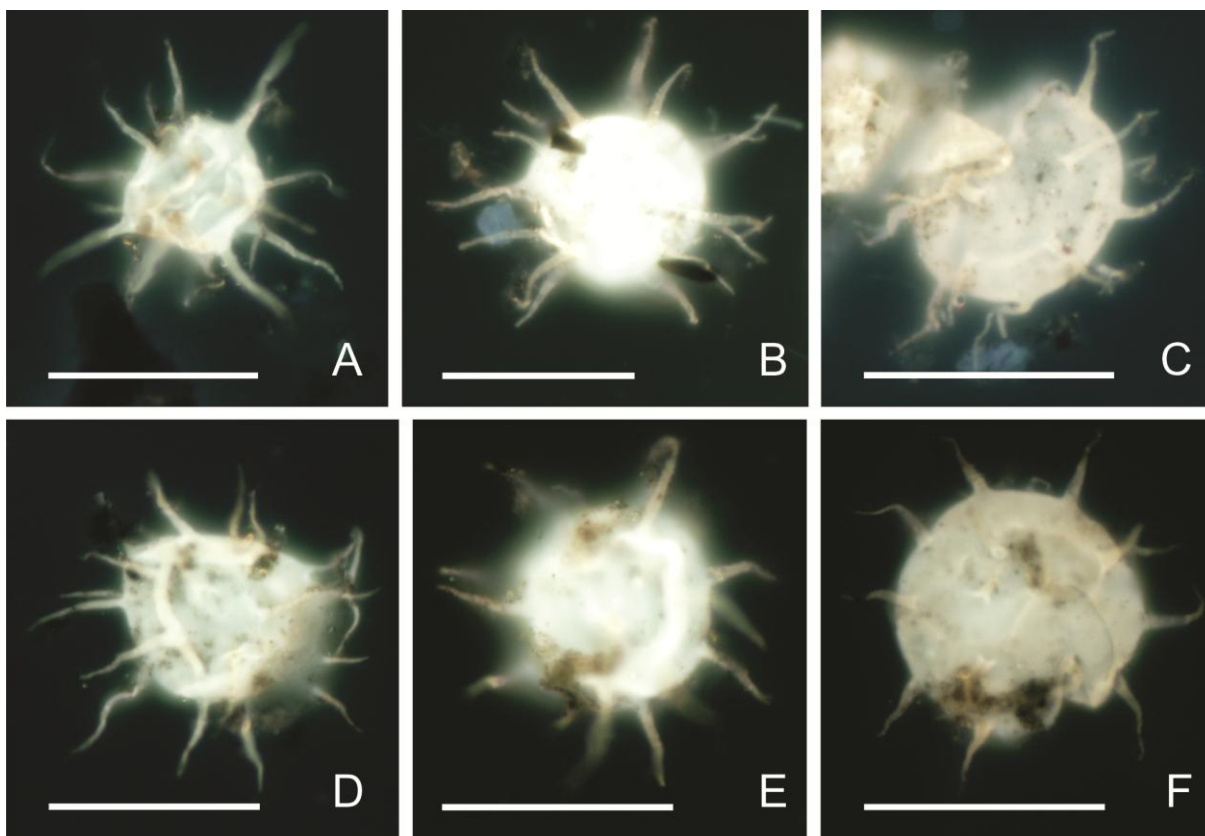


Figure 7. Selected photomicrographs: Acritarchs from the *Michrystidium* Complex. Slide MP-P: 13473, England Finder coordinates: A. G41; B. J51/4; C. W53/3; D. H36; E. F46/4; F. P29. Scale bar corresponds to 20 μm .

DISCUSSION

Palynostratigraphy

According to the palynostratigraphic schemes of Souza & Marques-Toigo (2003, 2005) and Souza (2006), two palynozones were identified in the studied section: the *Vittatina costabilis* Zone (VcZ) and the *Lueckisporites virkkiae* Zone (LvZ). The stratigraphic range of some important guide-species shows differences when compared with those proposed in the aforementioned zonations, allowing additional interpretations.

General characteristics of the VcZ include the occurrence of several bilaterally and radially symmetrical monosaccate pollen taxa (e.g., *Cannanoropollis*, *Plicatipollenites*, *Caheniasaccites*, *Potonieisporites* and *Striomonosaccites*), whereas disaccate pollen grains typically dominate the upper portion of the zone (e.g., *Limitisporites*, *Vittatina*, *Scheuringipollenites* and *Protohaploxylinus*). Spores can reach up to 80% of the assemblages in coal beds, thus being locally dominant. The

first appearance of the genera *Vittatina* and *Protohaploxylinus*, as well as the species *Fusacolpites fusus* and *Illinites unicus* define the lower limit of this zone. The LvZ is characterized by the dominance of taeniate disaccate pollen grains, such as *Lueckisporites*, *Staurosaccites*, *Striatopodocarpites*, *Striatoabieites*, *Lunatisporites* and *Marsupipollenites*. Monosaccate and disaccate pollen grains are less common, whilst spores are usually scarce. The base of this zone is marked by the first appearance of a series of species, including *Lueckisporites virkkiae*, *L. densicarpus*, *L. stenotaeniatus*, *Pakhapites fasciolatus*, *Weylandites lucifer*, *Protohaploxylinus hartii*, among others. The disappearance of *Lueckisporites virkkiae* marks its upper limit.

Current literature places the VcZ between the uppermost Itararé Group and the upper Rio Bonito Formation; however, identification of this biostratigraphic interval at the basal portion of the studied section (Rio Bonito Formation) is not direct due to the scarcity of guide taxa. *Granulatisporites austroamericanus* occurs at 630 m and 633 m, whereas *Protohaploxylinus goraiensis* occurs only at 633 m. The genus *Vittatina*, the species *Hamiapollenites karrooensis* and *Hamiapollenites fusiformis* have their first occurrences at 605 m, within the upper portion of Rio Bonito Formation. Since *H. fusiformis* and *H. karrooensis* are markers of the *P. goraiensis* Subzone and the *H. karrooensis* Subzone respectively, the limit between these units was not clearly recognized.

There is an increase in the amount of pollen grains within the upper portion of the Rio Bonito Formation; however, taxa related to the *Hamiapollenites karrooensis* Subzone and the LvZ are found coexisting in the same stratigraphic levels. *Hamiapollenites karrooensis* and *Lunatisporites variesectus* occur at 605 m and 600 m, leaving the boundary between these units open to interpretation. Besides, another occurrence of *Hamiapollenites karrooensis* is observed at 565 m, within the lower Palermo Formation, following the first appearance of *L. variesectus*.

The assemblages found in the remaining portion of the section, after the last occurrence of *Hamiapollenites karrooensis*, are compatible with the LvZ. Taxa related to this interval, such as *Lunatisporites variesectus* and *Staurosaccites cordubensis*, become increasingly more numerous and frequent. The genus *Lueckisporites* occurs for the first time within the lower Palermo Formation, at 555 m, and is represented by several species (*L. virkkiae*, *L. nyakapendensis*, *L. stenotaeniatus* and *L. agoulaensis*). *Weylandites lucifer* is observed within the Irati Formation. The only exception is the presence of *Potonieisporites congoensis* in the Serra Alta Formation,

at 513 m, since the upper stratigraphic range of the species was placed within the *P. goraiensis* Subzone by Souza (2006). However, di Pasquo *et al.* (2018) also recorded this taxon in the Serra Alta Formation in Santa Catarina State, which confirms the change in the range of this species in the Paraná Basin.

Although distinct palynological assemblages are identified throughout the section, the distribution of guide-species leaves the exact boundary between different palynozones open to speculation. The distribution of biostratigraphically significant taxa at the base of Rio Bonito Formation doesn't allow its precise subdivision into two subzones due to the coexistence of *H. karrooensis* and *H. fusiformis*. There is an evident change in the composition of the microflora within the upper Rio Bonito Formation, nevertheless, this change is most likely related to ecological conditions, since the base of the unit is punctuated by coal layers in the studied material, pointing to a specific paleoflora. On the other hand, the limit between the VcZ and the LvZ is not accurate in the CBM-001-ST-RS well due to the superposition of guide-species of both units. Occurrences of *Hamiapollenites karrooensis* coincide with *Lunatisporites variesectus*, contrary to the stratigraphic distribution attributed to these taxa by Souza & Marques-Toigo (2003, 2005).

The more consistent presence of taxa related to the LvZ from the middle portion of the Palermo Formation, as well as their quantitative increase, could represent a better indicator of an actual change in the microfloral composition. Perhaps the usage of quantitative values could be better suited for the definition of this biostratigraphic transition, in such a manner that the lower limit of the LvZ would be defined by the consistent occurrence of certain taxa, rather than their first appearance datum. Based on this approach, we could place limit between the VcZ and the LvZ in the studied section within the middle to upper portion of the Palermo Formation. However, the proposition of an exact boundary is difficult, since none of the identified taxa has a completely continuous presence throughout this interval.

With the advent of a more extensive palynological sampling in the Paraná Basin and the publication of new contributions, variations in the stratigraphic range of certain species have become more frequent. In the Rio Grande do Sul State, such occurrences have been found in many localities, especially along the eastern border of the basin. For instance, Mori & Souza (2010), analysing samples from an outcrop located between the municipalities of Bagé and Candiota, southern Rio Grande do Sul, didn't recognize the *Hamiapollenites karrooensis* Subzone. Moreover, species associated with the *Protohaploxylinus goraiensis* Subzone (*Protohaploxylinus*

goraiensis, *Protohaploxylinus limpidus* and *Illinites unicus*) were found within the LvZ, coexisting with *Lueckisporites virkkiae* and *Weylandites lucifer*.

A more detailed study was carried out by Mori & Souza (2012), based on two wells drilled in Hulha Negra, southern Rio Grande do Sul, in a more complete section of the Gondwana I Supersequence (Itararé Group, Rio Bonito, Palermo, Irati, Serra Alta, Teresina and Rio do Rasto formations). Once again, the recognition of the *Hamiapollenites karrooensis* Subzone was not possible and the stratigraphic distribution of guide-species revealed a series of superpositions. *Weylandites lucifer* was found in levels attributed to the VcZ, whereas *Hamiapollenites karrooensis* was recognized in association with markers of both the *Protohaploxylinus goraiensis* Subzone and the LvZ.

In the central region of Rio Grande do Sul state, Leite (2017) observed *Lunatisporites variesectus*, a species restricted to the LvZ, in association with *Illinites unicus*, a guide-species of the VcZ and the *Protohaploxylinus goraiensis* Subzone. Although Leite's study did not have a biostratigraphic approach, its data show a situation similar to that presented by Mori & Souza (2010, 2012), where the *Hamiapollenites karrooensis* Subzone is absent and elements of the VcZ and the LvZ coexist.

Boardman (2011) presented new palynological data based on samples recovered from the Quitéria outcrop and the Faxinal Coal Mine, besides a comparative analysis of these locations and the Morro do Papaléo outcrop (Mariana Pimentel, Rio Grande do Sul State). At the Quitéria Outcrop, a palynological assemblage consistent with the *Protohaploxylinus goraiensis* Subzone was observed, including species such as *Vittatina costabilis*, *Vittatina subsaccata*, *Vittatina vittifera* and *Protohaploxylinus limpidus*. None of the guide-species of the *Hamiapollenites karrooensis* Subzone was identified. *Striatopodocarpites pantii* and *Weylandites* sp., related to the LvZ, were present in two levels. Similar results were obtained at the Faxinal Coal Mine, where the presence of *Protohaploxylinus goraiensis* and *Illinites unicus* allowed its association with the *Protohaploxylinus goraiensis* Subzone, even though *Lueckisporites virkkiae* occurred in one level.

Unlike the assemblages described by Boardman (2011), at the Morro do Papaléo outcrop, the *Protohaploxylinus goraiensis* Subzone is observed. Smaniotto *et al.* (2006) studied the palynology of three stratigraphic levels from this locality, two of them within the Rio Bonito Formation and one within the Itararé Group. The analysis revealed an association dominated by spores, besides three biostratigraphic

markers: *Protohaploxylinus goraiensis*, *Protohaploxylinus limpidus* and *Illinites unicus*. None of the taxa associated with the *Hamiapollenites karrooensis* Subzone or the LvZ were identified. Boardman (2011) attributed the difference between the assemblages analyzed in her study and those of the Morro do Papaléo outcrop to the geographic position of the latter in the context of the Mariana Pimentel Paleovalley. According to that author, the distal location occupied by the Morro do Papaléo outcrop would have implied a more intense erosion, eliminating a possible transitional phase between both biostratigraphic units at the upper Rio Bonito Formation.

A comparison of the new data presented in this study and those obtained in several regions of the Rio Grande do Sul State, allows similar palynostratigraphic interpretations. Although recognizable in several portions of the Paraná Basin, the VcZ and the LvZ seem to occasionally share some of the taxa formerly considered exclusive of each biostratigraphic unit. With that in mind, it's important to emphasize that discrepancies in biostratigraphic zonations are subject to a number of biological and geological factors. Regional variations of the paleoflora, the rate of biological dispersal, as well as hiatuses in the stratigraphic record, are phenomena to which the inexistence of a perfect boundary between two given biostratigraphic units can be attributed. In the case of the Paraná Basin, the available data suggest that such factors could have played a role in certain locations, causing fluctuations in the exact limit between the VcZ and the LvZ. The identification of the *Hamiapollenites karrooensis* Subzone, on the other hand, seems to be problematic, since it's absent in several of the studied locations in the Rio Grande do Sul State. A possible solution would be the elimination of the subdivision of the VcZ.

Comparison with other palynostratigraphic schemes

Palynostratigraphic zonations developed in different regions of the Paraná Basin and nearby areas show clear correspondence with those proposed by Souza & Marques-Toigo (2003, 2005), possibly reflecting common events of paleofloristic evolution in central west Gondwana.

In the Argentinean portion of the basin (Chacoparaná Basin), the *Cristatisporites* Assemblage Zone and the *Striatites* Assemblage Zone (Vergel, 1993; Archangelsky & Vergel, 1996 and Gutiérrez & Balarino, 2019) are equivalent to the VcZ and the LvZ, respectively. According to Vergel (1993), the *Cristatisporites*

Assemblage Zone is characterized by the first continuous records of taeniate pollen grains (*Hamiapollenites fusiformis*, *Protohaploxypinus limpidus*), besides assemblages usually dominated by monosaccate pollen grains and spores. The *Striatites* Assemblage Zone is dominated by taeniate pollen grains (*Marsupipollenites striatus*, *Lueckisporites virkkiae*, *Lunatisporites variesectus*) and has its lower limit defined by a gradual transition, with a slow decrease in the amount of spores and monosaccate pollen grains.

When compared to the basins of central western Argentina, the VcZ and the LvZ are correlatable with the *Fusacolpites fusus-Vittatina subsaccata* Interval Zone and the *Lueckisporites-Weylandites* Assemblage Zone (Césari & Gutiérrez, 2000), respectively. The base of the *Fusacolpites fusus-Vittatina subsaccata* Zone is marked by the first appearance of *Fusacolpites fusus* and an increase of striate pollen grains, which become dominant in the subsequent zone. The first appearance of the genus *Lueckisporites* defines the lower limit of the *Lueckisporites-Weylandites* Zone.

Beri *et al.* (2011) presented a zonation for the Uruguayan portion of the Paraná Basin. The *Cristatisporites inconstans-Vittatina saccata* Assemblage Zone and the *Striatoabieites anaverrucosus-Staurosaccites cordubensis* Assemblage Zone are equivalent to the VcZ and the LvZ from the Brazilian portion of the basin. Much like the other palynostratigraphic schemes described above, the transition between the palynozones of Beri *et al.* (2011) is characterized by a decline in the proportion of spores and monosaccate pollen grains and the subsequent increase in the amount of plicate and taeniate pollen grains, typically marked by the first appearance of the genus *Lueckisporites*.

Considering the evolution of the microflora represented by the palynostratigraphic schemes in the Permian of Paraná Basin and nearby areas, it is possible to establish clear correlatable palynostratigraphic horizons at the base of the VcZ and the LvZ. Subdivision of the VcZ and its equivalents, however, doesn't seem to be as evident. A gradual transition between different palynological assemblages, similar to that described by Vergel (1993), could possibly also apply to the Brazilian portion of the Paraná Basin.

Palynological associations from other Gondwanic regions (Fig. 8) show a great number of shared elements when compared to those of Paraná Basin, however, precise correlations aren't accurate, possibly due to different phytogeographical distribution (Stephenson *et al.*, 2003).

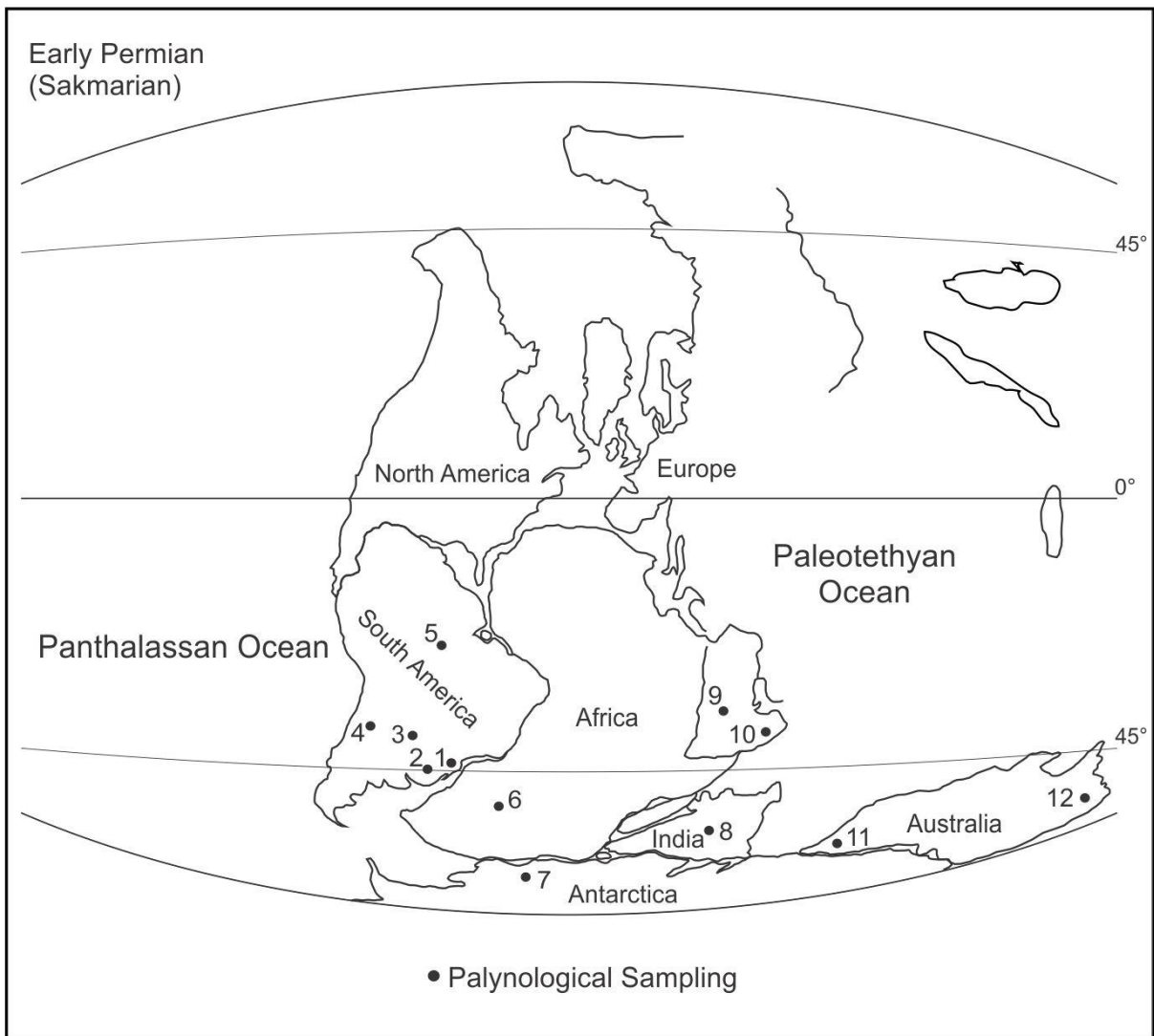


Figure 8. Approximate location of Gondwana palynological sampling cited in this work: 1. Smaniotto *et al.* (2006), Mori & Souza (2010), Boardman (2011), Mori & Souza (2012), Leite (2017); 2. Beri *et al.* (2011); 3. Vergel (1993), Archangelsky & Vergel (1996), Gutiérrez & Balarino (2019); 4. Césari & Gutiérrez (2000); 5. Playford & Dino (2000); 6. Modie & LeHerissé (2009); 7. Lindström (1995, 1996); 8. Tiwari & Tripathi (1992), Vijaya & Tiwari (1992); 9/10. Stephenson *et al.* (2003); 11. Kemp *et al.* (1977), Backhouse (1991, 1993); 12. Kemp *et al.* (1977). Paleogeographic reconstruction based on Scotese (2014).

A detailed palynostratigraphic scheme for the Tapajós Group (Late Carboniferous-Early Permian), in the Amazonas Basin, was proposed by Playford & Dino (2000). The lower portion of the *Vittatina costabilis* Zone (*sensu* Playford & Dino, 2000) is correlative with the VcZ of Paraná Basin, since both units are defined by the first appearance of the genus *Vittatina* and share a great number of taxa (*Vittatina costabilis*, *V. vittifera*, *V. subsaccata*, *V. saccata*, *Illinites unicus*,

Hamiapollenites fusiformis, among others). The upper portion of the forementioned zone, however, correlates better with the LvZ, considering that it encompasses the interval where taeniate bissacate pollen grains become dominant and the species *Lueckisporites virkkiae* appears for the first time. It's important to note that, although correlation is possible, many significant species show discrepancies in their stratigraphic range. For instance, in the Amazonas Basin, *Illinites unicus* occurs far below the first appearance of *Vittatina* spp. and only disappears at the end of the *Vittatina costabilis* Zone.

Studies on palynostratigraphy of southern Africa are not numerous (Falcon, 1975; Anderson, 1977; McRae, 1988). Modie & Le Herissé (2009) proposed a zonation based on core samples from the Lower Karroo sequence in Botswana, which shows remarkable similarity to the schemes of Souza & Marques-Toigo (2003, 2005) and Souza (2006). The *Hamiapollenites bullaeformis* Assemblage Zone can be associated with the VcZ on the basis of the first appearance and subsequent diversification of the genus *Vittatina*, whereas the *Cyclogranisporites gondwanensis* Assemblage Zone and the *Platysaccus papilionis*-*Striatopodocarpites fusus* Assemblage Zone can be correlated to the LvZ due to a series of shared taxa (e.g., *Lueckisporites virkkiae*, *Marsupipollenites striatus*, *Striatopodocarpites fusus*, *Striatopodocarpites pantii* and *Weylandits lucifer*).

Studies carried out in Dronning Maud Land, Antarctica, revealed diverse palynomorph taxa, many of which are commonly found in southern Brazil (Lindström, 1995; Lindström, 1996). The assemblages identified by Lindstrom (1995) include guide-species of the palynostratigraphic schemes of Souza & Marques-Toigo (2003, 2005) and Souza (2006), such as *Psomospora detecta*, *Protohaploxylinus goraiensis*, *Protohaploxylinus limpidus*, *Striatopodocarpites fusus* and *Marsupipollenites striatus*. Nevertheless, the stratigraphic distribution of these species in the Antarctic section has little in common with the ones presented by the forementioned zonations. In the Upper Paleozoic of Paraná Basin, *Psomospora detecta* is restricted to the Pennsylvanian *Ahrensiporites cristatus* Zone; *P. goraiensis* and *P. limpidus* to the VcZ; and *Marsupipollenites striatus* to the LvZ. In Antarctica, however, these taxa have been identified coexisting in certain stratigraphic intervals, dated as Early Permian (Lindström, 1995). Besides, in a Late Permian section, a species characteristic of the *Protohaploxylinus goraiensis* Subzone (*Protohaploxylinus limpidus*) was found in association with elements of the

LvZ, such as *Striatopodocarpites fusus*, *Marsupipollenites striatus*, *Weylandites lucifer* and *Lueckisporites* sp. (Lindström, 1996).

A much better correlation can be established with informal palynozones proposed for the Collie Basin of Western Australia (Backhouse, 1991, 1993). Lindström (1995) was able to attribute samples from two sections in Antarctica to the Australian *P. confluens* Zone (Backhouse, 1991), assigning them to an Asselian-Sakmarian age. Geochronologically, this unit would be equivalent to the *Protohaploxylinus goraiensis* Subzone of Paraná Basin, however, differences in the stratigraphic range of some key taxa suggest a microfloral evolution more closely related to that of Antarctica. For instance, species restricted to Middle and Upper Permian in Paraná Basin (LvZ) like *Marsupipollenites striatus*, occur from the Lower Permian in both Antarctica and Australia. Moreover, *Psomospora detecta* is exclusively Pennsylvanian in Brazil, but reaches the lower Permian of Australia (Jones & Truswell, 1992) and Antarctica (Lindström 1995).

Despite the fact that many palynomorph species found in Australia also occur in Paraná Basin, the Permian microflora of these locations is still considerably different, both in terms of diversity and the stratigraphic range of particular taxa. As a consequence, correlations are difficult and speculative. In a broader sense, however, some similarities can be identified in the general characteristics of the palynological associations. Even though taeniate forms have been registered from late Carboniferous strata in Australia (Kemp *et al.*, 1977), the consistent presence of such palynomorphs seems to mark the Permo-Carboniferous transition in both Australia and Paraná Basin, corresponding to the base of Stage 2 and the VcZ respectively. After such transition, there is a marked increase in the amount of taeniate and plicate pollen species along the Lower Permian section, which occurs from the beginning of the *P. confluens* Zone or Unit III (Kemp *et al.*, 1977) and could be related to the upper portion of the VcZ (*Hamiapollenites karrooensis* Zone). Eventually, these taxa become dominant in Paraná Basin as well as in Australia, nevertheless, the gradual character of this transition and local differences prevents its use as a biostratigraphic horizon.

A framework of eight biozones was proposed by Stephenson *et al.* (2003) for the uppermost Carboniferous and Permian of Saudi Arabia and Oman. Those authors were able to establish a correlation with the western Australian zonation of Backhouse (1991), for the Lower Permian strata. The OSPZ1 (Oman and Saudi Arabia Palynological Zone 1) was compared to the *P. confluens* and *P.*

pseudoreticulata zones (Backhouse, 1991, 1993), thus being considered Asselian/Sakmarian. The OSPZ3 was correlated with the overlaying *S. fusus* Zone (Backhouse, 1991, 1993), of Artinskian age. According to Stephenson *et al.* (2003), at the level of OSPZ4 and above, correlation with Australian zones becomes difficult due to significant differences in the palynological assemblages.

Congruent to Australia and Antarctica, *Psomospora detecta*, a species exclusively Carboniferous in Paraná Basin, reaches the Lower Permian in the Arabic Peninsula, characterizing the OSPZ2. A tentative correlation with the *Protohaploxylinus goraiensis* Subzone could be established based on the presence of *Protohaploxylinus limpidus*, whereas the first appearance of *Striatopodocarpites fusus* is common to OSPZ3 and the *Hamiapollenites karrooensis* Subzone. The first appearance of *Lueckisporites virkkiae* could be used as a biohorizon of correlation between the homonymous palynozone in Paraná Basin and the OSPZ4, although it's not an abundant species in the latter.

One of the most detailed biostratigraphic schemes for the Gondwanic Paleozoic and Mesozoic sequence of India was elaborated by Tiwari & Tripathi (1992), based on a revision of published papers concerning the Damodar Graben and the adjacent Rajmahal Basin. The study revealed a palynoflora considerably different from the one described in Paraná Basin, rendering correlations difficult and imprecise. The first appearance of bissaccate and taeniate forms in the *Plicatipollenites gondwanensis* Assemblage Zone and their subsequent diversification and dominance in the *Scheuringipollenites barakarensis* Assemblage Zone could be used as a tentative biohorizon for correlation with the VcZ and the LvZ respectively. The use of the first appearance of new morphological features in palynological assemblages as a tool for correlation was discussed by Vijaya & Tiwari (1992), who proposed a palynostratigraphic scheme based on that concept.

Chronostratigraphy

Due to the scarcity of radiometric data, the earliest palynostratigraphic zonations in the Paraná Basin relied on correlations with other basins for age calibration. For instance, many palynological studies from the northern hemisphere were used as parameter by Daemon & Quadros (1970). In many cases, this led to unprecise dating and a constant need for readjustments. Since the beginning of the century a series of efforts have been made in order to acquire more radiometric

information in the Paraná Basin, thus creating a more precise geochronological framework (Matos *et al.*, 2001; Guerra-Sommer *et al.*, 2005; Rocha-Campos *et al.*, 2006; Santos *et al.*, 2006; Rocha-Campos *et al.*, 2007; Guerra-Sommer *et al.*, 2008 a, b, c; Mori *et al.*, 2012; Simas *et al.*, 2012; Cagliari *et al.*, 2016; Griffis *et al.*, 2018; Rocha-Campos *et al.*, 2019). Although such studies have become much more common and the amount of radiometric data for the basin has increased significantly, some results seem to be contradictory, providing incompatible ages.

Mori *et al.* (2012) dated a volcanoclastic level interbedded with coal strata of the Rio Bonito Formation, in southern Rio Grande do Sul, finding an age of 281.4 ± 3.4 Ma (Cisuralian, Early Permian). Palynological analysis placed the studied section at the limit between the VcZ and LvZ. The authors assumed this to be the earliest occurrence of *Lueckisporites virkkiae* in the basin, since the obtained age was much lower than the one previously attributed to the species. Nevertheless, Griffis *et al.* (2018), in a reexamination of the radiometric framework for the Carboniferous-Permian succession of Paraná Basin, found an age of $297.77 + 0.35/ - 0.59$ Ma (Asselian, Early Permian) for the same outcrop studied by Mori *et al.* (2012). From a biostratigraphic point of view, this would imply either an older age for the LvZ, or a wider stratigraphic range for the homonymous species.

According to the latest dates obtained from the uppermost Itararé Group as well as from the Rio Bonito Formation (Cagliari *et al.*, 2016; Griffis *et al.*, 2018; Rocha-Campos *et al.*, 2019), we consider the VcZ between the top of the Pennsylvanian and the base of the Permian (Sakmarian), while the base of the overlying LvZ is believed to be Artinskian in age. Our study section is comprised within the Permian (Asselian-Wordian), since the Itararé Group (Pennsylvanian) was not verified (Fig. 9).

Geochronology		Palynoestratigraphy		Main palynological features	
PERMIAN	Lopingian	Changhsingian	Souza & Marques-Toigo (2003, 2005), Souza (2006)	<p>Dominance of taeniate and polyplicate pollen grains (<i>Weylandites</i>, <i>Lunatisporites</i>, <i>Striatopodocarpites</i>, <i>Striatoabieites</i>, <i>Lueckisporites</i>)</p> <p>Low abundance and diversity of spores (<i>Laevigatosporites</i>, <i>Thymospora</i>, <i>Convolutispora</i>) and monosaccate pollen grains</p> <p>First appearance of the genus <i>Lueckisporites</i></p>	
		Wuchiapingian			
	Guadalupian	Capitanian			
		Wordian			
		Roadian			
	Cisuralian	Kungurian			
		Artinskian			
		Sakmarian			<i>Vittatina costabilis</i> Zone
		Asselian			
		UPPER CARBONIFEROUS			Pennsylvanian
Kasimovian					
Moscovian	<i>Ahrensiporites cristatus</i> Zone				
Baskirian					

The section studied here

Figure 9. Stratigraphic range of the studied section in the context of the current palynoestratigraphic framework for the Upper Paleozoic of Paraná Basin.

Paleoenvironments and paleoclimate

In addition to palynoestratigraphic studies, palynology also plays a vital role in paleoenvironmental interpretation due to its direct relation with the vegetation, phytoplankton and fungi, thus reflecting their ecological preferences. Palynological analysis of well CBM-001-ST-RS allowed a series of paleoenvironmental inferences, based on the ecological affinities of the identified taxa.

The assemblages found in the lower levels of Rio Bonito Formation, especially those associated with coal layers, represent the typical palynoflora of peat forming environments, related to the system of coastal lagoons attributed to the base of the

unit. These levels are characterized by the absolute dominance of spores over pollen grains, reflecting a predominantly pteridophytic and hygrophylous vegetation. This interval also contains the highest diversity of algae of the studied section, comprised of species of Chlorophyceae (*Botryococcus braunii*, *Quadrisporites horridus* and *Quadrisporites lobatus*) and Zygnemaphyceae (*Tetraporina* and *Pilasporites*), attributed to brackish or fresh water environments. The fungal spore *Portalites gondwanensis* was also identified, corroborating this interpretation. The eventual occurrence of Prasinophyceae (*Leiosphaeridia* sp. and *Tasmanites* sp.) indicates episodes of marine influence.

As of the upper levels of Rio Bonito Formation, gymnospermic pollen grains start to dominate the assemblages, pointing to a xerophylous paleoflora. Such transition represents disassociation from the coastal environments identified at the base of the unit and deposition in a gradually more distal environment. Within two levels of the Irati Formation, the presence of acritarchs of the *Michrystidium* Complex indicates open marine settings. *Leiosphaeridia* sp., also a marine marker, is observed within levels of the Irati and Serra Alta Formations, but in reduced amounts.

As it is not indispensable for the main objective of this work, quantitative data were not obtained. Hence, the forementioned inferences are of speculative nature, based on the presence or absence of certain taxa and the general composition of the assemblages.

From a paleoclimatic perspective, the VcZ has been associated with the post-glacial Glossopteris Flora (Iannuzzi & Souza, 2005), recorded from the uppermost Itararé Group. The appearance of new plant groups, mainly linked to Coniferales and Glossopteridales, is reflected by the increasing amount of Gymnospermic taeniate bisaccate and polyplicate pollen grains in this zone, while spores tend to dominate within coal beds. The prevalence of taeniate mono- and bisaccate, as well as poliplicate and praecolpate pollen grains within the LvZ indicates the dominance of Gimnospermic groups, better adapted to water scarcity and warming conditions. Therefore, this zone is linked to a semi-arid to arid climatic phase.

FINAL CONSIDERATIONS

Analysis of CBM-001-ST-RS well revealed abundant and diverse palynological assemblages. The basal portion of the studied section, comprised by the lower levels of Rio Bonito Formation, is palynologically characterized by the dominance of spores,

with little or no presence of pollen grains. As from the upper levels of the forementioned unit, there is an increase in the amount of taeniate and plicate pollen grains, which become dominant in the overlying strata. *Granulatisporites austroamericanus* occurs at 638 m and 633 m, whereas *Protohaploxylinus goraiensis* occurs only at 633 m, being the first guide species of the *Vittatina costabilis* Zone and the *P. goraiensis* Subzone to be identified. The genus *Vittatina* appears for the first time at 605 m, in association with the species *Hamiapollenites karrooensis* and *Hamiapollenites fusiformis*. The coexistence of the latter ones leaves the boundary between both subzones of the VcZ unclear. A taxon related to the *Lueckisporites virkkiae* Zone (*Lunatisporites variesectus*) also occurs for the first time at 605 m. Based on the overall composition of the palynological assemblages studied here as well as the distribution of guide-species, we tentatively place the limit between the VcZ and the LvZ within the Palermo Formation, between 560 m and 555 m. The subzones of the VcZ were not delineated.

When compared with data obtained by studies in several regions of the Rio Grande do Sul state, this information allows the identification of similarities in the evolution of the microflora. The VcZ and the LvZ represent easily recognizable palynological assemblages in many regions of southern Paraná Basin. However, superpositions of guide-species of both biostratigraphic intervals have been reported. Current literature supports the existence of variations in the exact boundary between the units, in such a manner that the stratigraphic range of guide-species formerly attributed to different zones could overlap. The presence or absence of these fluctuations would be conditioned by regional factors, such as the paleoenvironmental settings or the preservation of the stratigraphical record. The subdivision of the VcZ on the other hand is not evident and doesn't seem to be supported by the sampling observed in this study, since the *Hamiapollenites karrooensis* Subzone could not be identified in several localities.

According to geochronological data presented by Griffis *et al.* (2018) and Rocha-Campos *et al.* (2019), an Asselian age is attributed to the base of Rio Bonito Formation and a Kungurian age to the Irati Formation. There is no available radiometric data for the Palermo and Serra Alta Formations, due to the lack of vulcanogenic strata in these units. Thus, an Asselian-Wordian age is assumed for the studied section.

Qualitative analysis of the palynological assemblages observed in the studied material allows paleoenvironmental interpretations. The abundance of spores and

fresh to brackish water algae at the basal levels of Rio Bonito Formation points to a coastal lagoon system, dominated by hygrophylous vegetation. The subsequent increase in the amount of pollen grains indicates deposition in a gradually more distal environment. The presence of acritarchs within two levels of Irati Formation corroborates the interpretation of deposition in an epicontinental sea.

A correlation with different palynostratigraphic zonations for the Paraná Basin and nearby areas indicates a single change in the composition of the paleoflora with variations in a regional scale, represented by the existence of several shared guide-species. It is concluded that the biostratigraphic scheme proposed by Souza & Marques-Toigo (2003, 2005) is useful, although subject to regional variations. The elaboration of a more sophisticated scheme to the Paraná Basin depends on a more extensive sampling and the subsequent integration of data.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by research grants awarded by the CNPq (PAS Project 313340/2018-8, RRB Project 132388/2018-9). PSK and MS are thankful to the CNPq for the BJT Scholarship of the Science without Frontiers Program (300578/2015-6) and the PDJ Scholarship (150574/2015-0), respectively. The authors thank Wolfgang Dieter Kallkreuth for granting access to the samples analysed in this study.

REFERENCES

- Anderson, J.M. 1977. The biostratigraphy of the Permian and Triassic. Part 3: a review of Gondwana palynology with particular reference to the northern Karoo basin, South Africa. *Memoirs of the Botanical Survey of South Africa*, 41:1–133.
- Arai, M. 1980. Contribuição dos pólenes estriados na bioestratigrafia neopaleozóica da parte nordeste da Bacia do Paraná. *Boletim IG-USP*, 11: 98–105.
- Archangelsky, S. & Vergel, M.M. 1996. Cuenca Chacoparanense. Paleontología, bioestratigrafía y paleoecología. In: Archangelsky, S. (Ed.). *El Sistema Pérmico en la Republica Argentina y en la República Oriental del Uruguay*. Córdoba, Academia Nacional de Ciencias, p. 40–44.
- Backhouse, J. 1991. Permian palynostratigraphy of the Collie Basin, Western Australia. *Review of Paleobotany and Palynology*, 67: 237–314.
- Backhouse, J. 1993. Palynology and correlation of Permian sediments in the Perth, Collie and Officer Basins. *Geological Survey of Western Australia*, Report 34: 111–128.
- Beri, A., Gutiérrez, P. & Balarino, R. 2011. Palynostratigraphy of the late Palaeozoic of Uruguay, Paraná Basin. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 167: 16–29.
- Bharadwaj, D.C., Kar, K.K. & Navale, G.K.B. 1976. Palynostratigraphy of the Lower Gondwana deposits in Paraná and Maranhão basins, Brazil. *Biological Memoirs, Paleopalynology Series*, 3(1): 53–108.
- Boardman, D.R. 2011. *Paleobotânica e palinologia dos depósitos Eopermianos do Paleovalle Mariana Pimentel, Rio Grande do Sul, Brasil (Formação Rio Bonito, Bacia do Paraná): Análise taxonômica e bioestratigráfica*. Porto Alegre, 223p. Doctoral Thesis, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Burjack, M.I.A. 1984. *Caracterização da matéria orgânica dispersa nos sedimentos da Formação Irati, Permiano Superior da Bacia do Paraná*. Porto Alegre,

- 209p. Doctoral Thesis, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Cagliari, J., Philipp, R.P., Buso, V.V., Netto, R.G., Hillebrand, P.K., da Cunha Lopes, R., Basei, M.A.S. & Faccini, U.F. 2016. Age constraints of the glaciation in the Paraná Basin: Evidence from new U-Pb dates. *Journal of the Geological Society*, 173(6): 871–875.
- Césari, S.N. & Gutiérrez, P.R. 2000. Palynostratigraphy of Upper Paleozoic sequences in central-western Argentina. *Palynology*, 24: 113–146.
- Daemon, R.F. 1966. Ensaio sobre a distribuição e zoneamento dos esporomorfos do Paleozoico Superior da Bacia do Paraná. *Boletim Técnico da Petrobrás*, 9(2): 211–218.
- Daemon, R.F. & Quadros, L.P. 1970. Bioestratigrafia do neopaleozoico da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 24., 1970, Brasília. *Anais...* Brasília, SBG, v.1, p. 359–412.
- Di Pasquo, M., Souza, P.A., Kavali, P.S. & Felix, C.M. 2018. Seasonally warmer and humid climates in a lower paleolatitude position of southern Brazil (Paraná Basin): new findings of the *Lueckisporites virkkiae* Zone (late Cisuralian-Guadalupian) in the Serra do Rio do Rastro and neighboring localities. *Journal of South American Earth Sciences*, 82: 143–164.
- Falcon, R.M.S. 1975. Palyno-Stratigraphy of the Lower Karroo Sequence in the central Sebungwe District, Mid-Zambesi Basin, Rhodesia. *Palaeontologia Africana*, 18: 1–29.
- Fielding, C.R., Frank, T.D., Birgenheier, L.P., Rygel, M.C., Jones, A.T. & Roberts, J. 2008. Stratigraphic imprint of the Late Paleozoic Ice Age in eastern Australia: A record of alternating glacial and nonglacial climate regime. *Journal of the Geological Society*, 165(1): 129–140.
- Félix, C.M. 2012. *Nova abordagem para o tratamento taxonômico de determinadas espécies de palinómorfs do Paleozóico Superior do Gondwana, com ênfase na Bacia do Paraná, Brasil*. Porto Alegre, 227p. Doctoral Thesis, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- Griffis, N.P., Mundil, R., Montanez, I.P., Isbell, J., Fedorchuk, N., Vesely, F., Iannuzzi, R. & Yin, Q.Z. 2018. A new stratigraphic framework built on U-Pb single zircon TIMS ages and implications for the timing of the penultimate icehouse (Paraná Basin, Brazil). *Geological Society of America Bulletin*, 130(5–6): 848–858.
- Guerra-Sommer, M., Cazzulo-Klepzig, M., Formoso, M.L.L., Menegat, R. & Basei, M.A.S. 2005. New radiometric data from ash fall rocks in Candiota coal-bearing strata and the palynostratigraphic framework in southern Paraná Basin (Brazil). *In: Pankhurst, R.J. & Veiga, G.D. (Eds.). Gondwana 12: Geological and Biological Heritage of Gondwana, Abstracts*. Córdoba, Academia Nacional de Ciencias, p. 89.
- Guerra-Sommer, M., Cazzulo-Klepzig, M., Laquintinie Formoso, M.L., Menegat, R. & Mendonca-Filho, J.G. 2008c. U-Pb dating of tonstein layers from a coal succession of the southern Paraná Basin (Brazil): A new geochronological approach. *Gondwana Research*, 14(3): 474–482.
- Guerra-Sommer, M., Cazzulo-Klepzig, M., Menegat, R., Laquintinie Formoso, M.L., Stipp Basei, M.A., Barboza, E.G. & Simas, M.W. 2008b. Geochronological data from the Faxinal coal succession, southern Paraná Basin, Brazil: A preliminary approach combining radiometric U-Pb dating and palynostratigraphy. *Journal of South American Earth Sciences*, 25(2): 246–256.
- Guerra-Sommer, M., Cazzulo-Klepzig, M., Santos, J.O.S., Hartmann, L.A., Ketzer, J.M. & Formoso, M.L.L. 2008a. Radiometric age determination of tonsteins and stratigraphic constraints for the Lower Permian coal succession in southern Paraná Basin, Brazil. *International Journal of Coal Geology*, 74(1): 13–27.
- Gutiérrez, P.R. & Balarino, M.L. 2019. A new palynological assemblage (Carboniferous) from the Chacoparana Basin, Western Gondwana, and revision of the biostratigraphic scheme. *Journal of South American Earth Sciences*, 96: 1–16.
- Holz, M., França, A.B., Souza, P.A., Iannuzzi, R. & Rohn, R. 2010. A stratigraphic chart of the Late Carboniferous/Permian succession of the eastern border of

- the Paraná Basin, Brazil, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(2): 381–399.
- Iannuzzi, R. & Souza, P.A. 2005. Floral succession in the Lower Permian deposits of the Brazilian Paraná Basin: an up-to-date overview. *In: Lucas, S.G. & Zigler, K.E. (Eds.). The Nonmarine Permian*. New Mexico, New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin, v. 30, p. 144–149.
- Jones, M.J. & Truswell, E.M. 1992. Late Carboniferous and Early Permian palynostratigraphy of the Joe Joe Group, southern Galilee Basin, Queensland, and implications for Gondwanan stratigraphy. *BMR Journal of Australian Geology & Geophysics*, 13: 143–185.
- Kemp, E.M., Balme, B.E., Helby, R.J., Kyle, R.A., Playford, G. & Price, P.L. 1977. Carboniferous and Permian palynostratigraphy in Australia and Antarctica: a review. *BMR Journal of Australian Geology & Geophysics*, 2: 177–208.
- Leite, M.G. 2017. *Palinologia e paleoambientes do Grupo Itararé e da Formação Rio Bonito (poço ST-01-RS, Cachoeira do Sul, RS, Brasil), Permiano Inferior da Bacia do Paraná*. Porto Alegre, 82p. Master Dissertation, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Lindström, S. 1995. Early Permian palynostratigraphy of the northern Heimefrontfjella mountain-range, Dronning Maud Land, Antarctica. *Review of Paleobotany and Palynology*, 89: 359–415.
- Lindström, S. 1996. Late Permian palynology of Fossilryggen, Vestfjella, Dronning Maud Land, Antarctica. *Palynology*, 20: 15–48.
- López-Gamundi, O.R. & Buatois, L.A. 2010. Introduction: Late Paleozoic glacial events and postglacial transgressions in Gondwana. *In: López-Gamundi, O.R. & Buatois, L.A. (Eds.). Late Paleozoic Glacial Events and Postglacial Transgressions in Gondwana*. Geological Society of America Special Paper 468, p. 5–8.
- Marques-Toigo, M. 1988. *Palinologia, bioestratigrafia e paleoecologia do Neopaleozóico da Bacia do Paraná nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, Brasil*. Porto Alegre, 259p. Doctoral Thesis, Programa de Pós-

graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- Marques-Toigo, M. 1991. Palynobiostratigraphy of the southern Brazilian Neopaleozoic Gondwana sequence. *In: INTERNATIONAL GONDWANA SYMPOSIUM, 7.*, 1988, São Paulo. *Proceedings...* São Paulo, p. 503–515.
- Matos, S.L.F., Yamamoto, J.K., Riccomini, C., Hachiro, J. & Tassinari, C.C.G. 2001. Absolute dating of Permian ash-fall in the Rio Bonito Formation, Paraná Basin, Brazil. *Gondwana Research*, 4(3): 421–426.
- McRae, C.S. 1988. Palynostratigraphic correlation between the Lower Karoo sequence of the Waterberg and Pafuri coal-bearing basins and the Hammanskraal plant macrofossil locality, Republic of South Africa. *Geological Survey Memoir*, 75: 1–217.
- Milani, E.J. 1997. *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-oriental*. Porto Alegre, 255p. Doctoral Thesis, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Milani, E.J., Melo, J.H.G., Souza, P.A., Fernandes, L.A. & França, A.B. 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 15(2): 265–287.
- Modie, B.N. & Le Hérissé, A. 2009. Late Paleozoic palynomorph assemblages from the Karoo Supergroup and their potential for biostratigraphic correlation, Kalahari Karoo Basin, Botswana. *Bulletin of Geosciences*, 84(2): 337–358.
- Mori, A.L.O. & Souza, P.A. 2010. Palinologia das formações Rio Bonito e Palermo (Permiano Inferior, Bacia do Paraná) em Candiota, Rio Grande do Sul, Brasil: novos dados e implicações bioestratigráficas. *Ameghiniana*, 47(1): 61–78.
- Mori, A.L.O. & Souza, P.A. 2012. Análise palinoestratigráfica dos depósitos permianos (poço HN-05-RS e HN-25-RS) do sul da Bacia do Paraná. *Ameghiniana*, 49(3): 319–342.
- Mori, A.L.O., Souza, P.A., Marques, J.C. & Cunha Lopes, R. 2012. A new U-Pb zircon age dating and palynological data from a Lower Permian section of the southernmost Paraná Basin, Brazil: Biochronostratigraphical and

- geochronological implications for Gondwanan correlations. *Gondwana Research*, 21(3): 654–669.
- Neregato, R., Souza, P.A. & Rohn, R. 2008. Registros Palinológicos Inéditos nas Formações Teresina e Rio do Rasto (Permiano, Grupo Passa Dois, Bacia do Paraná) Implicações Biocronoestratigráficas e Paleoambientais. *Pesquisas em Geociências*, 35(2): 9–21.
- Petri, S. & Souza, P.A. 1993. Síntese dos conhecimentos e novas concepções sobre a bioestratigrafia do Subgrupo Itararé, Bacia do Paraná, Brasil. *Revista do Instituto Geológico*, 14(1): 7–18.
- Playford, G. & Dino, R. 2000. Palynostratigraphy of upper Palaeozoic strata (Tapajós Group), Amazonas Basin, Brazil: Part two. *Palaeontographica Abteilung B*, 255: 87–145.
- Premaor, E., Fischer, T.V. & Souza, P.A. 2006. Palinologia da Formação Irati (Permiano Inferior da Bacia do Paraná), em Montividiu, Goiás, Brasil. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales, Nueva Serie*, 8(2): 221–230.
- Quadros, L.P. & Melo, J.H.G. 1987. Método prático de preparação palinológica em sedimentos pré-mesozóicos. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 1(2): 205–214.
- Rocha-Campos, A.C., Basei, M.A.S., Nutman, A.P. & Santos, P.R. 2006. SHRIMP U-Pb Zircon geochronological calibration of the Late Paleozoic Supersequence, Paraná Basin, Brazil. *In: SOUTH AMERICAN SYPOSIUM ON ISOTOPIIC GEOLOGY*, 5., 2006, Punta del Este. *Anais... Punta Del Este*, p. 298–301.
- Rocha-Campos, A.C., Basei, M.A.S., Nutman, A.P. & Santos, P.R. 2007. SHRIMP U-Pb zircons ages of the late Paleozoic sedimentary sequence, Paraná Basin, Brazil. *In: SIMPÓSIO SOBRE CRONOESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ*, 4., 2007, Rio de Janeiro. *Boletim de Resumos...Rio de Janeiro*, p. 33.
- Rocha-Campos, A.C., Basei, M.A.S., Nutman, A.P., Santos, P.R., Passarelli, C.R., Canile, F.M., Rosa, O.C.R., Fernandes, M.T., Santa Ana, H. & Veroslavsky, G. 2019. U-Pb Zircon Dating of Ash Fall Deposits from the Paleozoic Paraná

Basin of Brazil and Uruguay: A Reevaluation of the Stratigraphic Correlations. *The Journal of Geology*, 127(2): 167–182.

- Santos, R.V., Souza, P.A., Alvarenga, C.J.S., Dantas, E.L., Pimentel, M.M., Oliveira, C.G. & Araújo, L.M. 2006. Shrimp U-Pb Zircon dating and palinology of bentonitic layers from the Permian Irati Formation, Paraná Basin, Brazil. *Gondwana Research*, 9(4): 456–463.
- Scotese, C.R., 2014. Atlas of Permo-Carboniferous Paleogeographic Maps (Mollweide Projection), Maps 53 – 64, Volumes 4, The Late Paleozoic, PALEOMAP Atlas for ArcGIS, PALEOMAP Project, Evanston, IL.
- Simas, M.W., Guerra-Sommer, M., Cazzulo-Klepzig, M., Menegat, R., Schneider Santos, J.O., Fonseca Ferreira, J.A. & Degani-Schmidt, I. 2012. Geochronological correlation of the main coal interval in Brazilian Lower Permian: Radiometric dating of tonstein and calibration of biostratigraphic framework. *Journal of South American Earth Sciences*, 39: 1–1.
- Smaniotto, L.P., Fischer, T.V., Souza, P.A. & Ianuzzi, R. 2006. Palinologia do Morro do Papaléo, Mariana Pimentel (Permiano Inferior, Bacia do Paraná), Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 9(3): 311–322.
- Souza, P.A. 2006. Late Carboniferous palynostratigraphy of the Itararé Subgroup, northeastern Paraná Basin, Brazil. *Review of Paleobotany & Palynology*, 138(1): 9–29.
- Souza, P.A. & Marques-Toigo, M. 2001. Zona *Vittatina*: marco palinobioestratigráfico do Permiano Inferior da Bacia do Paraná. *Ciência Técnica-Petróleo*, 20: 153–159.
- Souza, P.A. & Marques-Toigo, M. 2003. An overview on the palynostratigraphy of the Upper Paleozoic Brazilian Paraná Basin. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*, 5(2): 205–214.
- Souza, P.A. & Marques-Toigo, M. 2005. Progress on the palynostratigraphy of the Permian strata in Rio Grande do Sul State, Paraná Basin, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 77(2): 353–365.

- Stephenson, M.H., Osterloff, P.L. & Filatoff, J. 2003. Palynological biozonation of the Permian of Oman and Saudi Arabia: progress and challenges. *GeoArabia*, 8(3): 467–496.
- Tiwari, R.S. & Tripathi, A. 1992. Marker Assemblage Zones of spores and pollen species through Gondwana Paleozoic and Mesozoic sequence in India. *The Palaeobotanist*, 40: 194–236.
- Vergel, M.M. 1993. Palinoestratigrafía de La secuencia neopaleozoica em la Cuenca Chacoparanense, Argentina. *In: CONGRÉS INTERNATIONAL DE LA STRATIGRAPHIE ET GEOLOGIE DU CARBONIFERE ET PERMIEN*, 12., 1993, Buenos Aires. *Anais...Buenos Aires*, v.1, p. 201–212.
- Vijaya & Tiwari, R.S. 1992. Morpho-evolutionary biohorizon stratigraphy and cladistics in saccate pollen through Gondwana sequence of India. *Palaeobotanist*, 40: 157–193.

3 COMPLEMENTO

ANEXO. Confirmação da submissão do artigo “*Palynostratigraphic analysis of a Permian section from southern Paraná Basin in Brazil, western Gondwana*”, submetido à revista *Journal of South American Earth Sciences*.

• Confirming submission to Journal of South American Earth Sciences Yahoo/Posteing... ★

 • **Journal of South American Earth Sciences** <em@editorialmanager.com> Mi, 20. Mai um 22:45 ★
An: Rafael Reis Bender

This is an automated message.

PALYNOSTRATIGRAPHIC ANALYSIS OF A PERMIAN SECTION FROM SOUTHERN PARANÁ BASIN IN BRAZIL, WESTERN GONDWANA

Dear Mr. Bender,

We have received the above referenced manuscript you submitted to Journal of South American Earth Sciences.

To track the status of your manuscript, please log in as an author at <https://www.editorialmanager.com/sames/> and navigate to the "Submissions Being Processed" folder.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,
Journal of South American Earth Sciences

ANEXO I
Título da Dissertação/Tese:
“PALINOESTRATIGRAFIA DO POÇO CBM-001-ST-RS (JAZIDA CARBONÍFERA DE SANTA TEREZINHA, RIO GRANDE DO SUL), PERMIANO DA BACIA DO PARANÁ”
Área de Concentração: Paleontologia
Autor: Rafael Reis Bender
Orientador: Prof. Dr. Paulo Alves de Souza
Examinadora: Profa. Dra. Ana Karina Scomazzon
Data: 20/08/2020
Conceito: A
PARECER:
<p>O presente parecer é relacionado a dissertação de mestrado do aluno Rafael Reis Bender, intitulado: Palinoestratigrafia do poço CBM-001-ST-RS (jazida carbonífera de Santa Terezinha, Rio Grande do Sul), Permiano da Bacia do Paraná.</p> <p>O trabalho está muito bem escrito e muito bem organizado do começo ao fim. Observa-se que foi escrito com capricho e cuidado. A leitura do texto é muito agradável e fluida, consistente e coerente. As figuras tem boa qualidade, sendo as estampas belíssimas. O referencial bibliográfico é consistente e atualizado.</p> <p>A geologia regional é bem descrita, detalhada na medida certa, abordando os aspectos essenciais para dar subsídio ao tema. A pesquisa contempla um apanhado detalhado da palinologia do Neopaleozoico da Bacia do Paraná, bem como da litoestratigrafia, cronoestratigrafia e geocronologia, tornando-se um registro refinado e atualizado do ponto de vista de contextualização geológica e zoneamento palinológico desta porção da bacia e referência para os próximos estudos.</p> <p>O objetivo proposto de identificar o conteúdo palinológico presente no poço CBM-001-ST-RS e assim descrever a evolução da microflora registrada nas rochas das formações Rio Bonito, Palermo, Irati e Serra Alta; avaliar a aplicabilidade e eficiência do zoneamento de Souza & Marques-Toigo (2005) e comparar o esquema supracita e o conteúdo palinológico em outras regiões do Gondwana, foi plenamente atingido.</p> <p>A biocronoestratigrafia da Bacia do Paraná é controversa pela falta de elementos fósseis diagnósticos, contudo os achados de conodontes (Scomazzon et al., 2013 e Wilner et al., 2016) começam a mudar este panorama. No estado de Santa Catarina, região de Mafra, afloramento Campáleo, relacionado ao Grupo Itararé, Folhelho Lontras, transição Formações Campo Mourão/Taciba (Holz et al., 2010), tem-se a ocorrência do gênero de conodontes Mesogondolella, até agora relacionada a Zona de Mesogondolella bisseli, Permiano (Sakmariano/Artinskiano). Embora o gênero Mesogondolella tenha seu surgimento relacionado ao Moscoviano, esta ocorrência de conodonte no estado de SC, até o momento</p>

assinalada ao Cisuraliano e corroborada por datação Rb/Sr de 287 +- 10Ma, trás a parte superior do Grupo Itararé para o Permiano, em desacordo com o proposto por Rocha-Campos et al. (2019), contudo de acordo com Holz et al. (2010) entre outros autores, bem como de acordo com a Zona Vittatina costabilis para a bacia.

A sessão analisada nesta dissertação, relacionada às formações Rio Bonito, Palermo, Irati e Serra Alta, é sugerida como de idade Asseliano - Wordiano de acordo com dados radiométricos de Rocha-Campos et al. (2019) entre outros, e outras associações palinológicas gondwanicas. Embora sigam as controvérsias relacionadas a bioestratigrafia, litoestratigrafia, cronoestratigrafia entre os depósitos do Paleozoico superior da Bacia do Paraná, para o sul da bacia e outros depósitos gondwanicos correlatos, os dados aqui obtidos e discutidos em relação as ocorrências dos táxons e as zonas de Vittatina costabilis e Lueckisporites virkkiae são úteis embora corroborem o alerta para variações locais, conforme discutido no trabalho, por variações geológicas, ambientais, preservacionais, etc.

Para pensar: No texto integrador (Figura 4) e no artigo (Figura 2) são apresentados distintos posicionamentos cronoestratigráficos da sessão analisada, na Supersequencia Gondwana I.

Sugestões:

Senti falta tanto no texto integrador da dissertação, quanto na figura 9 do artigo, o posicionamento litoestratigráfico estudado neste trabalho, junto ao esquema geocronológico e palinoestratigráfico, para observação das zonas aqui discutidas, também nesse contexto.

Seria muito interessante para visualização e futuras discussões, inclusive em relação a escolha dos tipos de biozonas, adição dos dados quantitativos dos táxons amostrados. Isto poderá auxiliar na observação de possíveis inconsistências nos dados por fatores ambientais, geológicos, etc.

Ainda, como sugestão, embora não faça parte do escopo do trabalho, mas seria complementar em um trabalho futuro, blocos diagramas contemplando cada uma das unidades estudadas, com o contexto paleoambiental e a localização/posição dos táxons e a afinidade botânica.

As correções ortográficas são mínimas.

No texto integrador:

pag. 8 - no segundo parágrafo, corrigir o nome do poço estudado.

pag. 40 - última palavra da linha 5 corrigir fromações.

pag. 45 - décima linha corrigir fromações.

No artigo:

pag. 82 - na quarta linha de baixo para cima tirar um "the": ... while the the base of ...

Os dados obtidos neste trabalho são bem apresentados e discutidos, servindo como base para ampliar o entendimento biocronoestratigráfico, bem como paleobiogeográfico da sessão Neopaleozoica da Bacia do Paraná. Os objetivos propostos foram plenamente atingidos, sendo na minha avaliação, o desenvolvimento desta pesquisa Conceito A.

Assinatura:

Ana Keina Seomazon

Data: 20/08/2020

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I
Título da Dissertação/Tese:
“PALINOESTRATIGRAFIA DO POÇO CBM-001-ST-RS (JAZIDA CARBONÍFERA DE SANTA TEREZINHA, RIO GRANDE DO SUL), PERMIANO DA BACIA DO PARANÁ”
Área de Concentração: Paleontologia
Autor: Rafael Reis Bender
Orientador: Prof. Dr. Paulo Alves de Souza
Examinadora: Profa. Dra. Mercedes di Pasquo
Data: 7 agosto 2020
Conceito: A
PARECER:
<p>Concepto geral do trabalho</p> <p>O presente trabalho apresenta um análisis da literatura sobre datação radiométrica obtidas no Pennsylvaniano / Permiano da Bacia do Paraná associadas a dados palinoestratigraficos. Isto foi realizada em detalhe pelo autor, diferenciando os resultados confiáveis daqueles que não possuem precisão suficiente devido a diferentes problemas na amostragem ou no procedimento ou técnica utilizada.</p> <p>Nesse contexto, o autor fez um analisis palinologico do POÇO CBM-001-ST-RS (JAZIDA CARBONÍFERA DE SANTA TEREZINHA, RIO GRANDE DO SUL), e senhala que é válido lembrar que datações realizadas no Rio Grande do Sul idealmente não deveriam ser estendidas para ocorrências da Formação Rio Bonito em outros estados, uma vez que, como demonstrado por dados bioestratigráficos, a idade destas rochas pode variar em diferentes regiões da Bacia do Paraná. A estratigrafia da unidade é outro fator a ser considerado, já que sua divisão em três membros (Schneider et al., 1974) não é observável fora de Santa Catarina, dificultando correlações.</p> <p>Em sínteses, 1 - o manuscrito está bem escrito e organizado e com ilustrações de boa qualidade, 2 - o desenho do tema na primeira parte é baseado em um analisis bibliográfico abrangente, 3 - os resultados do analisis da associação palinologica do furo foi comparado com diferentes localidades e permite confirmar principais conclusões bioestratigráficas obtidas em estudos previos em relação à distribuição estratigráfica das principais espécies do Permiano da bacia.</p> <p>Portanto, conclui que as zonas palinológicas do C-P da bacia do Paraná são eficientes e permitem que sejam utilizadas em datação relativa de depositos na região.</p>

Não fiz correções no manuscrito e merece minha aprovação.

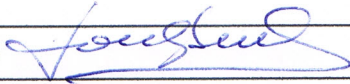
Atenciosamente

Assinatura:

Data: 7 de agosto de 2020

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I	
Título da Dissertação/Tese:	
“PALINOESTRATIGRAFIA DO POÇO CBM-001-ST-RS (JAZIDA CARBONÍFERA DE SANTA TEREZINHA, RIO GRANDE DO SUL), PERMIANO DA BACIA DO PARANÁ”	
Área de Concentração: Paleontologia	
Autor: Rafael Reis Bender	
Orientador: Prof. Dr. Paulo Alves de Souza	
Examinadora: Profa. Dra. Ángeles Beri	
Data: 4/8/20	
Conceito: A	
PARECER:	
<p>É uma tese com bom desenvolvimento do contexto geral, que denota um bom conhecimento do assunto</p> <p>A metodologia utilizada é a que corresponde a este tipo de estudo</p> <p>Embora o tratamento sistemático não seja desenvolvido, o material ilustrado corresponde aos táxons mais importantes nas associações encontradas.</p> <p>Os resultados obtidos contribuem para o conhecimento da bioestratigrafia do Paleozóico superior brasileiro.</p> <p>A discussão cobre os aspectos mais importantes relacionados à comparação com outras propostas bioestratigráficas em diferentes áreas do Gondwana.</p> <p>Embora não inclua novidades relevantes para a palinologia, constitui uma dissertação de mestrado muito bem escrita e apresentada, que mostra uma boa gestão, tanto na área do conhecimento quanto nos aspectos formais da pesquisa científica</p>	
Assinatura: 	Data: 4/8/20
Ciente do Orientador:	
Ciente do Aluno:	