



PALEODEST Paleontologia em Destaque

ISSN 1807-2550 – Sociedade Brasileira de Paleontologia

A CONSOLIDAÇÃO DA ICNOLOGIA ENQUANTO CIÊNCIA: HISTÓRIA, CONCEITOS E MÉTODOS

DANIEL SEDORKO^{1,2*} 
RENATA GUIMARÃES NETTO² 

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Museu Nacional, Departamento de Geologia e Paleontologia, Rua General Herculano Gomes, 1340, Rio de Janeiro, RJ, Brazil,

²ICHNOS Research Group, Unisinos University, Av. Unisinos 950, São Leopoldo, RS, Brazil.

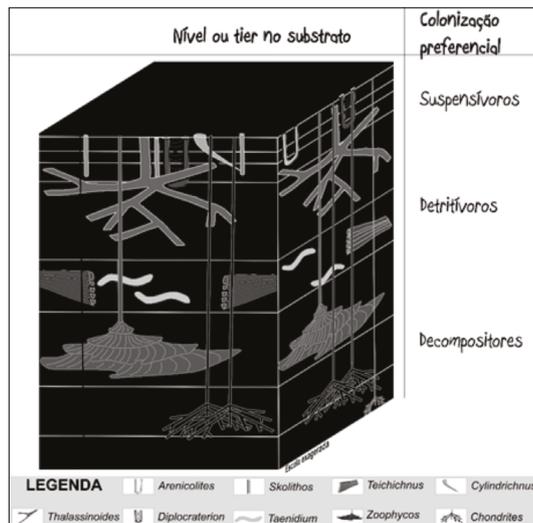
sedorko@mn.ufrj.br, nettorg@unisinos.br

*Autor Correspondente: *sedorko@mn.ufrj.br*

v. 38, n. 79, p. 5-15, 2023. doi:10.4072/paleodest.2023.38.79.01

Recebido em: 30 de julho de 2023

Aceito em: 01 de abril de 2024



Sedorko & Guimarães Netto, 2023. *Paleontologia em Destaque*, v. 38, n. 79, p. 11, Figura 1.

A CONSOLIDAÇÃO DA ICNOLOGIA ENQUANTO CIÊNCIA: HISTÓRIA, CONCEITOS E MÉTODOS

DANIEL SEDORKO^{1,2*} 

RENATA GUIMARÃES NETTO² 

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, Museu Nacional, Departamento de Geologia e Paleontologia, Rua General Herculano Gomes, 1340, Rio de Janeiro, RJ, Brazil,

²ICHNOS Research Group, Unisinos University, Av. Unisinos 950, São Leopoldo, RS, Brazil.

sedorko@mn.ufrj.br, nettorg@unisinos.br

*Autor Correspondente: *sedorko@mn.ufrj.br*

RESUMO

Icnologia, uma ciência de interface entre a Geologia e a Biologia, passou por diversas fases desde os primeiros estudos das estruturas biogênicas até seu estabelecimento enquanto ciência. A sua abordagem neste texto apresenta algumas reflexões de demarcação do que é científico em Geociências, bem como onde a Icnologia está na forma de conhecermos o Universo. Para tanto, se inicia com as ideias sobre as estruturas biogênicas e a interpretação de que seriam estruturas de origem algálica, demarcando a “Idade dos Fucoídes”, concepção que posicionou a Icnologia na Paleontologia. Com o desenvolvimento do conhecimento, estas interpretações foram reavaliadas e passou-se a reconhecer os icnofósseis como produto da atividade de organismos em vida. Portanto, o presente artigo de revisão almeja analisar as características da transformação conceitual da Icnologia, bem como o seu estabelecimento nos atuais paradigmas desta ciência, hoje independente. Este texto também propõe divulgar a ciência icnológica, seus principais conceitos e métodos de estudo. A abordagem dos conceitos aqui apresentados tem como intuito fornecer os instrumentos para uma análise icnológica, sobretudo para estudantes que estão ingressando neste campo do conhecimento.

Palavras-chave: Icnologia, epistemologia, demarcação da ciência, icnofábrica.

ABSTRACT

The consolidation of Ichnology as a science: history, concepts, and methods. Ichnology, a science bridging Geology and Biology, has undergone different phases since the initial studies on biogenic structures until its scientific consolidation. The approach to Ichnology as a science in this text raises questions about how to demarcate what is considered scientific, while also illustrating how Ichnology is characterized in this field. Thus, it begins with the initial ideas about biogenic structures and the interpretation that these structures had an algal origin, marking the “Age of Fucoids,” which positioned Ichnology as a branch of Paleontology. With the evolution of knowledge, these interpretations were re-evaluated, and trace fossils were recognized as products of biological activity. Therefore, the current review article aims to analyze the evolution of Ichnology and the establishment of its current paradigms as an independent science. This text also aims to disseminate Ichnology, its main concepts, and methods of study. The discussion of concepts here is intended to provide the tools for ichnological analysis, especially for students entering this field of knowledge.

Keywords: Ichnology, epistemology, demarcation of science, ichnofabric.

INTRODUÇÃO

Para o senso comum, a Ciência é um ramo do conhecimento que geralmente evoca uma ideia de supremacia perante outras formas do saber. Jargões como “cientificamente comprovado”, por exemplo, são frequentemente usados em estratégias de *marketing* para dar confiabilidade aos produtos anunciados, ou mesmo corroborar hipóteses jornalísticas não fáticas. Embora esta noção de superioridade seja contestada por filósofos da ciência, ela gera discussões que questionam as diferenças perante as formas de adquirirmos o conhecimento (Alves, 1981). Isto resulta em debates que abordam a demarcação científica ou cientificidade, sobretudo àqueles relacionados ao método. A Icnologia, ciência de interface entre a Geologia e a Biologia, também representa análises epistêmicas, com questionamentos de seu estatuto científico, além da delimitação de seu escopo, e assim, das características que definiriam um estudo como icnológico.

Considerando a evolução da ciência icnológica desde os primeiros registros arqueológicos de reconhecimento dos icnofósseis, este texto almeja analisar as características da Icnologia enquanto ciência, bem como se deu o estabelecimento de seus atuais paradigmas. Também se apresentam as bases e os principais conceitos em voga na “Icnologia Moderna”, fundada principalmente a partir dos trabalhos de Seilacher (1953, 1964).

COMENTÁRIOS SOBRE A DELIMITAÇÃO DO SABER CIENTÍFICO

Demo (1989) apontou que não há nada mais controverso em ciência do que a sua definição, sendo mais fácil definir o que não é ciência, como por exemplo, a religião e o senso comum. Porém, definir a ciência pelo que ela não é resulta em algo tão amplo que é como se não houvesse definição alguma. Para diferenciar ciência de outras formas de conhecimento é comum elencar o método como principal componente científico (Alves, 1981; Lakatos & Marconi, 1995). Contudo, vários métodos podem ser utilizados em uma abordagem científica e não há algo que possa ser chamado de método lógico para ter novas ideias, impossibilitando que a metodologia se configure como uma característica que forneça unidade à ciência (Popper, 1934). Vários métodos foram propostos para a aquisição de dados científicos e, de maneira geral, estão os métodos indutivo, dedutivo e hipotético-dedutivo. O último, por exemplo, provém principalmente das ideias de Karl Popper (1902 – 1994), que defendeu o valor do conhecimento racional por uma atitude crítica e pela construção de conjecturas as quais deveriam ser submetidas aos mais diversos testes.

O método de Popper postula que toda pesquisa tem sua origem num problema para o qual se procura uma solução, por meio da eliminação de falsas hipóteses. Este método não leva à certeza, uma vez que a verdade nunca será compreendida em sua totalidade. Deste modo, a certeza não pode ser adotada para a ciência como seu produto final, pois todas as nossas fontes de informação estão restritas à faixa perceptível por nossos sentidos ou equipamentos que nos revelam estes sinais (Alves, 1981). Assim, as conclusões científicas poderiam ser atingidas por meio da probabilidade, o que permitiu o desenvolvimento do conceito de falseabilidade. O raciocínio postula que, para uma questão ser considerada científica, deve ser passível de questionamento, ou seja, falseável. Questões de cunho filosófico ou religioso que não são falseáveis ou testáveis, não são questões científicas. Desta forma, fica evidente que na ciência não há dogmas ou verdades absolutas, mas sabe-se que as explicações para os fenômenos são provavelmente verdadeiras no paradigma vigente. Pode-se apontar que muitas vezes uma pesquisa não se inicia com a observação, mas pode derivar da teoria, de projeções matemáticas, ou de hipóteses. Do mesmo modo, as observações não produzem uma base inequívoca da qual possa ser derivado o conhecimento científico, pois mesmo a coleta dos dados pode estar enviesada.

Analisando os avanços na história da ciência, há teorias que não seguiram um método claro. Feyerabend (1977) argumentou que as ideias de um método científico ou de falseabilidade não resistem à investigação histórica e que o fenômeno em questão é que deveria demandar o método. Para o autor, como existem inúmeros métodos, é necessário que a coleta de dados seja realizada livre de teorias, para posteriormente utilizar-se de uma metodologia que dê inteligibilidade ao fenômeno. Essa abordagem desafia a ideia de que os fenômenos podem ser reduzidos a leis científicas rígidas e universais, sugerindo que a ciência deveria ser mais aberta a uma pluralidade de perspectivas e métodos. Neste sentido, Schopenhauer (1950) citou que a descoberta nem sempre é produto de uma longa corrente de pensamento abstrato, portanto, não é obtida por um processo estritamente lógico. Para estes autores, a prática científica deve adotar uma postura anárquica em relação ao método.

Considerando as características dos avanços científicos no curso da história, Kuhn (1962) sugeriu que a ciência não avança por uma acumulação contínua de conhecimento, mas sim por revoluções. A ciência normal, como denominada pelo autor, não objetiva trazer à tona novas espécies de fenômenos, mas investigar uma parcela detalhada da natureza que não seria possível fora do paradigma ao qual se está subordinado. As anomalias geralmente irão aparecer contra o pano de fundo proporcionado pela prática da ciência normal, possibilitando alterações e ajustes no paradigma, ou, quando grandes, gerando mudança de paradigma. Esta mudança é uma revolução científica. Nesta visão do fazer científico, a posse de um método não confere unicidade para a ciência, ou seja, não é pelo método que a ciência se difere de outras formas de conhecimento.

Como apresentado anteriormente, Popper (1934) assumiu que nenhuma teoria pode ser empiricamente verificável, e tampouco se justifica como científica apenas pelo método em que foi construída. Apenas a sua falseabilidade seria capaz de caracterizá-la como científica. Para Popper, a ciência permitiria a aquisição de certeza apenas quando determinada

hipótese está errada, mas nunca se está certa. Não há uma clareza no modo em que a ciência chega ao conhecimento, tampouco um limite preciso que delimite o que é científico. Contudo, Kuhn (1962) contestou o critério de falseabilidade, apontando que o mesmo não resiste ao teste histórico. Em seu desenvolvimento, a ciência não fez uso apenas de hipóteses falseáveis. Como exemplo, o autor citou avanços como o princípio da inércia e dos gases ideais, que não eram falseáveis quando propostos, impossibilitando que este critério seja demarcador da ciência. Kuhn (1962) então sugeriu que ao invés de tentar entender a ciência por seus critérios lógicos, poder-se-ia examinar a história para entender o que é ciência.

Na prática, todo cientista está mais interessado em preservar seu paradigma do que em falseá-lo, pois a *ciência normal* não busca novidades, e quando é bem sucedida, não encontra nenhuma (Demo, 1989). A Ciência Normal não trata de confirmação, verificação, falsificação, conjectura ou refutação. Mas sim de acúmulo construtivo de conceitos em um corpo de conhecimento significativo, respectivo a algum domínio específico (Hacking, 2012). A ciência avançaria por quebras de paradigmas, em que cada proposição é fruto de sua condição histórica e social, não podendo ser pensada fora de seu contexto. No que concerne à Icnologia, ao longo dos anos se presenciou algumas quebras de paradigmas, os quais serão apresentados e discutidos a seguir. Porém, quanto ao método, muitas das questões cerne da Icnologia não são falseáveis, como é comum nas Geociências, uma ciência histórica. Por exemplo, *Cruziana* é tido como um icnogênero majoritariamente produzido por trilobitas (há exceções, ver *Cruziana problematica*), mas os trilobitas foram extintos ao final do Paleozoico e nenhum grupo de artrópodes modernos permite comparações. Sendo assim, a inferência de que *Cruziana* é produto da ação dos trilobitas se baseia em analogias e comparações da morfologia dos apêndices locomotores dos trilobitas, que raramente se preservam, com os detalhes preservados no icnofóssil. Neste sentido, a Icnologia é uma ciência que se aproximaria à noção de Feyerabend (1977), buscando dar inteligibilidade às estruturas biogênicas através de métodos que não são “padronizados”.

CONCEITOS E PARADIGMAS DA ICNOLOGIA

Estrutura biogênica é o nome dado para qualquer sinal preservado em algum substrato (sedimento, rocha, osso, concha, madeira, entre outros) que resulte de ações comportamentais ou metabólicas de um organismo (Sedorko & Francischini, 2020). Por exemplo, pegadas de um animal, galerias ou tocas, marcas de arraste de cauda ou outras partes do corpo, estruturas construídas (ninhos, teias), furos que um animal faz para adentrar em um substrato rígido, suas fezes, deformações no chão feitas pelo jato de urina, enfim, qualquer evidência da atividade biológica é uma estrutura biogênica. A história da Icnologia é organizada em idades, de acordo com a principal abordagem dada às estruturas biogênicas ao longo dos anos (*sensu* Osgood, 1975).

Durante a “Idade dos Fucoides”, que será apresentada no próximo capítulo, muitas estruturas biogênicas descritas foram nomeadas com um nome genérico e um epíteto específico, seguindo a nomenclatura binominal de Carl Linnaeus (1707–1778), pois se interpretava que estas estruturas teriam sido verdadeiros organismos. Atualmente a tendência é de se evitar novos nomes para estruturas biogênicas, visando compreender estas estruturas e suas implicações paleoambientais. Portanto, no registro geológico um icnofóssil não é uma entidade biológica apenas por apresentar nomenclatura binominal, e assim, não é um fóssil (somatofóssil), mas uma estrutura sedimentar de origem biogênica (quando preservada em rocha sedimentar). Uma pegada ou trilha de animal moderno não é parte de um organismo da mesma forma que uma estrutura biogênica pretérita (icnofóssil) não é um fóssil (no sentido de corpo fóssil).

A principal vantagem de se analisar estruturas biogênicas no registro geológico reside em seu caráter autóctone, pois ao contrário de restos esqueléticos e demais partes orgânicas, elas se preservam no lugar em que foram produzidas. Toda estrutura biogênica é produzida como resultado de uma atividade biológica (comportamento), que é condicionada pelas condições ambientais. Por exemplo, em um ambiente subaquático com alta energia hidrodinâmica, a tendência é que a matéria orgânica esteja em suspensão, condicionando que organismos suspensívoros colonizem o substrato, deixando estruturas verticalizadas de moradia (*dominichnia*) que serão preservadas no registro sedimentar. Por outro lado, em ambientes subaquáticos estagnados a matéria orgânica se concentra dentro do substrato, favorecendo a colonização por organismos detritívoros e depositívoros. Nestas condições, espera-se encontrar predomínio de estruturas biogênicas horizontalizadas. Assim, estruturas biogênicas indicam diretamente as características do meio que induziram o comportamento do animal (Buatois & Mángano, 2011).

Portanto, é possível fazer inferências sobre parâmetros ambientais vigentes no momento da gênese das estruturas biogênicas, tais como salinidade, oxigenação, energia hidrodinâmica, taxa de sedimentação e consistência do substrato. Essas informações contribuem para a interpretação dos depósitos sedimentares. Um aspecto importante das estruturas sedimentares biogênicas, tanto fósseis quanto atuais, é justamente que elas constituem evidências do comportamento do organismo produtor. Embora nem sempre seja possível identificar o organismo responsável pelas estruturas, é viável reconhecer a categoria etológica (comportamental) associada à sua formação, o que fornece informações relevantes sobre as condições ambientais que influenciaram essa atividade. Há outras características intrínsecas às estruturas biogênicas, como:

1. *a ampla distribuição temporal no registro geológico*: geralmente icnofósseis não são restritos a idades, por exemplo, *Planolites* é um icnogênero reconhecido tanto para depósitos do Cambriano quanto no ambiente moderno. No geral, icnofósseis são pouco úteis em bioestratigrafia (=icnoestratigrafia), embora haja exceções (ver Sedorko *et al.*, 2017, 2019; Memória *et al.*, 2023 por exemplo);
2. *preservam-se comumente em rochas afossilíferas*: uma vez que seja gerada a ruptura do substrato, a preservação da estrutura biogênica é facilitada. Como icnofósseis **não** compõem partes para sofrer deterioração ou dissolução, muitas vezes são a única evidência biológica nos depósitos sedimentares, principalmente em rochas arenosas (como exemplo, a Formação Furnas na Bacia do Paraná; Sedorko *et al.*, 2017; Richter *et al.*, 2023);
3. *refletem o comportamento dos organismos*: destaque é dado para os organismos de corpo mole, cujo registro corpóreo é raro. Deste modo, os icnofósseis muitas vezes são a única evidência destes grupos de organismos pretéritos;
4. *são úteis na caracterização de fácies sedimentares*: como apresentado acima, por serem condicionados por processos deposicionais, os icnofósseis são bons indicadores dos parâmetros paleocológicos e processos paleoambientais. A aplicabilidade da Icnologia para inferências paleoambientais é um paradigma científico.

Uma discussão dos demais princípios icnológicos é apresentada por Buatois & Mángano (2011). As várias classificações de Seilacher (1953) forneceram o paradigma dentro do qual os icnólogos trabalham até a atualidade. Em síntese, Seilacher propôs que qualquer estrutura biogênica pode ser classificada simultaneamente de diversas formas: (1) toponomicamente, de acordo com a sua relação de contraste com os materiais do substrato em que estão inseridas; (2) biologicamente, de acordo com a relação com seu produtor; (3) etologicamente, de acordo com a função biológica representada; e (4) de forma sistemática, de acordo com a morfologia.

As estruturas biogênicas podem ser divididas em três distintos grupos: *estruturas sedimentares biogênicas*, *estruturas de bioerosão* e *outras evidências de atividade biológica* (Bromley, 1996). As estruturas sedimentares biogênicas, por sua vez, se dividem em estruturas de *bioturbação* (produzidas dentro ou sobre substratos inconsolidados, que envolvem apenas a ação biomecânica do animal), de *bioestratificação* (por exemplo, estromatólitos produzidos por cianobactérias e tapetes algálicos feitos por esteiras microbianas) e de *biodeposição* (por exemplo, os coprólitos, as pelotas e as trilhas fecais).

As estruturas de bioerosão são aquelas que perfuram substratos duros, como os líticos e xílicos, ou esqueletos mineralizados, como conchas, carapaças e até mesmo ossos. Na classificação de *outras evidências de atividade biológica* estão ferramentas, ninhos, teias, cápsulas de ovos e estruturas semelhantes, que resultam de padrões biológicos inerentes a determinadas espécies, sendo bem mais fácil a identificação de seu produtor. Contudo, como não são produzidas dentro do substrato, facilmente são destruídas ou transportadas, sendo seu registro menos comum.

Estruturas de bioerosão são produzidas mecânica ou bioquimicamente (ou um misto de ação mecânica e bioquímica) em substratos rígidos por um organismo. Este substrato pode ser clastos, rochas, ossos, dentes, madeira ou conchas (Frey & Wheatcroft, 1989). Dentre os principais organismos bioerodidores estão algas, moluscos bivalves e gastrópodes, fungos, esponjas, polvos, poliquetas, briozoários, foronídeos, ctenostomados e cirripédios (Young & Nelson, 1988; Edinger, 2003; Taylor & Wilson, 2003). Entretanto, apesar de seu caráter destrutivo, as bioerosões constituem em muitas ocasiões umas das poucas evidências de interação biológica no registro fóssilífero.

Macroperfuradores podem perfurar seus substratos para construir habitações em seu interior, sendo esta atividade comum quando o esqueleto está disponível (pós-morte do organismo) (Buatois & Mángano, 2011). Entretanto, perfurações de predação (no período de vida do organismo), resultam em uma assinatura icnológica distinta. Raspadores externos se alimentam de algas nas camadas superficiais de moluscos, corais e rochas sedimentares, e sua atividade está,

portanto, limitada à zona fótica (Edinger, 2003; Lecinsky *et al.*, 2002). Ocorrências de bioerosões em substratos que constituem camadas são agrupadas em icnofácies substrato-controladas, de acordo com suas características nos fósseis corporais, podendo ocorrer principalmente na icnofácies *Trypanites* (conchas, ossos, dentes, paredões rochosos) ou na icnofácies *Teredolites* (em substrato xílico) (Buatois *et al.*, 2002; Buatois & Mángano, 2011).

As estruturas de bioturbação resultam da ação mecânica do organismo e são produzidas dentro ou sobre substratos inconsolidados (Buatois & Mángano, 2011). As estruturas de bioturbação mais comuns são escavações, pistas intraestratais rasas, pistas e trilhas epiestratais, marcas de nado e impressões de repouso do animal. Escavações são estruturas relativamente permanentes, que são mantidas por seus ocupantes (Bromley, 1996). Pistas são estruturas de deslocamento contínuo, superficial ou subsuperficial, sem a impressão de apêndices (icnólogos de vertebrados adotam nomenclatura distinta; ver Sedorko & Francischini, 2020). Pegadas são impressões produzidas no sedimento por apêndices locomotores individuais, sejam de vertebrados ou de invertebrados, e trilhas são sucessões de pegadas. Portanto, as escavações são as estruturas que potencialmente mais podem contribuir para a destruição de bioclastos.

As estruturas biogênicas podem ser visualizadas, no registro geológico, como icnofósseis (estruturas em três dimensões), ou icnofábricas (estruturas em duas dimensões). Normalmente, icnofósseis são visualizados em afloramentos, onde a exposição natural permite a visualização das três dimensões, enquanto que em testemunhos de sondagem o corte vertical permite apenas que se visualizem duas dimensões. Quando se analisam icnofábricas, nem todos os elementos diagnósticos de determinado icnotáxon estão disponíveis, portanto, mais do que meramente identificá-lo, é pertinente extrair o máximo de informação possível sobre a origem daquela estrutura.

Em condições estáveis a ocupação do substrato obedece a certo escalonamento (*tiering*) composto por níveis de ocupação. A análise da sucessão de *tierings* presentes permite a compreensão da evolução dos processos que levaram à distribuição da fauna bentônica (Ekdale & Bromley, 1991). Os níveis mais superficiais são primeiro colonizados, principalmente por escavadores suspensívoros epiestratais ou endoestratais. Então, níveis inferiores passam a ser explorados, até chegar ao nível dos decompositores (como ilustrado na Figura 1). Assim, a preservação da bioturbação é muito mais significativa em locais onde a sedimentação é baixa e há certa estabilidade nas condições ambientais, o que proporciona exploração de todos os *tiers* (níveis do substrato), já que a alta sedimentação pode obliterar o efeito da bioturbação. Quando se observam sobreposições de *tiers* é possível inferir que eventos atuaram naquela associação icnológica. Por exemplo, *Zoophycos*, um escavador profundo, sobrepondo estruturas tipo *Skolithos*, sem formas de *tiers* intermediários preservadas pode estar representado alta taxa de sedimentação (que teria gerado rápida migração vertical da icnofauna) ou eventos de inundação (onde formas de hábitos mais profundos sobrepoem formas de hábitos raso). Para uma análise precisa é necessário integrar os dados faciológicos (ver por exemplo Sedorko *et al.*, 2018). Uma análise icnológica que busque realizar inferências paleoambientais jamais poderá ser dissociada da análise de fácies, como demonstrado anteriormente.

Uma associação de traços fósseis que sempre corresponde aos mesmos parâmetros ambientais/deposicionais, que aparece de forma recorrente no registro sedimentar (repetindo-se no tempo geológico) e, ainda, possui caráter global, é caracterizada como icnofácies (Seilacher, 1964; Frey, 1975; Buatois & Mángano, 2011). As icnofácies permitem que se reconheçam as características gerais de determinado ambiente deposicional. Mais do que a batimetria, o que controla a distribuição das icnofácies são os parâmetros paleoecológicos que atuaram no meio. Assim, em turbiditos, por exemplo, é possível até mesmo se reconhecer a icnofácies *Skolithos*, pois o que caracteriza esta icnofácies não é sua posição em relação à linha de costa, mas sim as condições de alta energia hidrodinâmica que representa.

Portanto, a mera identificação de um icnofóssil pouco agrega para análises paleológicas e paleoambientais. Deve-se buscar compreender qual comportamento esteve envolvido na produção da estrutura, qual o significado das morfologias observadas e como aplicar esta informação em uma análise paleoambiental. A simples menção à nova ocorrência de um icnotáxon em determinada área/unidade é abordagem remanescente de uma Paleontologia Sistemática, que considerava o icnofóssil uma entidade, o que atualmente não faz mais sentido. A Icnologia é uma ciência aplicada, e como tal apresenta abordagens mais integradas e complexas do que apenas nomear coisas. Para um aprofundamento teórico em Icnologia, com mais detalhes em relação aos diversos métodos e aplicações, consultar Buatois & Mángano (2011), Knaust & Bromley (2012), e Sedorko & Francischini (2020), esta última referência em português.

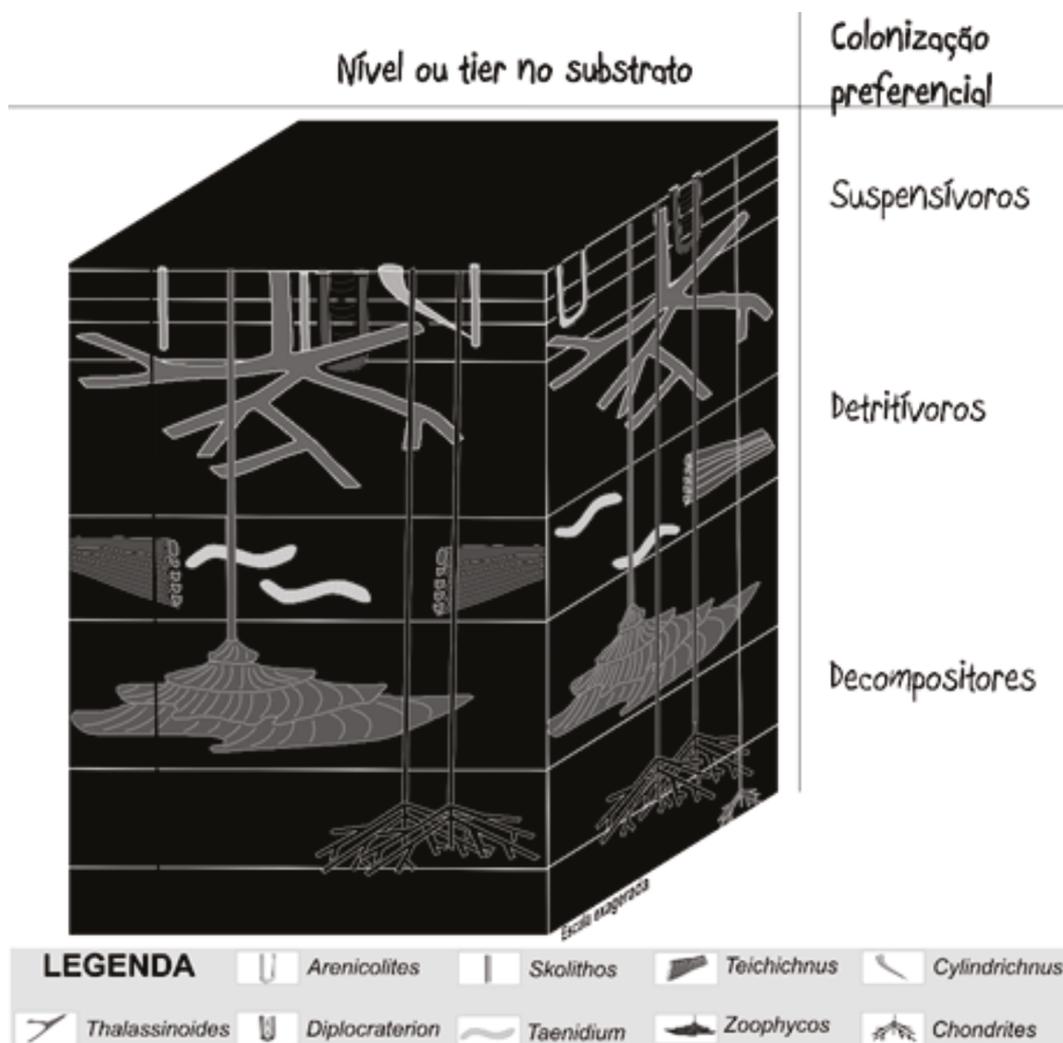


Figura 1. Esquema representativo da ocupação do substrato dependendo da categoria trófica envolvida. Escala exagerada. Inspirado em Bromley (1996).
Figure 1. Tiering occupation within substrate based on trophic categories. Exaggerated scale. Inspired in Bromley (1996).

HISTÓRICO DA ICNOLOGIA

A Icnologia (do grego *iknos* = vestígio, sinal + *logos* = estudo) é a ciência que estuda a interação dos organismos com o substrato dando ênfase no modo em que os animais e as plantas deixam o registro de tal atividade (Ekdale *et al.*, 1984). Pode ser considerada uma ciência de interface entre a Biologia e a Geologia. O estudo dessa interação (estruturas biogênicas ou icnofósseis) em ambientes modernos é abordado pela Neoicnologia e no registro fóssil pela Paleocnologia.

Analisando-se em retrocesso, há indícios de que os humanos reconheceram icnofósseis desde o Paleolítico (Pleistoceno). Moluscos fósseis do Mioceno apresentando perfurações (estruturas de bioerosão denominadas de *Oichnus*) são comumente encontrados associados a artefatos culturais. Estes moluscos com bioerosão teriam sido coletados de modo seletivo para serem utilizados como adorno pessoal (Baucon *et al.*, 2012). Este comportamento dos grupos humanos pretéritos sugere o reconhecimento das estruturas biogênicas, ainda que de modo incipiente.

Na filosofia antiga poucas obras mencionam estruturas biogênicas, e sempre de modo indireto, como em “História dos Animais” de Aristóteles (384 – 322 a.C.) e em “Sobre Peixes” de Teophrastus (371–287 a.C.). Neste período, a obra mais significativa foi a de Plínio, O Velho (Caio Plínio Segundo, 23–79), que descreveu “phycites” (*i.e.* *Chondrites*) como uma estrutura semelhante a algas. Durante a Renascença na Europa passaram a existir obras isoladas tratando das estruturas biogênicas. Neste período se insere a obra de Leonardo da Vinci (1452–1519), que fez observações sobre o

icnogênero *Paleodictyon* e comparou alguns icnofósseis com a origem dos fósseis corporais (Baucon *et al.*, 2012). Da Vinci também argumentou que estas estruturas poderiam ser usadas para inferir condições marinhas para algumas camadas. Por estas contribuições pontuais, Da Vinci por vezes é evocado como o pai da Icnologia (Baucon, 2010), ainda que pouco avanço tenha resultado destas observações naquela época. Posteriormente, Ulisse Aldrovandi (1522 – 1605) em sua obra “*Musaeum Metallicum*” incluiu muitos traços fósseis com excelentes ilustrações e detalhes, como *Cosmorhaphé* e estruturas de bioerosão em moluscos.

De modo geral, os naturalistas foram os pioneiros nos estudos icnológicos e acrescentaram muitas descrições, o que coloca as raízes da Icnologia no Renascimento, no período que é chamado “Idade dos Naturalistas” (Osgood, 1975; Baucon *et al.*, 2012). Após estes movimentos iniciais, entre os séculos XVII e XVIII passa-se a valorizar o uso da razão, e a Icnologia se apropria desta nova visão científica principalmente na análise de coprólitos e bioerosões. Esta época foi denominada de “Período de Transição” (Baucon *et al.*, 2012).

A passagem da “Idade dos Naturalistas” para a “Idade dos Fucoídeos” foi transicional, com os conceitos sendo lentamente incorporados. Adolphe Brongniart (1801 – 1876) firmou a idade dos fucoídeos quando interpretou algumas estruturas como de origem algálica, então denominadas fucoídeos (= *Chondrites*) (Baucon *et al.*, 2012). A partir deste trabalho, outros fucoídeos foram aparecendo ou se firmando na literatura, como *Asterosoma*, *Rhizocorallium*, *Scolicia*, *Daedalus*, *Paleodictyon*, *Spirophyton*, *Diplocraterion* e *Zoophycos* (Baucon *et al.*, 2012). Em conjunto com a hipótese dos fucoídeos, os traços fósseis também eram interpretados como “zoófitos (animais semelhantes a plantas), corpos fósseis de organismos vermiformes ou em alguns casos como verdadeiras escavações, trilhas e pistas de invertebrados” (Baucon *et al.*, 2012, p. 13).

Nicholson (1873) apresentou as primeiras interpretações contrárias à hipótese dos fucoídeos, sugerindo que a origem das estruturas seria de tocas de anelídeos ou trilhas. O principal trabalho neste período é de Nathorst (1881), que observou ambientes modernos para refutar a natureza dos fucoídeos (análogos modernos). Neste período Darwin também teve sua contribuição a partir do estudo de minhocas e da produção de moldes vegetais (Baucon *et al.*, 2012).

Quanto aos estudos realizados na América do Norte, William Dawson (1820 – 1899) interpretou *Rusophycus*, *Arthropycus* e *Nereites* como produzidos por trilobitas e Edward Hitchcock (1793 – 1864) atribuiu nomes a trilhas de vertebrados. A partir da obra de Nathorst (1881), têm-se o “Período de Reação” no início do século XX (Baucon *et al.*, 2012). Diversos estudos surgiram em várias partes do mundo afirmando as interpretações de Nathorst. Na América do Sul, Roselli (1938) apresentou importantes estudos com traços fósseis de insetos em paleossolos, fundando as bases para a atual escola de paleoicnologia de insetos na Argentina e Uruguai. Na Alemanha pós-guerra funda-se o Laboratório Senckenberg, dedicado à comparação de ambientes deposicionais modernos e fósseis (Baucon *et al.*, 2012). Neste laboratório se desenvolveram importantes observações em ambientes modernos (Mar de Wadden), gerando as bases para o que foi chamado “Aktuopaläontologie”, ou Actuopaleontologia. Os principais nomes relacionados ao Instituto Senckenberg são Rudolf Richter (fundador, 1881–1957), Walter Häntzschel (1904 – 1972) e Wilhelm Schäfer (1912 – 1981) (Baucon *et al.*, 2012).

Deste cenário surge o trabalho de Adolf Seilacher (1925 – 2014), que embora não tenha participado do instituto, conhecia os trabalhos desenvolvidos (Baucon *et al.*, 2012). Seilacher (1953) fundou as bases da moderna Icnologia ao considerar os icnofósseis como produto de um comportamento (classes etológicas). O autor também apresentou uma classificação estratinômica para os icnofósseis, e considerou caráter espacial das ocorrências, culminando no conceito de icnofácies (Seilacher, 1964).

Embora já não se aceite que a paleobatimetria seja o principal fator de controle das icnofácies, este conceito gerou o novo paradigma para a ciência icnológica. Seilacher desenvolveu objetivos e métodos claros para a Icnologia e estabeleceu o zoneamento paleoambiental a partir das icnofácies. Posteriormente, Reineck (1963) desenvolveu uma classificação para quantificar a bioturbação, que foi a base para outros índices propostos (e.g. Bottjer & Droser, 1991; Taylor & Goldring, 1993; Miller & Smail, 1997; Knaust, 2012). Nos anos 1970 a Icnologia se desenvolveu seguindo principalmente a indústria do petróleo, quando altas no preço incentivaram novos métodos de exploração. A importância da Icnologia na indústria do petróleo promoveu o estudo de traços fósseis em testemunhos de sondagem, quando surgiram as primeiras tentativas de classificação qualitativa e quantitativa da ocupação do substrato, determinando as icnofábricas (Ekdale *et al.*, 1984). Neste cenário se desenvolveram parcerias que resultaram em muitas publicações, com destaque para as obras conjuntas de Robert Frey (1938–1992) e George Pemberton (1948–2018) e de Richard Bromley (1939–2018) e Allan Ekdale (e.g. Bromley & Ekdale, 1984a; 1984b; 1986a; 1986b; Ekdale & Bromley, 1983; 1988; 1991; Frey & Pemberton, 1985; 1986; 1987; 1990; 1991; Pemberton & Frey, 1982; 1984a; 1984b; 1985).

O foco no estudo de icnofábricas também foi a porta para a organização de encontros periódicos de icnólogos para discussão de ideias. A partir de um encontro histórico em Nottingham (Inglaterra), em 1990, durante o “Congresso Internacional de Sedimentologia” criou-se o “International Ichnofabric Workshop”, que teve sua primeira edição em 1991 e, desde então, a cada dois anos reúne pesquisadores interessados na discussão dos aspectos aplicados da Icnologia. O movimento inspirou outros segmentos da pesquisa icnológica e criaram-se *workshops* focados em bioerosão e em icnotaxonomia, este último com o objetivo de revisar a sistemática de traços fósseis e atualizar o único índice icnotaxonômico existente, que compõe o “Treatise on Invertebrate Paleontology” Parte W, atualizado pela última vez em 1975 por Walter Häntzschel.

Em paralelo, criou-se, em 1993, na Argentina, a “Reunión Argentina de Icnología”, um evento local que repercutiu nos países vizinhos, Uruguai e Brasil, atraindo pesquisadores para a discussão de ideias no âmbito latino-americano. Esse evento, de periodicidade trienal, foi crucial na consolidação da Icnologia nos países latinos, dando escopo para a organização, pelos icnólogos latinos, do primeiro Congresso Internacional de Icnologia (ICHNIA), em Trelew, Argentina, em 2004, e do Simpósio Latinoamericano de Icnologia (SLIC), em São Leopoldo-RS, em 2010 para substituir a reunião local. A criação do congresso internacional consolidou de vez a ciência icnológica, culminando na criação da Associação Internacional de Icnologia, em atividade desde 2008 e que tem dado suporte a inúmeros estudantes principalmente na forma de apoio à participação em eventos da área. O Brasil sediou neste ano (2024) o 5th ICHNIA, em Florianópolis (<https://www.ichnia2024.com/>).

CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Atualmente busca-se evitar ao máximo a designação de novos nomes icnogênicos ou icnoespecíficos. Em contrapartida, se almeja analisar as variantes preservacionais considerando que informações podem ser inferidas destas diferenças. A caracterização icnológica de determinado depósito sedimentar não pode ser conduzida de modo isolado, sem considerar a análise de fácies, pois o icnofóssil enquanto estrutura sedimentar biogênica é um atributo faciológico. Desde Seilacher (1953) os icnofósseis são interpretados como o registro do comportamento dos organismos, e como tal, sujeitos às variações nos diferentes parâmetros paleoecológicos. Deste modo, os icnofósseis apresentam padrões de preservação que permitem inferências paleoecológicas e paleoambientais.

Assim, a Icnologia se consolidou como ciência independente da Paleontologia, embora correlatas, adquirindo clareza em seus objetivos, desenvolvendo diferentes métodos de análise e com seus próprios paradigmas e revoluções. A condição de ciência para a Icnologia é inquestionável se considerada a concepção de Thomas Kuhn, em que a ciência abrange o conjunto dos fatos, teorias e métodos disponíveis na bibliografia que fundamentam seu paradigma, enquanto que os cientistas são as pessoas que contribuem em elementos deste conjunto. Por outro lado, pela lógica popperiana da falseabilidade como demarcadora do conhecimento científico, é notório que alguns conceitos icnológicos não são falseáveis, algo comum no conjunto de “ciências históricas” relacionadas ao tempo geológico e aos organismos extintos. A ciência, para Feyerabend (1977), deveria ser anárquica, no sentido de fornecer a liberdade de pensamento e expressão, simbolizando o mais perfeito senso de “querer saber”. Se esse é o real objetivo da ciência, então pode-se dizer que a Icnologia definitivamente cumpre com o critério.

O “querer saber” sobre a evolução da vida e do comportamento dos organismos que culmina em um compêndio de informações, hipóteses, modelos e teorias de caráter preditivo está no escopo de uma prática científica. Cabe ressaltar que essa prática e o acúmulo de conhecimento só fazem sentido com o pano de fundo proporcionado pelo contexto histórico e social do atual paradigma. Parafraseando Spencer (1896), que considera os cidadãos como produto da sociedade, os icnólogos, bem como todos os cientistas, também não são imunes ao seu contexto sociocultural, e suas ações seriam impossíveis sem as condições construídas antes de seu período de vida. Ainda que o conhecimento científico seja permeado de interesses não-científicos, possua uma demarcação obscura e se configure como uma forma de se conhecer o universo, esta atividade humana não perde o brilho que comumente lhe cerca. Bertold Brecht sustenta que a finalidade da ciência seria aliviar a miséria da existência humana. E, assim, retorna-se a ideias puristas, lembrando a célebre frase de Carl Sagan, “somos uma forma de o Universo conhecer a si mesmo”. E a ciência tem sido nossa melhor ferramenta.

AGRADECIMENTOS

DS agradece Márcio José Ornatt e Caio César Rangel pelas discussões na primeira versão do texto e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq 306493/2022-5) pela bolsa de produtividade em pesquisa. RGN agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq 308733/2022-3) pela bolsa de produtividade em pesquisa. Agradecemos aos revisores, Antonio Carlos Fernandes e ao revisor anônimo, que contribuíram significativamente para a qualidade deste texto.

REFERÊNCIAS

- Alves, R. 1981. *Filosofia da Ciência: uma introdução ao jogo e suas regras*. São Paulo: Brasiliense.
- Baucon, A.; Bordy, E.; Brustur, T.; Buatois, L.A.; Cunningham, T.; De, C.; Duffin, C.; Felletti, F.; Gaillard, C.; Hu, B.; Hu, L.; Jensen, S.; Knaust, D.; Lockley, M.; Lowe, P.; Mayor, A.; Mayoral, E.; Mikuláš, R.; Muttoni, G.; Carvalho, C.N.; Pemberton, G.; Pollard, J.; Rindsberg, A.; Santos, A.; Seike, K.; Song, H.; Turner, S.; Uchman, A.; Wang, Y.; Yi-Ming, G.; Zhang, L.; Zhang, W. 2012. A History of Ideas in Ichnology. In: KNAUST, D.; BROMLEY, R. (eds.). *Trace Fossils as Indicators of Sedimentary Environments*. Developments in Sedimentology 64.
- Baucon, A. 2010. Leonardo da Vinci, the founding father of ichnology. *Palaaios* 25 (6), 361–367.
- Buatois, L.A.; Mángano, M.G. 2011. *Ichnology: Organism-Substrate Interactions in Space and Time*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Bottjer, D.; Droser, M. 1991. Ichnofabric and basin analysis. *Palaaios* 6(3):199–205.
- Bromley, R.; Ekdale, A. 1984a. *Chondrites: a trace fossil indicator of anoxia in sediments*. *Science* 224, 872–874.
- Bromley, R.; Ekdale, A. 1984b. Trace fossil preservation in flint in the European chalk. *Journal of Paleontology* 58, 298–311.
- Bromley, R.; Ekdale, A. 1986a. Composite ichnofabric and tiering of burrows. *Geological Magazine* 123, 59–65.
- Bromley, R.; Ekdale, A. 1986b. Flint and fabric in the European chalk. In: SIEVEKING, Gale de Giberne. HART M.B. (eds.). *The Scientific Study of Flint and Chert*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 71–82.
- Bromley, R. G. 1996. *Trace Fossils: Biology, Taphonomy and Applications*. Chapman and Hall, London, pp. 361
- Demo, P. 1989. *Metodologia científica em Ciências Sociais*. 2. ed. São Paulo: Atlas.
- Ekdale, A.; Bromley, R. 1983. Trace fossils and ichnofabric in the Kjølbj Gård Marl, uppermost Cretaceous, Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 31, 107–119.
- Ekdale, A.; Bromley, R. 1988. Diagenetic microlamination in chalk. *Journal of Sedimentary Petrology* 58, 857–861.
- Ekdale, A.; Bromley, R. 1991. Analysis of composite ichnofabrics: an example in uppermost Cretaceous chalk of Denmark. *Palaaios* 6, 232–249.
- Ekdale, A.; Bromley, R.; Pemberton, G. (eds.) 1984. *Ichnology: Trace Fossils in Sedimentology and Stratigraphy*. SEPM Short Course, No. 15.
- Feyerabend, P. 1977. *Tratado contra o método*. Rio de Janeiro: Francisco Alves.
- Frey, R. (ed.) 1975. *The Study of Trace Fossils*. Springer, Berlin, 562 pp.
- Frey, R.; Pemberton, G. 1985. Biogenic structures in outcrops and cores. I. Approaches to ichnology. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 33, 72–115.
- Frey, R.; Pemberton, G. 1986. Vertebrate lebensspuren in intertidal and supratidal environments, Holocene barrier islands. *Georgia. Senckenbergiana maritima* 18, 45–95.
- Frey, R.; Pemberton, G. 1987. The *Psilonichnus* ichnocoenose and its relationship to adjacent marine and nonmarine ichnocoenoses along the Georgia coast. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 35, 333–357.
- Frey, R.W.; Wheatcroft, R.A. 1989. Organism-substrate relations and their impact on sedimentary petrology. *Journal of Geoscience Education* 37:261–279
- Frey, R.; Pemberton, G. 1990. Bioturbate texture or ichnofabric? *Palaaios* 5, 385–386.
- Frey, R.; Pemberton, G. 1991. Or is it bioturbate texture? *Ichnos* 1, 327–329.
- Hacking, I. 2012. Representar e intervir: tópicos introdutórios de filosofia da ciência natural. Editora UERJ, 406p.
- Knaust, D. 2012. Methodology and techniques. In: KNAUST, D.; BROMLEY, R. (eds.). *Trace Fossils as Indicators of Sedimentary Environments*. Developments in Sedimentology, vol. 64. Elsevier, Amsterdam, pp. 245–271.
- Knaust, D.; Bromley, R. (eds.). 2012. *Trace Fossils as Indicators of Sedimentary Environments*. Developments in Sedimentology, vol. 64. Elsevier, Amsterdam, pp. 245–271.
- Kuhn, T. S. 1962. *The structure of scientific revolutions*. Chicago: University of Chicago Press. Chicago.
- Lakatos, E.M.; Marconi, M.A. 1995. *Metodologia científica*. São Paulo: Atlas.
- Memória, S.C., Netto, R.G., Sedorko, D. 2023. A new model for Early Paleozoic ichnostratigraphy based on trace fossil assemblages from Brazil. *Evolving Earth*, v. 1, 100026.
- Miller, M.; Smail, S. A. 1997. semiquantitative field method for evaluating bioturbation on bedding planes. *Palaaios* 12, 391–396.
- Nathorst, A.G. 1881. *Om spar av nagra evertebrede djur och deras paleontologiska betydelse*. Kongl. Svenska Vetenskaps-Akademien, Handlingar 18, 1–104.
- Nicholson, H.A. 1863. Contributions to the study of the errant annelids of the older Palaeozoic rocks. *Proceedings of the Royal Society of London* 21, 288–290.
- Osgood, R. 1975. The history of invertebrate ichnology. In: Frey, Robert (ed.). *The Study of Trace Fossils*. Springer, Berlin, pp. 3–12.
- Pemberton G, S.; Frey, R.W. 1982. Trace fossil nomenclature and the Planolites-Palaeophycus dilemma. *Journal of Paleontology* 56, 843–881.
- Pemberton G, S.; Frey, R.W. 1984a. Quantitative methods in ichnology: spatial distribution among populations. *Lethaia* 77, 33–49.
- Pemberton G, S.; Frey, R.W. 1984b. Ichnology of storm-influenced shallow marine sequence: Cardium Formation (Upper Cretaceous) at Seebe, Alberta. In: Stott, Donald. Glass, Donald (eds.). *The Mesozoic of Middle North America*. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir. 9, pp. 281–304..

- Pemberton G, S.; Frey, R.W. 1985. The Glossifungites Ichnofacies: modern examples from the Georgia coast, U.S.A. In: Curran, Allen (ed.). *Biogenic Structures: Their Use in Interpreting Depositional Environments*. SEPM Special Publication, vol. 35, pp. 237–259.
- Popper, K. 1934. *Logic of Scientific Discovery*. New York: Science Editions.
- Reineck, H.E. 1963. Sedimentgefüge im Bereich der südlichen Nordsee. *Abhandlungen der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft* 505, 1–138.
- Richter, K.W., Bosetti, E.P., Tavares, I.S., Sedorko, D. 2023. Trace fossils from Furnas formation (Paraná Basin) reveal a marine depositional environment, *Journal of South American Earth Sciences*, 128, 104475. doi: 10.1016/j.jsames.2023.104475.
- Roselli, L. 1938. Apuntes de geología y paleontología uruguaya. Sobre insectos del Cretácico Del Uruguay o descubrimiento de admirables instintos constructivos de esa época. *Boletín de la Sociedad Amigos de las Ciencias Naturales "Kraglievich-Fontana"* 1, 72–102.
- Schopenhauer, A. 1950. *O mundo como vontade e representação*. Buenos Aires: El Ateneo Editorial.
- Sedorko, D. & Francischini, H. (org.). 2020. *Icnologia: interações entre organismos e substratos*. 1. ed. Curitiba: Editora CRV, v. 1. 672p .
- Sedorko, D., Netto, R.G., Savrda, C.E., Assine, M.L., Tognoli, F.M.W., 2017. Chronostratigraphy and environment of Furnas Formation by trace fossil analysis: Calibrating the lower Paleozoic Gondwana realm in the Paraná Basin (Brazil). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 487, 307–320. doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.09.016
- Sedorko, D., Netto, R.G., Horodyski, R.S., 2018. A Zoophycos carnival in Devonian beds: Paleoeological, paleobiological, sedimentological, and paleobiogeographic insights. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 507, p. 188-200.
- Sedorko, D., Netto, R. G., Horodyski, R. S., 2019. Tracking Silurian-Devonian events and paleobathymetric curves by ichnologic and taphonomic analyzes in the southwestern Gondwana. *Global and Planetary Change* 179, 43–56. doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.05.007
- Seilacher, A. 1953. Studien zur Palichnologie. I. Über die Methoden der Palichnologie. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, 96, 421–452.
- Seilacher, A. 1964. Sedimentological classification and nomenclature of trace fossils. *Sedimentology*, 3:253-256.
- Spencer, H. 1896. *The Study of Sociology*. Appleton, New York, 438 pp.
- Taylor A.; Goldring, R. 1993. Description and analysis of bioturbation and ichnofabric. *Journal of the Geological Society*, London 150:141–148.
- Taylor, P.D.; Wilson, M.M., 2003. Palaeoecology and evolution of marine hard substrate communities. *Earth-Science Reviews* 62: 1–103