

Tafonomia de invertebrados fósseis do Devoniano no estado do Paraná: contribuições aos estudos sobre potencial de hidrocarbonetos vinculados ao Projeto Folhelho (LAGESED-UFRJ)

Fossil Invertebrate Taphonomy of the Devonian in the state of Paraná: Contributions to the Studies on Hydrocarbon Potential Linked to the Folhelho Project (LAGESED-UFRJ)

Tafonomía de invertebrados fósiles del Devónico del Estado de Paraná: contribuciones a los estudios sobre el potencial hidrocarburiífero vinculado al Proyecto Folhelho (LAGESED-UFRJ)

Gabrieli Goltz

<https://orcid.org/0000-0002-5664-8872>
gabrieligoltz@gmail.com

Universidade Estadual de Ponta Grossa, UEPG, Ponta Grossa, PR, Brasil

Elvio Pinto Bosetti

<https://orcid.org/0000-0003-1120-4933>
elviobosetti@gmail.com

Universidade Estadual de Ponta Grossa, UEPG, Ponta Grossa, PR, Brasil

Lucinei José Myszynski Junior

<https://orcid.org/0000-0003-0238-7053>
lucinei.junior@ifpr.edu.br

Instituto Federal do Paraná, IFP, Campus Jaguariaíva, Jaguariaíva, PR, Brasil

Leonardo Borghi

<https://orcid.org/0000-0002-3296-2840>
borghi66@gmail.com

Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Resumo: Folhelhos constituem uma recente fronteira de estudos na Geologia Sedimentar, estimulada pelo novo panorama exploratório do *Shale Gas*, não obstante constituir-se no selante de muitos sistemas petrolíferos. Contudo, no Brasil a geração de gás natural associada a estudos de ordem paleontológica é inédita e fundamental para determinação das reais potencialidades regionais em um processo de avanço do conhecimento científico e tecnológico. Os estudos tafonômicos da macrofauna fóssil e icnológicos integram-se aos dados de sedimentologia ampliando a capacidade de interpretação paleoambiental das fácies sedimentares. Foram analisadas amostras de três afloramentos distintos na região dos Campos Gerais, no estado do Paraná e identificadas duas tafofácies e três icnofácies: Skolithos, Cruziana arquetípica e distal. As análises paleontológicas aqui propostas dão suporte às correlações bioestratigráficas, interpretações paleoambientais e paleoecológicas dos afloramentos prospectados, auxiliando na avaliação da qualidade dos folhelhos da Formação Ponta Grossa do ponto de vista da geração de hidrocarbonetos.

Palavras-chave: Paleontologia Estratigráfica, *Shale gas*, Bacia do Paraná, Formação Ponta Grossa.

Abstract: Shales constitute a recent frontier of studies in Sedimentary Geology, stimulated by the new exploratory panorama of Shale Gas, despite being the sealant of many petroleum systems. However, in Brazil the generation of natural gas associated with paleontological studies is unprecedented and fundamental for determining the real regional potentialities in a process of advancing scientific and technological knowledge. Taphonomic studies of fossil macrofauna and ichnology are integrated with sedimentological data, expanding the capacity for paleoenvironmental interpretation of the sedimentary facies. Samples from three distinct outcrops in the Campos Gerais region of the state of Paraná were analyzed and two tafofauna and three ichnofauna were identified: Skolithos, archetypical and distal Cruziana. The paleontological analyses proposed here provide support for biostratigraphic correlations, paleoenvironmental and paleoecological interpretations of the outcrops prospected, assisting in the evaluation of the quality of the shales of the Ponta Grossa Formation from the point of view of hydrocarbon generation.

Keywords: Stratigraphic Paleontology, *Shale gas*, Paraná Basin, Ponta Grossa Formation.

Resumen: Las lutitas constituyen una reciente frontera de estudios en Geología Sedimentaria, estimulada por el nuevo panorama exploratorio del Shale Gas, a pesar de ser el sellante de muchos sistemas petrolíferos. Sin embargo, en Brasil la generación de gas natural asociada a los estudios paleontológicos es inédita y fundamental para determinar las potencialidades regionales reales en un proceso de avance del conocimiento científico y tecnológico. Los estudios tafonómicos de la macrofauna fóssil y la icnología se integran con los datos sedimentológicos, aumentando la capacidad de interpretación paleoambiental de las facies sedimentarias. Se analizaron muestras de tres afloramientos diferentes en la región de Campos Gerais en el estado de Paraná. Se identificaron dos tafofacies y tres icnofacies: Skolithos, Cruziana arquetípica y distal. Los análisis paleontológicos aquí propuestos apoyaron las correlaciones bioestratigráficas y las interpretaciones paleoambientales y paleoecológicas de los afloramientos prospectados, ayudando a evaluar la calidad de las lutitas de la Formación Ponta Grossa desde el punto de vista de la generación de hidrocarburos.

Palabras clave: Paleontología estratigráfica, *Shale Gas*, Cuenca del Paraná, Formación Ponta Grossa

INTRODUÇÃO

Folhelhos são uma recente fronteira de estudos na Geologia Sedimentar, estimulada pelo novo panorama exploratório do *Shale Gas* (Rezae, 2015), não obstante constituir-se no selante de muitos sistemas petrolíferos. Dentre todas as rochas em um sistema petrolífero, esta é a mais abundante (c. 60% do registro geológico) e a única que comparece como rocha geradora, selante ou reservatório – *gas shale* (Bennett et al., 1991; Meléndez, 2010). Nos últimos 10 anos tem havido um expressivo aumento no reconhecimento e caracterização sedimentológica e petrofísica dos folhelhos para a avaliação de sua qualidade como rocha selante ou reservatório de gás, tanto na indústria quanto na academia (Lupoi et al., 2017; Zeng et al., 2018; Atwah et al., 2020). Contudo, o Brasil não tem acompanhado essa evolução em termos de conhecimento, quer seja do ponto de vista geral, quer seja sobre as nossas bacias sedimentares, ou de formação de pessoal qualificado (Potter, 2005). Nesse sentido, os estudos tafonômicos da macrofauna fóssil (tafofácies), incluso dados icnológicos já adquiridos na fase de campo (Sedorko, Bosetti & Netto, 2018a; Sedorko, Netto & Savrda, 2018b) aqui propostos, foram integrados aos de sedimentologia, ampliando a capacidade de interpretação paleoambiental das fácies sedimentares. Por outro lado, este estudo foi também integrado à análise geoquímica orgânica, para entender eventos de estresse e anoxia (Evento *Kačák*, Givetiano – Devoniano Médio) relatados na sucessão estratigráfica da região dos Campos Gerais do Paraná (Bosetti et al., 2011, Bosetti, Grahn, Mauller, Brauer & Zabini, 2012).

A geração de gás natural associada a estudos de ordem paleontológica é inédita e fundamental para determinação das reais potencialidades regionais em um processo de avanço do conhecimento científico e tecnológico desse campo de estudos no Brasil. Os folhelhos da Formação Ponta Grossa, São Domingos e Grupo Itararé (com dúvida) são conhecidos por seu potencial de geração de hidrocarbonetos na bacia do Paraná (Brasil), no entanto sua efetividade como rochas selantes (considerando os arenitos da Formação Furnas como reservatório em um sistema especulativo) ou mesmo, como reservatórios (*shale gas*) é ainda pouco conhecida (Carelli, 2010).

Este artigo visa fornecer informações tafonômicas e icnológicas como base de dados para a interpretação paleoambiental da Formação Ponta Grossa e São Domingos (Devoniano), como presumível suporte para a análise desenvolvida pelo Projeto Folhelhos, no estado do Paraná, em uma perspectiva exploratória de hidrocarbonetos. Para mais, integra o suporte técnico da Linha de Pesquisa Paleontologia Estratigráfica e Tafonomia vinculada ao *Projeto Folhelho – caracterização geológica da qualidade de folhelhos marinhos do Devoniano da bacia do Paraná do ponto de vista exploratório*, desenvolvido no LAGESED (Laboratório de Geologia Sedimentar – UFRJ) com coparticipação do Laboratório de Estratigrafia e Paleontologia da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

MATERIAL E MÉTODOS

As amostras analisadas encontram-se depositadas no Laboratório de Estratigrafia e Paleontologia da UEPG e são provenientes das excursões de campo realizadas nos arredores dos municípios de Arapoti, Ventania e Piraí do Sul. As amostras examinadas correspondem a três afloramentos distintos: Ponto 2 - Myszynski (2018) no município de Arapoti (S 24° 10' 51.0" O 49° 47' 20.5"), Romário Martins, no município de Arapoti (S 24° 17' 30.6" O 50° 07' 57.8"), e Rio Guaricanga, em Ventania/Piraí do Sul (S 24° 21' 37.4" O 50° 05' 53.5").

As atividades de pesquisa envolveram inicialmente (1) o levantamento e análise bibliográfica sobre os paleoinvertebrados, elementos paleobotânicos e icnofósseis, bioestratigrafia, litoestratigrafia, tafonomia, fácies sedimentares e, em particular, sobre o Devoniano, da Bacia do Paraná, (2) a delimitação espacial da área de estudo, (3) delimitação do intervalo estratigráfico de estudo com suas litofácies sedimentares e suas biozonas e idades envolvidas na sucessão, (4) identificação e fotografiação do material de estudo no laboratório da UEPG, (5) classificação dos tipos de concentrações tafonômicas ocorrentes. Em seguida, procedeu-se a (6) diagnose, descrição e ilustração das tafofácies; a (7) discussão das tafofácies à luz da literatura para interpretação paleoambiental e a identificação dos eventos de sedimentação envolvidos na gênese dos estratos; e a (8) discussão das icnofácies à luz da literatura para a caracterização dos paleoambientes; por fim, a (9) integração dos resultados faciológicos com contexto estratigráfico delimitado inicialmente, que permitiu abordar o registro fóssil estudado sob a ótica da Estratigrafia de Sequências. A interpretação e discussão das tafofácies foram baseadas nas análises das seguintes assinaturas tafonômicas: grau de empacotamento, grau de articulação, grau de fragmentação e posição em relação ao plano de acamamento.

CONTEXTO GEOLÓGICO

O material estudado refere-se aos afloramentos localizados na Borda Leste da Bacia Sedimentar do Paraná, no estado do Paraná. Milani et al. (2007) identificaram para a bacia seis Supersequências deposicionais, estendendo do Ordoviciano-Eotriássico: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Siluro-Devoniano), Gondwana I (Neocarbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso-Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). As rochas representam parte da Supersequência Paraná e refletem ciclos transgressivos-regressivos relacionados a oscilações do nível do mar (Bergamaschi, 1999; Bergamaschi & Pereira, 2001). A Supersequência Paraná engloba o Grupo Campos Gerais, o qual é representado, da base para o topo, pelas formações Furnas, Ponta Grossa e São Domingos, incluso o Membro Tibagi (Grahm, 1992; Grahm, Mauller, Bergamaschi & Bosetti, 2013, Fig. 1)¹.

¹ Além da concepção adotada para este trabalho, consultar Lange e Petri (1967).

Figura 1: Arcabouço cronoestratigráfico de Grahn et al., 2013, os afloramentos estudados compreendem as formações Ponta Grossa e São Domingos (com dúvida).

Idade	Bacia do Paraná		Sequências	Esporos		Chitinozoa Grahn 2005 Mendowicz - Mauiller <i>et al.</i> , 2009
	Sub-bacia Apucarana	Sub-bacia Alto Garças		A	B	
Frasniano				IV	TP	U.bastosi S.langei
		Grupo Chapada Unidade 4	F	Bmu		Hoeghisphaera glabra
				BM	Bpi	
Givetiano				BJ		
		Formação São Domingos	E	TCo	Trg	Fungochitina microspinata Ancyrochitina taouratinensis
				AD	Lem	Lli
Eifeliano		Grupo Chapada Unidade 2	D	Pre-Lem	Per	Alpenachitina eisenacki
Emsiano		Grupo Chapada Unidade 3	C	AP	Vel	Ancyrochitina varispinosa**
Praguiano		Grupo Chapada Unidade 2	B	Pre-Vel	GS	Ancyrochitina pachycerata
Lochkoviano		Grupo Chapada Unidade 1	A	FD	Não definido	Ancyrochitina pachycerata
	Formação Ponta Grossa			Su		
				Pow		
				Pre-Su	Ems	Ramochitina magnifica
				BZ		
				N		
				M		
					(E)	Urochitina loboi
				MN	NsZ	Angochitina strigosa
						...

Fonte: Grahn et al. (2013).

Os estratos devonianos no estado do Paraná têm sido amplamente analisados há mais de um século, principalmente nos municípios de Ponta Grossa, Tibagi e Jaguariaíva. Entretanto, foi verificado que nos arredores dos municípios de Arapoti, Ventania e Piraí do Sul a quantidade de trabalhos é escassa (Oliveira, 1912; Clarke, 1913; Myszynski, 2018) e seus afloramentos ainda pouco conhecidos nos seus aspectos paleontológicos.

As características geológicas dos arredores dos municípios em estudo constam em Petri (1948), que descreveu em detalhe mais de 100 metros de folhelhos e arenitos devonianos das formações Furnas e Ponta Grossa na região do vale do Lamberdor (Ventania). As suas descrições abrangem desde as camadas de contato das formações, as quais denominou de “Camadas de Transição”, até os arenitos grossos disposto no topo e interpretados como sendo de origem glacial carbonífera. Maack (1946) discorreu que os arenitos que recobrem o topo da Formação Ponta Grossa na seção Lamberdor, são correlatos ao arenito Barreiro (Grupo Itararé, *sensu*: Grahn et al., 2013) e semelhantes àqueles descritos por Maack (1934) em Tibagi. No entanto, Petri e Fúlvaro (1966) interpretaram os mesmos arenitos como

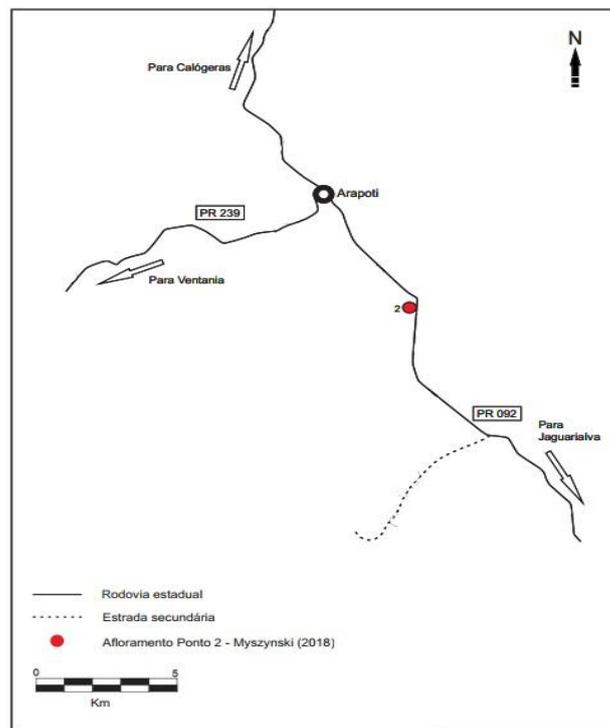
sendo de idade permocarbonífera. O afloramento Rio Guaricanga foi descrito por Petri (1948), porém só foi detalhado por Ciguel (1989), que interpretou as camadas com idade relativa ao Neoemsiano–Eoemifeliano. No entanto Myszynski o interpretou como sendo de idade Neopraguiana–Eoemfiana, portanto, os afloramentos estudados compreendem as formações Ponta Grossa e São Domingos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ponto 2 - Myszynski (2018)

O afloramento Ponto 2 está situado às margens da PR 092 no km 213 entre os municípios de Arapoti e Jaguariaíva (Fig. 2). Este afloramento mede aproximadamente 6,5 metros de espessura vertical, onde os 2 primeiros metros são representados por arenitos finos a médios, quartzosos, mal selecionados, intercalando com camadas maciças e camadas com laminação plano paralela. Estas camadas apresentam estruturas do tipo *wavy* e cruzadas de baixo ângulo, evidenciando momentos de deposição em ambientes de maior energia (Myszynski, 2018). Assine (1996) posicionou estas camadas no Membro Tibagi, entretanto, estas camadas estão poucos metros acima da Formação Furnas e, embora existam falhas tectônicas significativas na região, não há evidências de falhas significativas nesta seção. De fato, Grahn et al. (2010), através de dados palinológicos de subsuperfície, reportaram arenitos semelhantes na passagem da Formação Furnas para a Formação Ponta Grossa.

Figura 2: Localização afloramento Ponto 2 de Myszynski (2018).



Fonte: adaptado de Myszynski (2018).

Durante as análises taxonômicas dos macroinvertebrados foram examinadas 46 amostras, com registro da presença de 24 espécimes e baixa diversidade faunística (Quadro 1). Além disso, muitas amostras continham apenas *Phytodebris* (fragmentos de plantas) que, por vezes, encontram-se associados aos fósseis de macroinvertebrados (Anexo 1). Durante as excursões de campo realizadas por Myszynski (2018), também foi observada a presença marcante dos icnogêneros *Palaeophycus* isp., *Planolites* isp., *Asterossoma* isp., *Skolithos* isp., *Cylindrichnus* isp., *Lingulichnus* isp., *Arenicolites* isp., *Rosselia* isp., *Rhizocoralium* isp. e *Phycosiphon* isp. As análises tafonômicas mostram que os fósseis do Ponto 2 estão predominantemente dispersos pela matriz, desarticulados e paralelos a plano de acamamento, com grau de fragmentação moderado, uma vez que foram encontrados representantes inteiros e fragmentados. Nota-se também uma baixa diversidade faunística.

Quadro 1: Distribuição de espécimes em cada filo do Afloramento Ponto 2.

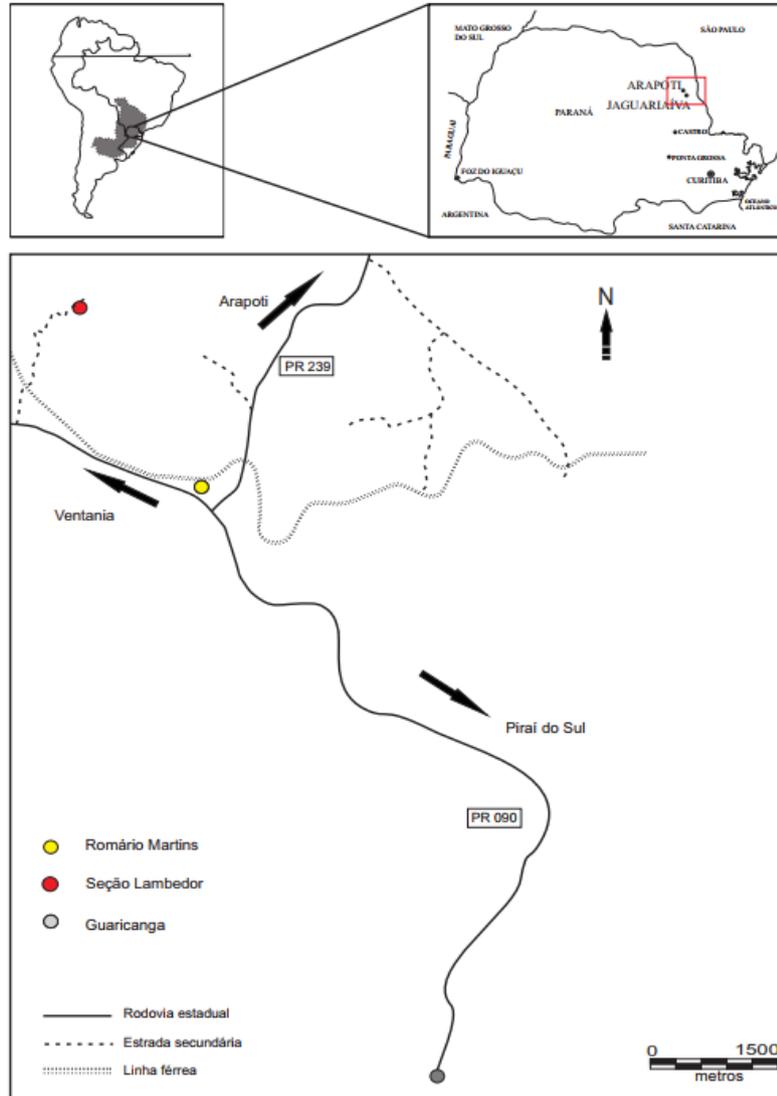
FILO	CLASSE	ORDEM	FAMÍLIA	GÊNERO	N.
Brachiopoda	Lingulata	Lingulida	Discinidae	<i>Orbiculoidea</i>	20
			Lingulidea	-----	1
	Strophomenata	-----	-----	-----	1
Mollusca	Tentaculitoidea	Tentaculitida	Tentaculitidae	<i>Tentaculites</i>	1
Annelida	-----	-----	-----	-----	1

ROMÁRIO MARTINS

O afloramento está localizado no corte da estrada de ferro Ramal Monte Alegre, km 157, nas adjacências da estação ferroviária Romário Martins (Fig. 3). Compreende um depósito de 6 metros de espessura com intercalações que variam de arenitos finos a conglomeráticos, amarelados ou avermelhados, maciços e friáveis, com grãos mal selecionados e subangulosos e clastos facetados e estriados (Myszynski, 2018). Petri (1948) e Melo (1985) entenderam que estes arenitos não apresentam idade Devoniana, e sim depósitos glaciais do Grupo Itararé. No entanto, Petri e Fúlfaro (1966) afirmaram que a presença de seixos de folhelhos e arenitos é resultado do retrabalhamento dos depósitos devonianos por agentes flúvio-glaciais permo-carboníferos. Contudo, sob esta interpretação, a preservação de espécimes inteiros em depósitos retrabalhados não seria possível (Myszynski, 2018).

Um total de 24 amostras foram analisadas. Nestes arenitos foram reconhecidos espécimes de braquiópodes e fragmentos vegetais (Anexo 2), muitos dos quais não foram passíveis de identificação taxonômica (Quadro 2), e sem que tenha sido possível afirmar com certeza a idade destas camadas.

Figura 3: Localização dos afloramentos Romário Martins e Guaricanga.



Fonte: Adaptado de Myszynski (2018).

Quadro 2: Distribuição de espécimes em cada filo do afloramento Romário Martins.

FILO	CLASSE	ORDEM	FAMÍLIA	GÊNERO	N.
Brachiopoda	Lingulata	Lingulida	Discinidae	<i>Orbiculoidea</i>	2
			Lingulidea	-----	2
Lycopodophyta	-----	-----	-----	<i>Haplostigma</i> (?)	3
Thallophyta	-----	-----	-----	<i>Spongiophyton</i> (?)	1

RIO GUARICANGA

O afloramento Rio Guaricanga está localizado às margens da PR 090 no sentido Ventania - Piraí do Sul (Fig. 3). Este afloramento possui aproximadamente 10 de espessura,

onde nos primeiros 5,4 metros são compostos por argilitos e siltitos finos, maciços, intercalados por uma fina camada de folhelho. Ademais, em toda sua extensão vertical apresenta laminações de arenito fino do tipo *wavy*, as quais representam pulsos de maior energia. Além disso, o afloramento possui tendência granodrecrescente ascendente (Myszynski, 2018). Esta tendência é marcada pelos depósitos superiores, compostos por aproximadamente 5,6 metros de folhelhos finamente laminados e muito fossilíferos. Os estratos do afloramento Rio Guaricanga tinham sido interpretados por Ciguel (1989) como Neoemiliano-Eoenfeliano. Entretanto, foi evidenciado através de dados palinológicos realizados (Myszynski, 2018) que os estratos possuem idade relativa ao Neopragiano-Eoemiliano.

As análises das amostras apresentaram em 79 amostras examinadas, 101 espécimes representantes dos filos Brachiopoda, Mollusca e Artrophoda (Quadro 3, Anexo 3). Ademais, observou-se a presença dos icnofósseis *Chondrites* isp., *Planolites* isp. e *Zoophycos* isp.

De acordo com os dados tafonômicos obtidos, é possível observar que os fósseis em sua maioria se encontram em aparente posição de vida, em excelente estado de preservação, sem fragmentação e articulados. Além disso, nota-se que os primeiros 2 metros da seção são marcados pela grande diversidade faunística, sendo composta por braquiópodes, moluscos, artrópodes e lingulídeos. Como já evidenciado por Myszynski e Bosetti (2016), a excelente preservação e a presença de organismos em posição de vida sugerem que as associações são autóctones, ou seja, que não sofreram transporte durante o processo de fossilização, sendo originadas a partir da ação de ondas de tempestade abaixo do nível de ondas normais. A presença de trilobitas homalonotídeos em posição de estresse (enrolados), também reforça uma repentina modificação no ambiente. Esta característica reflete o comportamento de proteção por parte do animal, que acabou sendo soterrado *in situ*, caracterizando um evento de sedimentação episódico. Salienta-se ainda que em todo o depósito de siltitos é registrada a presença marcante do icnogênero *Planolites* isp. Também é recorrente a entrada de lentes de areia e laminação *wavy* associadas às camadas bioturbadas, apontando condições de energia mais altas, fazendo com que sedimentos mais grossos sejam depositados (Myszynski & Bosetti, 2016; Myszynski, 2018; Tavares et al., 2017).

Quadro 3: Distribuição de espécimes em cada filo do afloramento Rio Guaricanga.

FILO	CLASSE	ORDEM	FAMÍLIA	GÊNERO	N.
Brachiopoda	Rhynchonellata	Rhynchoniliida	Leptocoeliidae	<i>Australocoelia</i>	42
		Terebratulida	Meganterididae	<i>Derbyina</i>	2
		Spiriferidina	Delthyrididae	<i>Australospirifer</i>	24
		----	----	----	4
	Lingulata	Lingulida	Discinidae	<i>Orbiculoidea</i>	3
			Linguloidea	---	5
Mollusca	Tentaculitoidea	Tentaculitida	Tentaculitidae	<i>Tentaculites</i>	16
Artrophoda	----	----	----	<i>Calmonia</i>	3
Sub Filo	----	----	----	<i>Homalonotus</i>	1
Trilobitomorpha					

FÁCIES

Gressly (1838) definiu fácies como as propriedades físicas, químicas e biológicas das rochas que, coletivamente, permitem uma descrição objetiva, como também a distinção de diferentes tipos (Cross & Homewood, 1997). Deste modo, fácies representam um corpo rochoso que apresenta um determinado conjunto de características que o distingue de outras unidades rochosas adjacentes, e que foi depositado sob um determinado processo sedimentar (Holz, 2012). Para este trabalho, optou-se por utilizar como referência o trabalho de Miall (1996), o qual apresenta 20 fácies mais comuns de serem reconhecidas em diferentes ambientes. Com base nas análises foi possível reconhecer com precisão duas fácies distintas (Quadro 4), que auxiliaram no reconhecimento dos sistemas deposicionais a partir de suas propriedades litológicas.

Quadro 4: Fácies sedimentares reconhecidas com base no trabalho de Miall (1996).

	Textura	Estruturas Sedimentares	Cor	Geometria	Processos Sedimentares
<i>Swr</i>	Arenitos médio a finos	<i>Wave ripples</i>	Amarelado localmente esbranquiçado	Lenticular	Fluxos oscilatórios entre os níveis de base de ondas de tempestade e o nível de base de ondas de tempo bom
<i>Mr</i>	Argilitos localmente intercalado por lâminas de areia fina	Laminação plano paralela	Cinza claro a escuro	Tabular	Decantação interrompida episodicamente abaixo do nível de base de ondas de tempestade, no contexto de plataforma externa

A litofácies *Swr* é representada por arenitos finos e médios, amarelados e localmente esbranquiçados, com estruturas sedimentares do tipo *wave ripples*. Estas estruturas sedimentares são formadas no *shoreface* e caracteriza fácies denominadas pelas ações de ondas de tempestade (Dott & Bourgeois, 1982). Os fósseis coletados nestas camadas apresentam-se desarticulados e paralelos ao plano de acamamento, a biodiversidade e abundância relativa são baixas. A baixa biodiversidade e abundância faunística pode ser explicada pelo retrabalhamento do substrato causado pelas ações de ondas, onde provavelmente os restos esqueléticos previamente soterrados foram expostos novamente na zona tafonomicamente ativa (Myszynski, 2018).

Sendo a fácies que representa ambientes mais profundos, *Mr* é caracterizada por depósitos de argilitos localmente intercalados por lentes de areia fina, alternado camadas maciças com camadas de laminadas de coloração cinza claro à escuro de geometria tabular. Compreende-se que estes depósitos tenham sido originados a partir da decantação de partículas em suspensão e de fluxos de materiais mais grossos transportados por eventos episódicos de tempestades, promovido em ambientes mais proximais. Nas camadas onde as fácies *Mr* estão presentes, os fósseis encontram-se predominantemente articulados, em aparente posição de vida e, por vezes, paralelos ao plano de acamamento. Sendo assim, é

possível inferir que as concentrações fossilíferas e os depósitos sedimentares tenham sido originados em ambientes de baixa energia, no *offshore* (Myszynski, 2018).

TAFOFÁCIES

Segundo Speyer e Brett (1986), tafofácies são um conjunto de indivíduos ou associações dentro de um contexto deposicional, sendo identificadas através da análise integrada de dados tafonômicos e de informações estratigráficas (Fig. 4). Sendo assim, os autores definem uma tafofácies como uma associação fossilífera com assinaturas tafonômicas distintas em um determinado nível sedimentar que evidencia a história deposicional dos bioclastos em estudo.

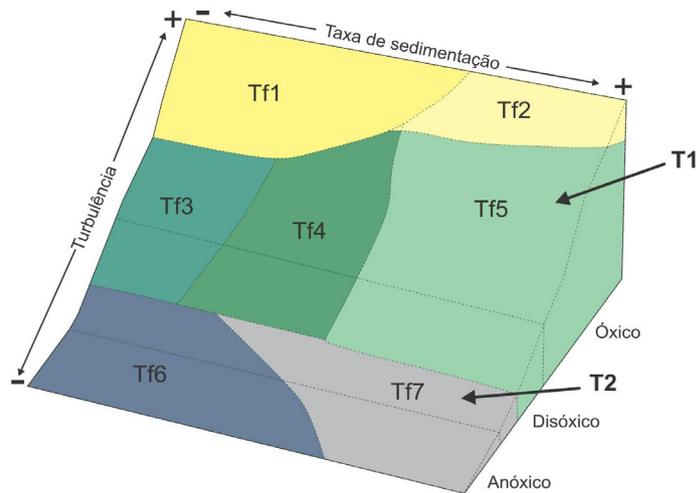
Para a definição das tafofácies neste trabalho foram levados em consideração os atributos tafonômicos de Speyer e Brett (1988) para a identificação de tafofácies de ambientes marinhos empíricos, como a posição em relação ao plano de acamamento, grau de articulação/desarticulação e fragmentação, litologia do depósito, energia relativa do meio e estruturas sedimentares. De acordo com as análises destas informações foi possível definir duas tafofácies distintas, as quais refletem o paleoambiente no momento da deposição bem como os eventos que originaram as concentrações fossilíferas.

TAFOFÁCIES 1 - (TF1)

Esta tafofácies ocorre em fácies areníticas com estruturas sedimentares do tipo *wave ripples*, caracterizando ambientes com alta energia no afloramento Ponto 2. Caracterizam a Tf1 baixas taxas de articulação, moderado grau de fragmentação, alto grau de bioturbação e baixa diversidade faunística, tendo sido registrado apenas espécimes do gênero *Orbiculoidea* sp., lingúlídeos infaunais, moluscos do gênero *Tentaculites* sp. e um espécime de braquiópode da classe Strophomenata, o qual não foi possível de uma identificação mais acurada devido ao estado de preservação.

Sendo assim, considera-se que estes depósitos tenham sido originados no nível de base de ondas de tempo bom e o nível de base de ondas de tempestade, em ambientes de *shoreface*, onde as ondas estão frequentemente retrabalhando o substrato. Esta associação de fósseis pode ser considerada parautoctone, uma vez que apresenta evidências de transporte e de permanência moderada na interface água/sedimento. Segundo Myszynski (2018) a tafofácies aqui denominada de Tf1 é correlata a tafofácies 2 de Speyer e Brett (1988). No entanto, nesta análise considerou-se que essa tafofácies corresponde à tafofácies 5 de Speyer e Brett (1988), representando ambientes com alta energia, onde o acréscimo na taxa de sedimentação permitiu que alguns organismos fossem fossilizados mesmo sofrendo com o retrabalhamento de fundo e das partículas em suspensão.

Figura 4: Distribuição das tafofácies a partir do modelo de Speyer e Brett (1988). T1 - tafofácies 1, representa ambientes com alta turbulência e alta taxa de sedimentação; T2 - tafofácies 2, originadas em ambientes de shoreface inferior, influenciado pela ação de ondas; T3 - tafofácies 3, representa depósitos originados no offshore superior, com baixa turbulência e alta taxa de sedimentação. Tf de 1 a 7 representam as tafofácies originais de Speyer e Brett (1988).



Fonte: adaptado de Speyer & Brett (1988).

TAFOFÁCIES 2 - (TF2)

Esta tafofácies ocorre em siltitos e argilitos, com laminações plano paralelas indicando ambientes de menor energia, no *offshore*. São características de Tf2 um alto grau de articulação, fósseis em aparente posição de vida e paralelos ao plano, baixo grau de fragmentação e moderado grau de bioturbação. Segundo Brett e Baird (1986), a desarticulação de esqueletos bivalves ocorre normalmente de maneira muito rápida, assim depósitos de conchas bivalves articuladas podem marcar depósitos de sufocamento rápido. Para Speyer e Brett (1988) e Kidwell e Bonsence (1991) a presença de conchas articuladas indica deposições rápidas sem resposta de escape dos organismos. Esta tafofácies é correlata a tafofácies 7 de Speyer e Brett (1988), e refere-se ao afloramento Rio Guaricanga e arenitos da base.

ICNOFÁCIES

Dados icnológicos e tafonômicos vem sendo amplamente utilizados para apoiar inferências sedimentológicas, estratigráficas e paleoambientais (Brett & Baird 1986; Speyer & Brett 1988; Sedorko, Bosetti e Netto, 2018a). Análises icnológicas desempenham um papel importante aplicado à Geologia Sedimentar para interpretações paleoambientais, devido ao seu caráter autóctone e associados a análises de fácies, possibilitam a evidência dos parâmetros ambientais do meio expressos nos padrões comportamentais dos vestígios fósseis (Gerard & Bromley, 2008).

Segundo Myszynski (2018) no afloramento Ponto 2 foi observada a presença de dez icnogêneros: *Arenicolites* isp., *Asterossoma* isp., *Cylindrichnus* isp., *Lingulichnus* isp., *Palaeophycus* isp., *Planolites* isp., *Phycosiphon* isp., *Skolithos* isp., *Rosselia* isp. e *Rhizocoralium* isp. As icnoassociações possibilitaram a atribuição de expressões das icnofácies *Skolithos*. A icnofácies *Skolithos* ocorre em leitos de arenitos finos com estruturas sedimentares do tipo *wave ripples* e *hummocky cross stratification*, sendo uma icnofauna oportunista que atesta acréscimos na taxa de energia hidrodinâmica (Sedorko, 2015; Sedorko, Bosetti & Netto, 2018a). Além do icnogênero *Skolithos* isp. outros icnogêneros estão presentes, no entanto, como se trata de uma abordagem com dados adquiridos a partir da bibliografia não é possível inferir com certeza quais são os icnogêneros dominantes. Porém, levando em consideração a análise das litofácies e tafofácies aqui propostas, associa-se a icnofácies *Skolithos* com a litofácies *Swr* e a tafofácies Tf1. Tipificando ambientes com energia elevada e bem oxigenados, gerados pela ação de ondas de tempestade no *shoreface* (Quadro 5).

No afloramento Rio Guaricanga foram registrados três icnogêneros: *Chondrites* isp., *Planolites* isp., *Zoophycos* isp. e de acordo com Myszynski (2018) e Myszynski e Bosetti (2016) foi notada a presença marcante de bioturbações do icnogênero *Planolites* isp. A icnoassociação sugere expressões da icnofácies *Cruziana* arquetípica e distal. A icnofácies *Cruziana* arquetípica indica ambientes de stress causados por flutuações de salinidade indicando ambientes de *offshore* transicional, com fluxos de turbidez indicando ambientes gerados entre o nível de base de ondas de tempo bom e o nível de base de ondas de tempestade (Sedorko, Netto & Svrada, 2018b). A icnofácies *Cruziana* distal é dominada por icnogêneros de alimentação especializada (e.g. *Planolites*, *Zoophycos* e *Chondrites*) indicando ambientes com energia mais baixa no *offshore* (Sedorko, Netto & Svrada, 2018b). Deste modo, associa-se às icnofácies *Cruziana* arquetípica e distal a litofácies *Mr* e a tafofácies Tf2, caracterizando ambientes mais distais e de menor energia, correspondendo ao intervalo entre o *offshore* transacional e o *offshore* (Quadro 5).

Quadro 5: Integração dos dados litológicos, tafonômicos e icnológicos.

FÁCIES	LITOLOGIA	TAFOFÁCIES	ICNOFÁCIES	AMBIENTE
Swr	Arenitos médios a finos com estruturas sedimentares <i>wave ripples</i> , amarelados e localmente esbranquiçados de geometria lenticular	Tf1	<i>Skolithos</i>	Fluxos oscilatórios entre os níveis de base de ondas de tempestade e o nível de base de ondas normais.
Mr	Argilitos localmente intercalado por lâminas de areia fina, de laminação plano paralela, cinza claro a escuro, de geometria tabular	Tf2	<i>Cruziana</i> arquetípica e distal	Decantação interrompida episodicamente abaixo do nível de base de ondas de tempestade, no contexto de plataforma externa.

CONCLUSÕES

Dois dos três afloramentos neste trabalho apresentam depósitos expressivos da Formação Ponta Grossa (*sensu* Grahn et al., 2013), exceto pelo afloramento Romário Martins, que mesmo apresentando elementos tipicamente fósseis que podem ser devonianos, ainda carece de estudos mais aprofundados.

Foram identificadas duas litofácies, duas tafofácies e três icnofácies. A integração de dados evidencia processos sedimentares que vão do *shoreface* inferior ao *offshore*. A tafofácies Tf1 ocorre associada à fácies *Swr* e a icnofácies *Skolithos*, caracterizando processos mais energéticos e ambientes mais proximais de *shoreface*, este conjunto de características corresponde ao afloramento Ponto 2. Já a tafofácies Tf2, está associada à fácies *Mr* e icnofácies *Cruziana* arquetípica e distal, indicando ambientes mais distais e de menor energia, correspondendo ao intervalo *offshore* transicional e *offshore* e corresponde ao afloramento Rio Guaricanga.

Os estudos tafonômicos da macrofauna fóssil e icnológicos integram-se com os dados de sedimentologia ampliando a capacidade de interpretação paleoambiental das fácies sedimentares, tal estudo será integrado com a análise geoquímica orgânica, no entendimento de eventos de estresse e anoxia (Evento *Kačák* – Givetiano). Os estudos icnológicos são especialmente importantes em folhelhos, para a interpretação das propriedades petrofísicas, uma vez que, as icnotramas alteram estruturas sedimentares primárias e a petrotrama da rocha. As análises paleontológicas aqui propostas podem suportar correlações bioestratigráficas, interpretações paleoambientais e paleocológicas dos afloramentos prospectados, auxiliando na avaliação da qualidade dos folhelhos da Formação Ponta Grossa.

REFERÊNCIAS

- Assine, M.L. (1996). *Aspectos da estratigrafia das seqüências pré-carboníferas da Bacia do Paraná no Brasil*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, SP, Brasil. Recuperado de <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44136/tde-10112015-154800/pt-br.php>
- Atwah, I., Puckette, J., Becker, M., & Moldowan, J.M. (2020). Source-rock reservoirs geochemistry of Devonian–Mississippian mudrocks in central Oklahoma. *AAPG Bulletin*, 104(3), 657–680.
- Bennett, R.H., Bryant, W.R., Hulbert, M.H., Chiou, W.A, Faas, R.W., ... & Yamamoto, T. (1991). *Microstructure of Fine-Grained Sediments: from Mud to Shale (Frontiers in Sedimentary Geology)*. New York: Springer Verlag.
- Bosetti E.P., Grahn Y., Horodyski R.S., Mauller P.M., Breuer P., & Zabini C. (2011). An earliest Givetian “Lilliput Effect” in the Paraná Basin, and the collapse of the Malvinokaffric shelly fauna. *Paläontologische Zeitschrift*, 85(1), 49-65.
- Bosetti E.P., Grahn C.Y., Horodyski R.S., & Mendlowicz-Mauller P. (2012). The first recorded decline of the Malvinokaffric Devonian fauna in the Paraná Basin (southern Brazil) and its cause: taphonomic and fossil evidence. *Journal of South American Earth Sciences*, 37, 228-241. doi:10.1016/j.jsames.2012.02.006.
- Bergamaschi, S. (1999). *Análise estratigráfica do Siluro-Devoniano (Formações Furnas e Ponta Grossa) da sub-bacia Apucarana, Bacia do Paraná, Brasil*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, SP, Brasil. Recuperado de <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44136/tde-18112015-101431/pt-br.php>

- Bergamaschi, S., & Pereira, E. (2001). Caracterização de sequências deposicionais de 3º ordem para o Siluro-Devoniano na sub-bacia de Apucarana, Bacia do Paraná, Brasil. *Ciência-Técnica-Petróleo, seção: Exploração de Petróleo*, 20, 63-73.
- Brett, C.E., & Baird, G.C. (1986). Comparative taphonomy a key for paleoenvironmental reconstruction. *Palaios*, 1, 207-227.
- Ciguel, J.H.G. (1989). *Bioestratigrafia dos Tentaculitoidea no Flanco Oriental da Bacia do Paraná e sua Ocorrência na América do Sul (Ordoviciano-Devoniano)*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, SP, Brasil. Recuperado de https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44136/tde-25082015-104854/publico/Ciguel_Mestrado_vol_1.pdf
- Clarke, J.M. (1913). Fósseis Devonianos do Paraná. *Monografia do Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil*, 1-353.
- Cross, T.A., & Homewood, P.W. (1997). Amalgamating Gressly's Role in Founding Modern Stratigraphy. *Geological Society of America Bulletin*, 109, 1617-1630.
- Carelli, T.G. (2010). *Caracterização de microfácies sedimentares em folhelhos da formação ponta grossa (devoniano), na borda leste da Bacia do Paraná*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, RJ, Brasil. Recuperado de https://minerva.ufrj.br/F/?func=direct&doc_number=000877022&local_base=UFR01#.Y2lNb3bMK3A
- Dott, R.H., & Bourgeois, J. (1982). Hummocky stratification: Significance of its variable bedding sequences. *Geological Society of America Bulletin*, 93, 663-680.
- Gerard, J.R., & Bromley, R.G. (2008). *Ichnofabrics in clastic sediments: applications to sedimentological core studies: a practical guide* (p. 100). Madrid: Jean RF Gerard.
- Grahn, Y. (1992). Revision of Silurian and Devonian strata of Brazil. *Palynology*, 16, 35-61.
- Grahn, Y., Breuer, P., Bosetti, E.P., Bergamaschi, S., & Pereira, E. (2010). The Furnas/Ponta Grossa contact and the age of the lowermost Ponta Grossa Formation in the Apucarana Sub-Basin (Paraná Basin, Brazil): integrated palynological age determination. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 13(2), 89-102.
- Grahn, Y., Mauller, P.M., Bergamaschi, S., & Bosetti, E.P. (2013). Palynology and sequence stratigraphy of three Devonian rock units in the Apucarana Sub-basin (Paraná Basin, south Brazil): additional data and correlation. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 198, 27-44.
- Gressly, A. (1838). Observations géologiques sur le Jura soleurois. *Nouveaux mémoires de la Société Helvétique des Sciences Naturelles*, 2, 349.
- Holz, M. (2012). *Estratigrafia de sequências: histórico, princípios e aplicações*. Rio de Janeiro: Interciência.
- Kidwell, S.M., & Bonsence, D.J. (1991). Taphonomy and Time-Averaging of Marine Shelly Faunas. In P.A. Allison, & D.E. Briggs (Orgs.). *Taphonomy: releasing the data in the fossil record* (pp. 115-209). New York: Plenum Press.
- Lange, F.W., & Petri, S. (1967). The Devonian of the Paraná Basin. *Boletim Paranaense de Geociências*, (21/22), 5-55.
- Lupoi, J., Fritz, L.P., Parris, T.M., Hackley, P.C., Solotky, L., Cortland F., & Schlaegle, S. (2017). Assessment of Thermal Maturity Trends in Devonian-Mississippian Source Rocks Using Raman Spectroscopy: Limitations of Peak-Fitting Method. *Frontiers in Energy Research*, 5(24), 2-20.
- Maack, R. (1934). Die Gondwanaschichten in Südbrasilien und ihre Beziehungen zur Kaokoformation Südwest-Afrikas. *Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin*, 3/4, 194-222.
- Maack, R. (1946). Notas preliminares sobre uma nova estratigrafia do Devoniano do Estado do Paraná. *Anais do Congresso Panamericano de Engenharia de Minas e Geologia*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2.
- Melo, J.H.G. (1985). *A Província Malvinocáfrica no Devoniano do Brasil – estado atual dos conhecimentos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Miall, A.D. (1996). The Geology of Fluvial Deposits. Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology. *Geological Magazine*, 134(3), 409-421.

- 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.
- Meléndez, V.M.A. (2010). *Avaliação Experimental dos Parâmetros de Transporte em Folhelhos*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Recuperado de <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=16782@1>
- Myszynski, Jr. L.J. (2018). *Caracterização paleoambiental e correlação estratigráfica de afloramentos devonianos da região nordeste do estado do Paraná, Brasil*. Tese de Doutorado em Geografia. Universidade Estadual de Ponta Grossa, UEPG, Ponta Grossa, PR. Recuperado de <https://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/2703>
- Myszynski, Jr., L.J., & Bosetti, E.P. (2016). Descrição preliminar do afloramento Rio Guaricanga, Bacia do Paraná, Piraí do Sul, Paraná, Brasil. *Anais da PALEO PR/SC*. União da Vitória, PR, Brasil, 18. pp. 20-20. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/312053830_DESCRICAO_PRELIMINAR_DO_AFLORAMENTO_RIO_GUARICANGA_BACIA_DO_PARANA_PIRAI_DO_SUL_PARANA_BRASIL?channel=doi&linkId=586cf3f608ae8fce491b3635&showFulltext=true
- Oliveira, E.P. (1912). O terreno Devoniano do sul do Brasil. *Annaes da Escola Minas de Ouro Preto*, 14, 31-41.
- Petri, S. (1948). Contribuição ao estudo do Devoniano paranaense. *Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia*, 129(30), 8-125.
- Petri, S., & Fúlfaro, V.J. (1966). Contribuição à geologia das regiões de Jaguariaíva e Lamedor, Paraná. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 15(1), 33-48.
- Potter, P.E., Maynard, J.B., & Depetris, P.J. (2005). *Mud and Mudstones*. Berlin: Springer Verlag.
- Rezae, R. (2015). *Fundamentals of gas shale reservoirs*. New Jersey: Publication John Wiley & Sons.
- Sedorko, D. (2015). *Ichnologia e Tafonomia dos depósitos Emsianos da Formação Ponta Grossa aflorantes na região de Tibagi e seu significado paleoambiental*. Dissertação de Mestrado em Gestão do Território. Universidade Estadual de Ponta Grossa, UEPG Ponta Grossa, PR, Brasil. Recuperado de <https://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/566>
- Sedorko D., Bosetti E.P., & Netto, R.G. (2018a). An Integrative Ichnologic and Taphonomic Approach in a Transgressive-regressive Cycle: a case study from Devonian of Paraná Basin. *Lethaia*, 51(1), 15-34. <https://doi.org/10.1111/let.12219>.
- Sedorko, D., Netto, R.G., & Savrda, C.E. (2018b). Ichnology applied to sequence stratigraphic analysis of Siluro-Devonian mud-dominated shelf deposits, Paraná Basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 83, 81-95. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.02.008>
- Speyer, S.E., & Brett, C.E. (1986). Trilobite taphonomy and Middle Devonian taphofacies. *Palaios*, 1, 312-32.
- Speyer, S.E., & Brett, C.E. (1988). Taphofacies models for epeiric sea environments: Middle Paleozoic examples. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 63, 222-262.
- Tavares, I.S., Myszynski, L.J.J., Comniskey, J.C., Almeida, B., & Bosetti, E.P. (2017). Taxonomia e Tafonomia dos fósseis do afloramento Rio Guaricanga, Piraí do Sul, Pr, Brasil. *Anais do Encontro Anual de Iniciação Científica*. Ponta Grossa, PR, Brasil, 26. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/321682824_TAXONOMIA_E_TAFONOMIA_DOS_FOSSEIS_DO_AFLORAMENTO_RIO_GUARICANGA_PIRAI_DO_SUL_PR_BRASIL
- Zeng, B., Duan, H., Baia, Y., & Meng, W. (2018). Forecasting the output of shale gas in China using an unbiased grey model and weakening buffer operator. *Energy*, 151(15), 238-249.

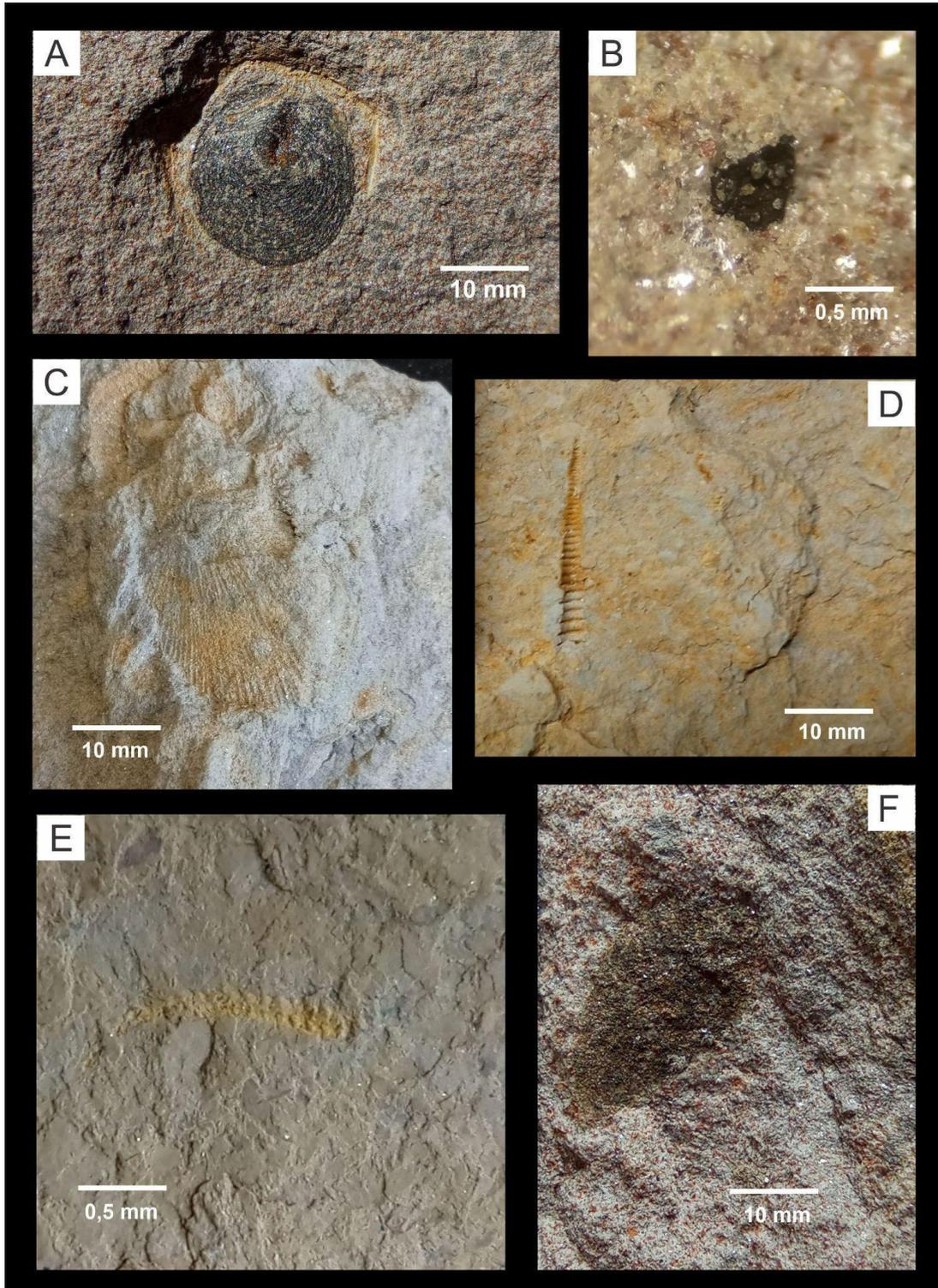
Recebido em 10/nov./2022

Aceito em 10/jan./2023

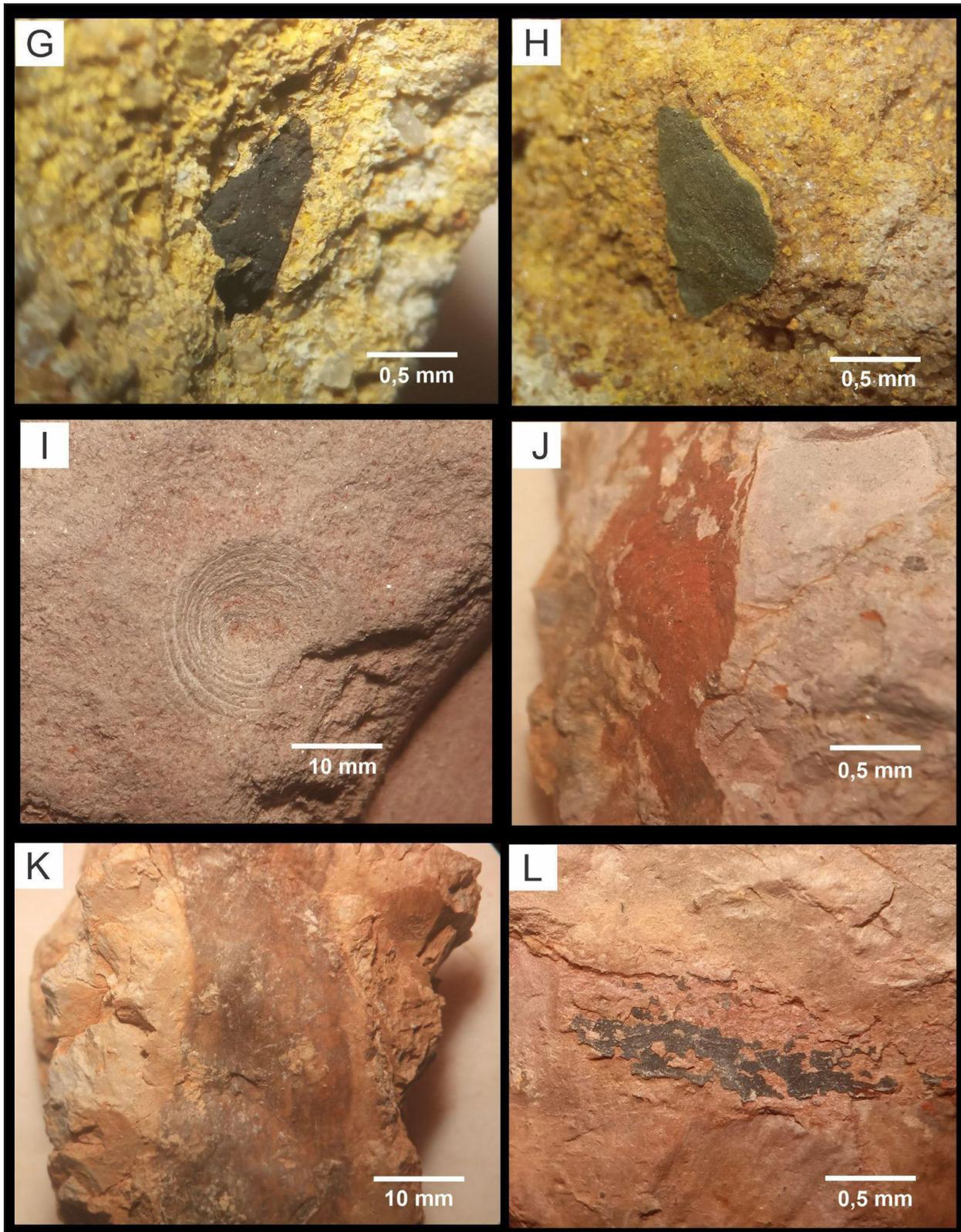
Publicado em 15/jan./2023

ANEXOS

Anexo 1: Principais fósseis identificados nas amostras do afloramento Ponto 2 de Myszynski (2018). A - MPI 11677 *Orbiculoidea* sp; B - MPI 12036 Fragmento vegetal; C - MPI 15927 *Strophomenata*; D - MPI 15726 *Tentaculites* sp.; E - MPI 15725 Anelídeo; F - MPI 15791 Lingulídeo.



Anexo 2: Principais fósseis identificados nas amostras do afloramento Romário Martins. G - MPI 11179 *Spongiophyton?*; H - MPI 11181 Fragmento vegetal; I MPI 15794 *Orbiculoidea* sp.; J - MPI 15791 Lingulídeo infaunal; K - MPI 15792 Fragmento vegetal; L - 15793 *Haplostigma?*



Anexo 3: Principais fósseis identificados nas amostras do afloramento Rio Guaricanga. M - MPI 11164 Lingulídeo infaunal; N - MPI 10914 *Tentaculites* sp.; O - MPI 10884 *Australocoelia* sp.; P - MPI 10890; *Australocoelia* sp.; Q - MPI 10092 *Calmonia* sp.; R - MPI 11146 *Derbyina* sp.; S - MPI 11148 *Calmonia* sp.

