

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

ICNOFÓSSEIS DA FORMAÇÃO ALTER DO CHÃO (GRUPO  
JAVARI, BACIA DO AMAZONAS) EM PONTA DAS LAJES,  
MANAUS (AM): CLASSIFICAÇÃO E INFERÊNCIAS  
PALEOAMBIENTAIS

TAMNA GADELHA DA SILVA

MANAUS  
2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

TAMNA GADELHA DA SILVA

ICNOFÓSSEIS DA FORMAÇÃO ALTER DO CHÃO (GRUPO  
JAVARI, BACIA DO AMAZONAS) EM PONTA DAS LAJES,  
MANAUS (AM): CLASSIFICAÇÃO E INFERÊNCIAS  
PALEOAMBIENTAIS

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Geociências da Universidade Federal do  
Amazonas, como requisito para a  
obtenção do título de Mestre em  
Geociências.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Valquíria Porfírio Barbosa

MANAUS  
2020

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S586i Silva, Tamna Gadelha da  
Icnofósseis da Formação Alter do Chão (Grupo Javari, Bacia do Amazonas) em Ponta das Lajes, Manaus (AM): classificação e inferências paleoambientais / Tamna Gadelha da Silva, Valquíria Porfírio Barbosa. 2020  
119 f.: il. color; 31 cm.

Orientadora: Valquíria Porfírio Barbosa  
Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Icnofósseis. 2. Paleoambientes. 3. Formação Alter do Chão. 4. Bacia do Amazonas. I. Barbosa, Valquíria Porfírio. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

TAMNA GADELHA DA SILVA

ICNOFÓSSEIS DA FORMAÇÃO ALTER DO CHÃO (GRUPO JAVARI,  
BACIA DO AMAZONAS) EM PONTA DAS LAJES, MANAUS (AM):  
CLASSIFICAÇÃO E INFERÊNCIAS PALEOAMBIENTAIS


Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Geociências da  
Universidade Federal do Amazonas,  
como requisito parcial para obtenção do  
Título de Mestre em Geociências, área  
de concentração em Geociências.

Aprovada em 06 de julho de 2020.

BANCA EXAMINADORA



Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Valquíria Porfírio Barbosa, Presidente.  
Universidade Federal do Amazonas



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS - ICE  
Prof. Dr. Emílio Alberto A. Soares  
Sedimentologia / Estratigrafia

Prof. Dr. Emílio Alberto Amaral Soares, Membro.  
Universidade Federal do Amazonas



Prof. Dr. Renato Sol Paiva de Medeiros, Membro.  
Universidade Federal do Amazonas  
Departamento de Geociências



Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rosemery Rocha da Silveira, Membro.  
Universidade Federal do Amazonas

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar o conforto divino necessário para esta caminhada;

À Prof<sup>a</sup> Vaquíria, pela orientação ao longo de muitos anos, pelo apoio nos momentos difíceis, pelos puxões de orelha nos momentos necessários e, principalmente, pelo incentivo ao meu trabalho como pesquisadora;

Ao Prof. Roberto, por sua contribuição neste trabalho e sua disponibilidade para discussões enriquecedoras;

À Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Geociências e CAPES, pela oportunidade, concessão de bolsa de estudos e fornecimento de condições para o desenvolvimento deste trabalho;

Ao Marcos, que como secretário do PPGGEO sempre foi muito prestativo e me ajudou a manter as coisas em ordem (quase sempre no prazo!);

Aos meus amigos – Elane, Yasmin, Asley, Antônio Elton, Juliana, Vanessa, Wagner, Nayara, Davi, Pâmela, Patrícia, Izabela, Roberto, Ericka, Igor, Henrique, Eliana – que me acompanharam e contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, além de tornar os dias (e noites) mais alegres;

Aos meus pais, Aneloria e Júlio, pelo incentivo sem igual, por todos os dias que me perguntaram “como está o trabalho?” e me faziam sentir que acreditavam em mim... e me cobravam, é claro (risos);

Aos meus meninos, Tamie, Junior e Noam, sempre presentes e prestativos, mesmo quando não sabiam muito bem o que dizer, diziam a coisa certa: vai dar tudo certo;

Aos demais membros da minha família – Magally, Jéssica, Adam e Melina – por todo o suporte nos dias tristes e comemorações nos dias alegres;

À minha avó Maria Estela, por ter sido tão presente em minha vida, me ensinado como a gente pode ser alegre e me mostrado que a dor da perda é passageira quando amamos de verdade e para sempre.

*“Até mesmo a menor das criaturas pode mudar o rumo do mundo”.*

*Galadriel, Senhor dos Anéis*

## RESUMO

Em rochas carentes em fósseis corpóreos, estudos paleontológicos destinados à classificação e ao levantamento paleoecológico de icnofósseis podem ser uma alternativa importante para a obtenção de informações sobre as condições de sedimentação destas rochas e seus paleoambientes. Nesse sentido, em conjunto com dados sedimentológicos, o desenvolvimento de estudos desta natureza em icnofósseis da Formação Alter do Chão (Grupo Javari, Cretáceo da Bacia do Amazonas), uma unidade reconhecidamente pobre em fósseis corpóreos, mostraram-se uma ferramenta potencial para este fim. Estes fósseis ocorrem em um afloramento localizado na margem esquerda do Rio Negro, Manaus – AM, conhecido como Ponta das Lajes e caracterizado por uma espessa e extensa sucessão de rochas clásticas, composta predominantemente por arenitos intercalados com siltitos e argilitos e, subordinadamente, conglomerados. A análise faciológica da sucessão possibilitou o reconhecimento de oito litofácies, representativas de três associações de fácies associadas a depósitos de preenchimento de canal, lago de planície de inundação e crevasse splay. O estudo paleontológico dos icnofósseis foi desenvolvido a partir da comparação morfológica do material selecionado com descrições e ilustrações fornecidas em bibliografias especializadas, particularmente aquelas relacionadas à descrição de icnofósseis continentais mesozoicos. Como resultado foram identificadas duas icnocategorias – paleotocas e marcas de raiz (rizólitos). A análise das paleotocas foi direcionada principalmente para os processos de formação e para a identificação do animal produtor, aqui interpretados como tocas de estivação de peixes dipnoicos (lungfishes). Por sua vez, a análise das estruturas atribuídas a marcas de raiz (rizólitos) foi direcionada o significado paleoambiental destas estruturas a partir da categorização de três categorias de rizólitos, rizoconcreções, túbulos e contramoldes de raiz. Por fim, a integração dos resultados obtidos pelas análises de fácies sedimentares e icnológica, permitiu a inferência para a sucessão estudada de um sistema fluvial, possivelmente com padrão entrelaçado de moderada a alta sinuosidade.

Palavras chaves: Icnologia. Paleoambientes. Formação Alter do Chão. Bacia do Amazonas.

## ABSTRACT

In rocks with low occurrence of body fossils, paleontological studies focused on the classification and paleoecological survey of ichnofossils may be an important alternative to obtain information about the rocks sedimentation conditions and its paleoenvironments. So, as the Alter do Chão Formation (Javari Group, Cretaceous Amazon Basin) is admittedly poor in body fossils, the development of integrated sedimentological and paleontological studies based on ichnofossils show be a potential tool for this purpose. These fossils occur in an outcrop located on the left marge of the Rio Negro, Manaus - AM, known as Ponta das Lajes and the lithology is predominantly composed of sandstones, siltstones, clay and conglomerates. The faciological analysis of these rocks led to the recognize eight lithofacies related to three facies associations, wich were interpreted as representative of channel fill deposits, floodplain lake and splay crevasse. The paleontological study of ichnofossils was developed from the morphological comparison of the selected material with description of Mesozoic continental ichnofossils. As a result, two ichnocategories were identified – burrows and root marks (rhizoliths). The analysis of burrows was directed mainly to the formation processes and to the identification of the producing animal, here interpreted as aestivation burrows of dipnoic fish (lungfishes). In turn, the analysis of the root marks structures (rhizoliths) was directed to its paleoenvironmental meaning from categorization of three categories of rhizoliths – rhizoconcretions, root tubules and root casts. Finally, the integration of the results obtained by sedimentary facies analysis and the classification of ichnofossils shows that the sub-environments identified in this sequence are associated with a fluvial system, possibly with braided pattern with moderate to high sinuosity.

Palavras chaves: Ichnology. Paleoenvironments. Alter do Chão Formation. Amazon Basin.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapas de localização da área de estudo.....	13
Figura 2 – Localização e limites geológicos da Bacia do Amazonas.....	20
Figura 3 – Carta Estratigráfica da Bacia do Amazonas.....	23
Figura 4 – Paleotoca de Paleocastor ( <i>Daimonelix</i> ).....	32
Figura 5 – Exemplos de paleotocas do Devoniano ao Neógeno.....	34
Figura 6 – Filogenia e amplitude estratigráfica de gêneros de peixes dipnoicos...	35
Figura 7 – Gnathorhiza e as tocas para estivação.....	38
Figura 8 – Reconstituição da produção de toca para estivação por peixe dipnoico.....	39
Figura 9 – Rizólitos de <i>Lorophyton goense</i> (Cladoxylopsida).....	40
Figura 10 – Representação esquemática de tipos de rizólitos.....	41
Figura 11 – Registro paleontológico mais antigo de rizólitos.....	42
Figura 12 – Perfil colunar da Formação Alter do Chão em Ponta das Lajes, Manaus – AM.....	45
Figura 13 – Fácies composta por conglomerado.....	46
Figura 14 – Fácies compostas por arenitos.....	50
Figura 15 – Fácies compostas por pelitos.....	52
Figura 16 – Modelo deposicional proposto para a Formação Alter do Chão em Ponta das Lajes, Manaus-AM.....	58
Figura 17 – Paleotocas.....	60
Figura 18 – Detalhes das paleotocas.....	61
Figura 19 – Paleotocas em seção transversal.....	62
Figura 20 – Diversidade morfológica de paleotocas do Mesozoico.....	66
Figura 21 – Comparação morfológica entre paleotocas de peixes dipnoicos.....	68
Figura 22 – Reconstituição de paleotocas de peixe dipnoico.....	69
Figura 23 – Rizólitos com crosta.....	71
Figura 24 – Rizólitos não preenchidos.....	72
Figura 25 – Rizólitos preenchidos.....	73
Figura 26 – Diversidade de rizólitos.....	74
Figura 27 – Reconstituição da gênese de rizólitos.....	76
Figura 28 – Sistema deposicional e a gênese de icnofósseis.....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais propostas de idade para a Formação Alter do Chão.....	25
Tabela 2 – Principais propostas de paleoambiente deposicional para a Formação Alter do Chão.....	28
Tabela 3 – Resumo da caracterização faciológica da Formação Alter do Chão em Ponta das Lajes, Manaus – AM.....	44
Tabela 4 – Tocas de vertebrados registradas no Mesozoico e suas principais características.....	64
Tabela 5 – Dimensões identificadas em algumas paleotocas de dipnoico ao longo do Fanerozoico.....	67

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
1.1 Apresentação.....	11
1.2 Objetivos.....	12
1.3 Localização da Área de Estudo.....	12
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	14
2.1 Material.....	14
2.2 Métodos.....	14
<b>3 CONTEXTO GEOLÓGICO</b> .....	20
3.1 Caracterização Geológica da Bacia do Amazonas.....	20
3.2 Caracterização Geológica da Formação Alter do Chão.....	24
<b>4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	29
4.1 Icnologia.....	29
4.2 Classificação de Icnofósseis.....	30
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	43
5.1 Análise de Fácies.....	43
5.2 Análise de Icnofósseis.....	59
5.3 Sistema Depositional e a Gênese de Icnofósseis.....	78
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	81
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	86
<b>APENDICE</b> .....	103

    Apêndice A: Paleotocas de Dipnoicos da Formação Alter do Chão (Cretáceo, Bacia do Amazonas) em Ponta das Lajes, Manaus – AM: Classificação e Significado Paleoambiental.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

A Formação Alter do Chão (Cretáceo da Bacia do Amazonas) é constituída por rochas de natureza siliciclásticas, cuja sedimentação é interpretada pela maioria dos autores como continental (e. g., CAPUTO, 1984; DINO *et al.*, 1999; MENDES *et al.*, 2012). Esta unidade é considerada pobre em registros de fósseis corpóreos, porém, em contrapartida, registros de icnofósseis são relativamente comuns.

Nesse contexto, ainda que estes registros sejam representativos, muitos destes icnofósseis ainda não foram objeto de estudos paleontológicos de cunho sistemático ou icnotaxonômico e, por isso, são em geral referenciados como bioturbações, particularmente as estruturas de natureza tubular (e. g., HORBE *et al.*, 2006; FRANZINELLI & IGREJA, 2011; SARGES, 2007). Outros, apesar de reconhecidos como icnofósseis, são identificados apenas em categorias genéricas (e. g., moldes, marcas de raízes, paleotocas, entre outros), sem um posicionamento formal e sem qualquer referência ao organismo gerador (e. g., PALMA, 2014; FRANZINELLI & IGREJA, 2011; HORBE *et al.*, 2006; MENDES *et al.*, 2012; VIEIRA, 2002; FRANZINELLI & IGREJA, 2011).

Mesmo a nível de icnogênero, são pouco os trabalhos com este enfoque, destacando-se as contribuições de Nogueira *et al.* (1999), que identificaram os icnogêneros *Scoyenia*, *Skolithos* e *Muensteria* em afloramentos cretáceos na região do município de Presidente Figueiredo, AM; Rossetti & Neto (2006) que identificaram os icnogêneros *Thalassinoides*, *Planolites* e *Diplocraterion* em afloramentos cretáceos da margem esquerda do Rio Amazonas, próximo ao município de Careiro da Várzea, AM; Abinader (2008) que identificou os icnogêneros *Thalassinoides* e *Taenidium* em afloramentos cretáceos e neógenos da margem esquerda do Rio Solimões, próximos aos municípios de Manacapuru e Iranduba, AM.

Particularmente no afloramento Ponta das Lajes, Manaus-AM, há quatro registros de icnofósseis na literatura, nos quais foram citados a ocorrência de marcas de raiz (HORBE *et al.*, 2006; VIEIRA, 2002), paleotocas e tubos verticalizados (FRANZINELLI & IGREJA, 2011), crotovinas e moldes de raiz (PALMA, 2014). Como já comentado, nestes registros os icnofósseis foram identificados dentro de categorias ou tipos de icnofóssil, sem uma caracterização mais abrangente sobre a gênese destas estruturas.

Assim, considerando tanto a reconhecida escassez de fósseis corpóreos quanto o reduzido número de estudos icnotaxonômicos dos icnofósseis da Formação

Alter do Chão, neste trabalho foram realizadas análises desta natureza sobre 2 (duas) categorias de icnofósseis identificados e descritos nesta unidade no afloramento Ponta das Lajes, Manaus-AM – as **paleotocas** e os **rizólitos**.

Além da natural importância de estudos icnotaxômicos para a ampliação do registro paleontológico desta unidade e do Mesozoico da Bacia do Amazonas, sua realização vem de encontro à crescente aplicação dos icnofósseis em interpretações geológicas, principalmente as de caráter paleoambiental. Por isso, também foram desenvolvidos neste trabalho, levantamentos paleoecológico da icnoassociação e análises faciológicas das rochas que compõem o afloramento, cuja integração visou a inferência paleoambiental para a Formação Alter do Chão em Ponta das Lajes.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho voltou-se para o desenvolvimento de estudos icnotaxonômicos voltados à classificação de 2 (duas) categorias de icnofósseis previamente identificadas no afloramento Ponta das Lajes, Manaus-AM (Formação Alter do Chão, Cretáceo da Bacia do Amazonas), visando seu levantamento paleoecológico e seu emprego na interpretação paleoambiental da unidade na área de estudo. Nesse sentido, alguns objetivos específicos e etapas de trabalho foram desenvolvidos:

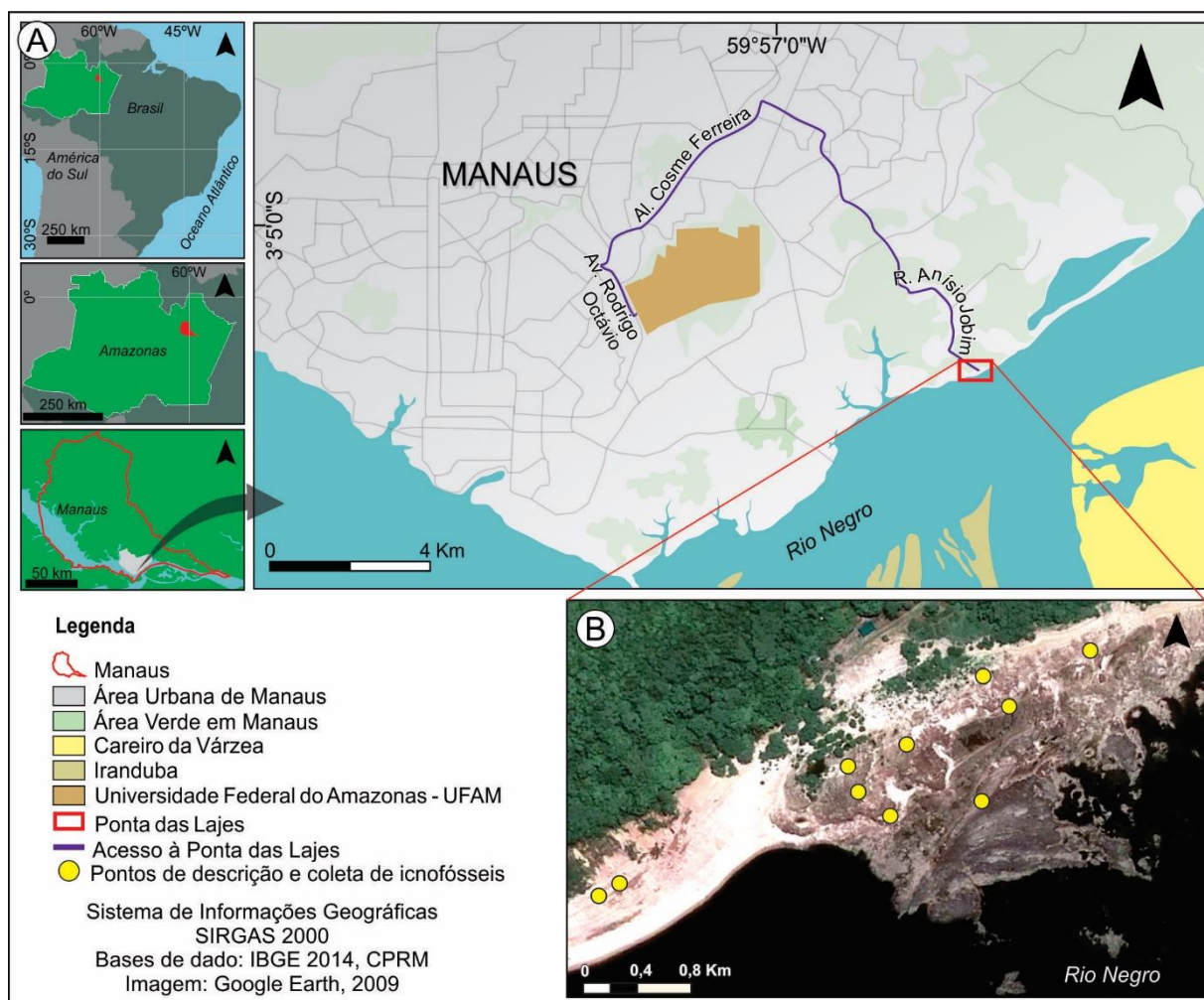
- Classificação dos icnofósseis identificados;
- Caracterização faciológica da sucessão sedimentar;
- Identificação dos organismos geradores e a gênese das estruturas;
- Paleoecologia dos icnofósseis classificados;
- Integração entre os dados paleontológicos e sedimentológicos; e
- Interpretação paleoambiental para a Formação Alter do Chão na área de estudo.

## 1.3 Localização da Área de Estudo

A área estudada corresponde a uma exposição de rochas sedimentares de natureza siliciclástica, localizada na margem esquerda do Rio Negro, próximo à zona de confluência com o Rio Solimões. Esta situa-se na zona leste da cidade de Manaus (AM) entre as coordenadas de latitude 03°06'42"S – 03°07'02"W e longitude 59°54'11"W – 59°54'26" W (Figura 1A) e ocupa uma área de aproximadamente 113.000 m<sup>2</sup>, estendendo-se por um perímetro de cerca de 1.800 m (FIGURA 1B).

O acesso à Ponta das Lajes pode ser feito tanto por via fluvial quanto terrestre, tendo sido neste estudo realizado por via terrestre, partindo da Universidade Federal

do Amazonas e seguindo pelas avenidas Cosme Ferreira e Desembargador Anísio Jobim (entrada pelo Instituto Soka), conforme o trajeto destacado na Figura 1A.



**Figura 1** – Mapas de localização da área de estudo. A) Mapa de localização da região de Manaus; com acesso à Ponta das Lajes, por via terrestre, a partir da UFAM; B) Detalhe para área de estudo, Ponta das Lajes, com pontos de descrição e amostragem de icnofósseis.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Para a realização deste estudo foram analisadas 25 (vinte e cinco) amostras de icnofósseis provenientes do afloramento Ponta das Lajes, Manaus (AM), distinguindo-se 9 amostras de paleotocas e 16 de rizólitos.

Em função do tipo de icnofóssil, do modo de preservação e das relações estratigráficas com a rocha hospedeira, a descrição dos exemplares foi realizada em campo e em 19 amostras coletadas em locais de intensa intemperização da rocha, cujos efeitos ou promoveram ou facilitaram a desagregação do material. Em relação ao material coletado, este encontra-se armazenado no Laboratório de Paleontologia do Departamento de Geociências da Universidade Federal do Amazonas (DEGEO/ICE/UFAM).

### 2.2 Métodos

No que se refere aos métodos empregados para a realização deste estudo, foram utilizadas diferentes técnicas de campo e de laboratório, as quais serão abordadas a seguir no escopo da discriminação das etapas de trabalho:

#### 2.2.1 Trabalhos de campo

Foram realizadas 3 (três) visitas a área de estudo, as quais se destinaram à caracterização geológica da área por meio do levantamento e da aquisição de dados estratigráficos e paleontológicos. Este levantamento envolveu, essencialmente, o reconhecimento de fácies sedimentares, a descrição e coleta de icnofósseis e a elaboração de uma seção colunar.

Em síntese, os métodos empregados nestas atividades compreenderam o georreferenciamento dos pontos de descrição e amostragem por meio da utilização de um GPS de modelo *Garmin eTrex Venture HC* e o emprego de critérios faciológicos, estratigráficos e paleontológicos de aferição e descrição morfológica para os icnofósseis levantados na literatura, distinguindo-se entre estes geometria e forma, estruturas e estruturação, entre outros.

**a) Reconhecimento das fácies sedimentares na área de estudo:** Foi desenvolvido com base no conceito e na caracterização de fácies estabelecido por Walker (1992), que engloba descrição litológica, geometria, textura, estruturas sedimentares, padrão de paleocorrentes e conteúdo fossilífero do corpo sedimentar. Para a codificação de fácies a proposta adotada foi a de Miall (1977a), na qual a

primeira letra é maiúscula e indica a litologia principal e as seguintes são minúsculas e indicam as principais estruturas observadas (sedimentares e biogênicas).

Além disso, durante esta etapa foram feitos os registros fotográficos das principais feições associadas às fácies identificadas, como detalhes de estruturas sedimentares, relações de contatos litológicos e ocorrência de icnofósseis.

**b) Descrição e coleta de icnofósseis:** etapa voltada à aferição e descrição morfológica dos icnofósseis, a aquisição de fotos (geral e detalhe) e, quando possível, à coleta de icnofósseis para descrição em laboratório. Considerando as categorias de icnofósseis identificadas, a descrição do material obedeceu aos métodos abaixo discriminados:

**Descrição morfológica das paleotocas** – seguiu critérios adotados por diferentes autores, particularmente relacionados a paleotocas produzidas por vertebrados (e. g., BORDY & KRUMMECK, 2016; DENTZIEN-DIAS *et al.*, 2012; HASIOTIS *et al.*, 2007; LUCAS *et al.*, 2006; MARSHALL & RODGERS, 2012), os quais incluem a caracterização de aspectos como:

- *Arquitetura*: consiste na configuração pela qual as partes da estrutura estão dispostas tridimensionalmente no substrato. No caso de paleotocas, a arquitetura pode ser simples (tocas individualizadas) ou complexa (tocas interconectadas em forma de redes) e apresentar eixos inclinados ou espiralados;

- *Forma*: consiste no aspecto geométrico ao longo da estrutura, variando de cilíndrica a subcilíndrica em função da presença de câmaras;

- *Orientação*: corresponde à relação do eixo principal da toca com o substrato, se horizontal, sub-horizontal, vertical ou sub vertical;

- *Comprimento*: extensão da toca preservada no substrato, a partir da base;

- *Diâmetro*: medida da paleotoca em seção transversal ao longo da estrutura (diâmetro mínimo, máximo e médio);

- *Seção transversal*: compreende o contorno observado em seção transversal, no caso dos vertebrados, em geral varia de circulares a elipsoides;

- *Câmara*: refere-se a uma expansão oval ou redonda que pode estar presente ou não em porções medianas ou ao final da toca (câmara terminal).

**Descrição dos rizólitos** – também seguiu critérios propostos por diferentes autores, particularmente aqueles destinados aos traços atribuídos a marcas de raiz (e. g., KLAPPA, 1980; KRAUS & HASIOTIS, 2006; NASCIMENTO *et al.*, 2017a), destacando-se os seguintes caracteres morfoestruturais:



- *Forma*: consiste no aspecto geométrico ao longo da estrutura, que no caso dos rizólitos é comumente cilíndrica;

- *Tamanho*: o comprimento ao longo do eixo principal, que em rizólitos varia de poucos centímetros a vários metros;

- *Diâmetro*: medida do rizólito em seção transversal, com gradual diminuição em direção à terminação, seja do eixo principal ou de ramificações;

- *Seção transversal*: consiste no contorno observado em seção transversal, geralmente circular;

- *Ramificação*: correspondem a subdivisões a partir de um eixo, e que podem ser do tipo bifurcada ou em trama, podendo haver segunda, terceira e quarta ordem de ramificação;

- *Estruturas internas*: a presença de material residual da raiz fornece um critério inequívoco para o reconhecimento de rizólitos, entretanto são mais facilmente reconhecidas quando analisadas em microscópio.

Deve-se ressaltar ainda que a descrição morfológica de ambas as categorias envolveu medição das dimensões, detalhamento de formas e feições, confecção de desenhos esquemáticos e registros fotográficos. Nesse sentido, o reconhecimento dos caracteres morfológicos acima listados baseou-se em comparações com descrições e ilustrações obtidas em trabalhos científicos direcionados a icnotaxonomia tanto de paleotocas quanto de rizólitos.

Para a coleta de fragmentos de rizólitos e de paleotocas foram utilizados espátulas e martelo. Após a coleta, os exemplares foram embalados em papel toalha e acondicionados em sacos plásticos etiquetados com a numeração da amostra, o local da coleta e seu posicionamento geográfico.

**c) Elaboração do perfil colunar:** baseou-se no modelo de Miall (1990), na qual as fácies são representadas graficamente com ilustrações características do afloramento, como natureza e espessura dos litótipos, relação de contato entre as camadas, reconhecimento de estruturas sedimentares e/ou biogênicas e padrão de paleocorrentes.

### 2.2.2 Trabalho em laboratório

Nesta fase, foram realizadas atividades voltadas às interpretações faciológicas e, principalmente, para o aprimoramento da descrição dos icnofósseis coletados. Foi desenvolvida no Laboratório de Paleontologia do Departamento de Geociências da Universidade Federal do Amazonas (DEGEO/ICE/UFAM), e envolveu:

**a) Descrição de amostras coletadas:** esta etapa foi direcionada para a descrição minuciosa dos fragmentos de paleotocas e rizólitos coletados durante o trabalho de campo, tendo a descrição seguido os métodos utilizados no item 2.2.1, fundamentados na medição e caracterização morfológica destes exemplares. Além disso, foram obtidas fotos de detalhes dos exemplares por meio de uma câmera profissional Canon modelo EOS Rebel T5i e elaborados desenhos ilustrativos, posteriormente editados no CorelDRAW X8.

**b) Classificação dos icnofósseis:** considerando a preservação e a natureza dos icnofósseis identificados, foram elencados e analisados modelos de classificação que melhor se aplicassem aos icnofósseis identificados. Assim, para os rizólitos, foi utilizada a classificação de tipos de rizólitos proposta por Klappa (1980) e para as paleotocas foi adotada a Classificação Biológica Filogenética, conforme a proposta de Rindsberg (2012).

Segundo Klappa (1980), rizólito é um termo genérico que designa todos os vestígios fósseis de raízes, mesmo que o material vegetal original possa estar preservado dentro da estrutura e sua classificação baseia-se em aspectos morfológicos e na gênese destas estruturas, a partir dos quais distinguem-se 5 (cinco) tipos de rizólitos: moldes, contramoldes, túbulos, rizoconcreções e petrificações de raiz.

Os **moldes** correspondem ao espaço vazio deixado por uma raiz deteriorada; os **contramoldes** ao sedimento ou cimento que preenche o molde; os **túbulos** a cilindros cimentados em torno da rizosfera que podem ser preenchidos posteriormente com sedimentos; as **rizoconcreções** aos minerais que se acumulam como concreções ou nódulos ao redor de uma raiz viva ou morta; e as **petrificação de raiz** ao produto gerado pela substituição, impregnação, incrustação e preenchimento de matéria orgânica por matéria mineral, sem perda total das características anatômicas da raiz.

Por sua vez, paleotocas correspondem a escavações usadas para habitação, refúgio ou estivação por diferentes animais (*vide* HASIOTIS *et al.*, 2007 e SIMPSON, 1975) e, embora sua classificação possa seguir diferentes propostas, a **Classificação Biológica Filogenética** foi a que melhor se adequou aos resultados obtidos por poder, de acordo com Rindsberg (2012), ser usada no tratamento de praticamente todos os vestígios modernos, pois a designação da natureza do vestígio antecede a do organismo que o gerou (*e. g.*, coprólito de *Tyrannosaurus rex* ou simplesmente coprólito de Dinosauria).

Em outras palavras, a classificação inicia com a caracterização da natureza do vestígio (*e. g.*, pista, pegada, toca, coprólito, molde de folha, molde de raiz, entre outros), seguida da identificação do organismo que o gerou, se possível referenciado dentro de uma categoria taxonômica formal (*e. g.*, espécie, gênero, família, ordem, classe, filo).

Consequentemente, tanto para a classificação do tipo de vestígio quanto do organismo produtor, além da análise morfológica da estrutura e de sua comparação com estruturas semelhantes levantadas na literatura especializada, também se faz necessário um levantamento de hábitos, habitats e outros aspectos comportamentais de possíveis organismos produtores.

Assim, neste estudo a caracterização e a classificação das paleotocas envolveu um amplo levantamento bibliográfico visando, entre outros aspectos: a obtenção do registro geográfico deste tipo de icnofóssil; a análise e o reconhecimento de feições diagnósticas para tocas geradas por diferentes produtores; e a identificação de possíveis organismos geradores e dos mecanismos e/ou indutores ecológicos para a condição de escavador.

A partir da obtenção destas informações e tendo como objetivo sua sumarização, foi elaborada uma tabela com registros de ocorrências de tocas interpretadas como afins às analisadas neste estudo, contendo seus respectivos produtores, os níveis estratigráficos em que ocorrem, um rol de caracteres entendidos como diagnósticos para sua caracterização e identificação, e ilustrações representativas que possam ser empregadas em comparações.

**c) Associação de fácies e sistemas deposicionais:** o método de associação de fácies adotado seguiu a proposta de Walker (1992), a partir do qual foram agrupadas diferentes fácies contemporâneas e cogenéticas, com diferentes padrões de empilhamento, geometria e posição relativa dentro da sequência.

A partir da análise da associação de fácies, foram propostos os sistemas deposicionais que, conforme conceituado por Fisher & McGowen (1967), caracterizam-se como assembleias de fácies tridimensionais que registram os processos sedimentares. A partir da interpretação dos sistemas deposicionais, foi possível reconstituir o paleoambiente deposicional, o qual Holz (2012) se refere como o local geográfico no qual os sedimentos se depositaram.

**d) Levantamento paleoecológico:** direcionado à obtenção (por meio de livros, artigos em periódicos, dissertações e teses) do máximo de informações sobre

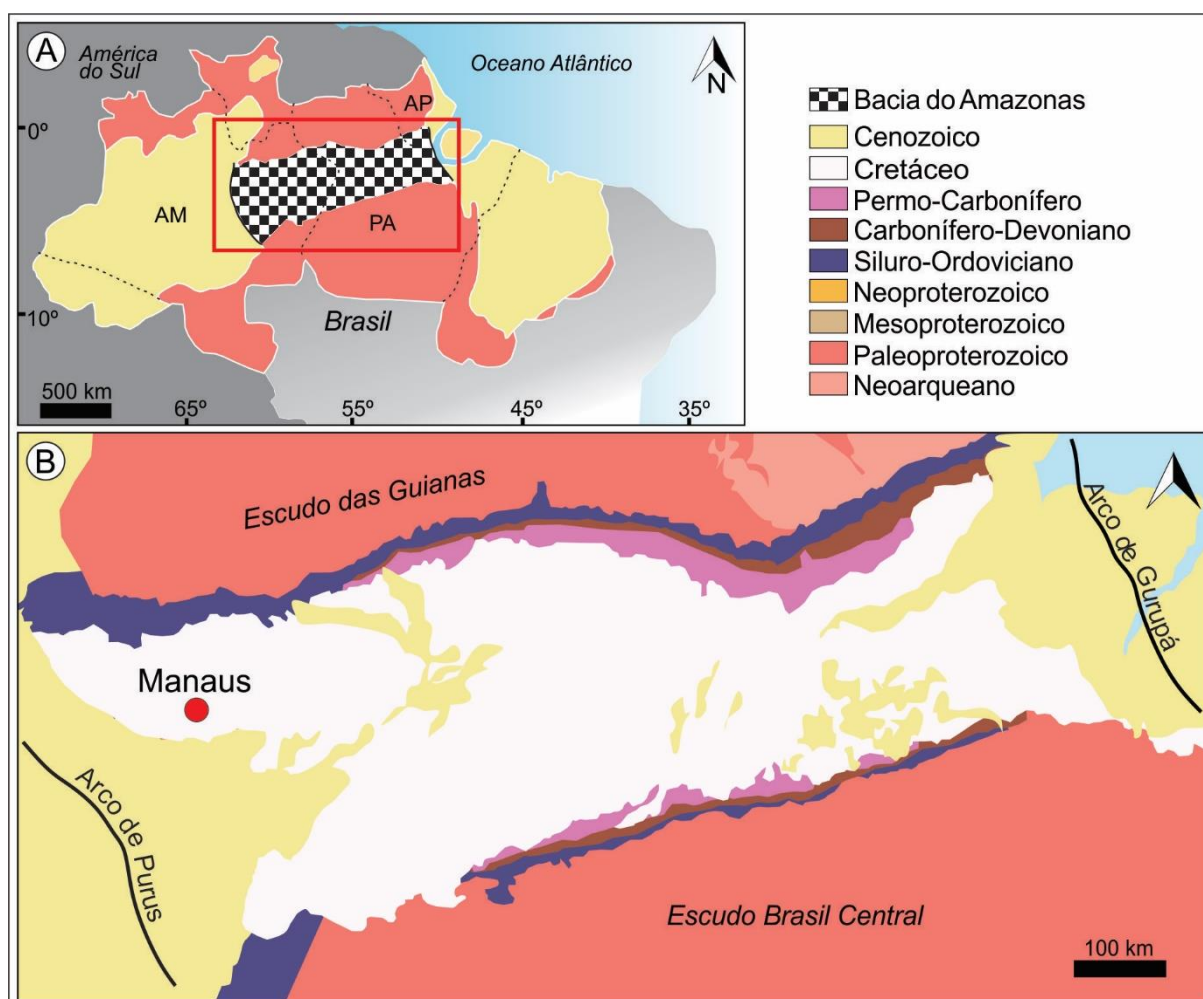
as preferências ecológicas do organismo associado ao icnofóssil em estudo (quando do seu conhecimento) ou, mais comumente, a identificação de caracteres morfofuncionais que possam ser associados a mecanismos e/ou processos metabólicos e a modos de vida (*e. g.*, locomoção, alimentação e hábitos, entre outros).

Foi primeiramente voltado ao levantamento do registro e do significado paleoecológico de fósseis corpóreos atribuídos a animais de hábito fossorial mesozoicos (*e. g.*, CARLSON, 1968; CAVIN *et al.*, 2007; HASIOTIS *et al.*, 2007), seguido, quando possível, do estabelecimento de correlações ecológicas destes organismos com representantes atuais a partir de novos levantamentos bibliográficos, agora voltados aos hábitos ecológicos observados em organismos modernos (*e. g.*, BEDATOU *et al.*, 2008; CARLSON, 1968; HASIOTIS *et al.*, 1993; HEMBREE, 2010; LIEM, 1986; LOOPE, 2006; MILLER *et al.*, 2001).

### 3 CONTEXTO GEOLÓGICO

#### 3.1 Caracterização Geológica da Bacia do Amazonas

A Bacia do Amazonas é considerada do tipo intracratônica, com uma extensão de aproximadamente 515.000 km<sup>2</sup> e abrange partes dos estados do Pará, Amazonas e Amapá (FIGURA 2). Inserida no Cráton Amazônico (CUNHA *et al.*, 2007), a bacia apresenta uma configuração alongada no sentido WSW-ENE (WANDERLEY FILHO *et al.*, 2005), tendo como limites o Escudo das Guianas (Norte), o Escudo Brasil Central (Sul), o Arco de Gurupá (Leste) que a separa da Bacia do Marajó e o Arco de Purus (Oeste) que a separa da Bacia do Solimões (CUNHA *et al.*, 2007).



**Figura 2** – Bacia Sedimentar do Amazonas. A) Localização geográfica da Bacia do Amazonas; B) Limites geológicos e sequências sedimentares da Bacia do Amazonas (Modificado de WANDERLEY FILHO *et al.*, 2005).

O embasamento da Bacia do Amazonas é representado pelo Cráton Amazônico, uma unidade geotectônica de comportamento estável durante o Neoproterozoico, de idade e evolução pré-brasiliana, tendo, desta forma, sua instalação associada a eventos distensivos relacionados aos esforços finais durante

o fechamento do Ciclo Brasileiro, conforme proposto por Cordani *et al.* (2009), Cunha *et al.* (2007) e Hasui *et al.* (2012).

As unidades sedimentares anteriores à efetiva implantação da sinéclise na bacia, segundo Cunha *et al.* (2007), são constituídas pelas rochas neoproterozoicas do Grupo Purus, que reúne as formações Prosperança (arenitos fluviais e aluviais) e Acari (carbonatos de planície de maré).

O preenchimento sedimentar fanerozoico da Bacia do Amazonas (FIGURA 3) atinge entre 5000 e 6000 m de espessura em seu depocentro (MATSUDA *et al.*, 2010) e foi dividido por Cunha *et al.* (2007) em duas megasequências de primeira ordem: Megasequência Paleozoica e Megasequência Mesozoica-Cenozoica.

A **Megasequência Paleozoica** é constituída por uma associação de rochas sedimentares de natureza variada, associadas a um grande volume de intrusões de diques e soleiras de diabásio do Mesozoico, subdividindo-se em quatro sequências de segunda ordem depositadas em ciclos transgressivo-regressivos, de acordo com Cunha *et al.* (2007) e Matsuda *et al.* (2010):

- **Ordovício-Devoniana**: corresponde ao início do preenchimento na bacia, composta por sedimentos marinhos e glaciais representados pelo Grupo Trombetas (MATSUDA *et al.*, 2010). O Grupo Trombetas reúne as formações Autás Mirim (arenitos e folhelhos neríticos), Nhamundá (arenitos neríticos e depósitos glaciogênicos), Pitinga (folhelhos marinhos), Manacapuru (arenitos e pelitos neríticos e litorâneos) e Jatapu (arenitos e siltitos marinhos parálicos).

- **Devono-Tournaisiana**: o preenchimento segue composto por sedimentos marinhos e glaciais representados pelos grupos Urupadi e Curuá. O Grupo Urupadi reúne as formações Maecuru (arenitos e pelitos neríticos deltaicos) e Ererê (siltitos, folhelhos e arenitos neríticos deltaicos), enquanto o Grupo Curuá reúne as formações Barreirinha (folhelhos negros de ambiente marinho distal), Curiri (diamictitos, folhelhos e siltitos glaciais a periglaciais) e Oriximiná (diamictitos, arenitos e pelitos fluviais).

- **Neoviseana**: o preenchimento, nesta sequência, é caracterizado por uma sedimentação marinha subordinada e é representado isoladamente pela Formação Faro, composto por arenitos flúvio-deltaicos e litorâneos com influência de tempestades (CUNHA *et al.*, 2007) e diamictitos glaciais (CAPUTO *et al.*, 2008).

- **Pensilvaniano-Permiana**: corresponde à sedimentação continental e marinha do Grupo Tapajós, que reúne as formações Monte Alegre (arenitos eólicos intercalados com siltitos e folhelhos de interdunas e lagos de ambiente desértico a marinho raso), Itaituba (folhelhos, carbonatos e anidritas de fácies lagunar e marinho

rasa/inframaré), Nova Olinda (calcários e evaporitos de inframaré e planícies de *sabkha*) e a Formação Andirá (siltitos, arenitos e folhelhos avermelhados do ambiente continental fluvial-lacustre), que encerra a Megassequência Paleozoica.

Após o encerramento da Megassequência Paleozoica, a atuação de esforços compressivos associados ao Diastrofismo Juruá, reativando fraturas pré-existentes, ocasionou um relaxamento tectônico. E com o retorno da fase de sinéclise da bacia, a Megassequência Meso-Cenozoica foi depositada, como proposto em Cunha *et al.* (2007).

A **Megassequência Mesozoico-Cenozoica** agrupa as rochas sedimentares clásticas pertencentes ao Grupo Javari (Figura 3), constituído pela Formação Alter do Chão (arenitos e pelitos intercalados com conglomerados depositados em ambiente fluvial-deltaico-lacustre), na qual está inserida a área de estudo. Além disso, Cunha *et al.* (2007) inclui na Carta Estratigráfica da Bacia do Amazonas, como representantes do Cenozoico, as formações Marajó (arenitos e argilitos flúvio-deltáicos do paleoceno/eoceno) e Solimões (pelitos flúvio-lacustres do mioceno/plioceno). No entanto, essas unidades estão associadas a estratigrafia das bacias do Marajó e do Solimões, respectivamente.

O reconhecimento de unidades Cenozoicas na Bacia do Amazonas é alvo de distintos estudos estratigráficos e faciológicos (*e. g.* ROZO, 2004; ROZO *et al.*, 2005; SOARES, 2007; SOARES *et al.*, 2016), os quais identificaram depósitos pós-Cretáceo denominados de “Formação Novo Remanso” (arenitos e, subordinadamente, conglomerados e pelitos relacionados a um ambiente fluvial meandrante). Como até o presente não há registro no léxico estratigráfico desta unidade, sua identificação ainda não foi formalizada.

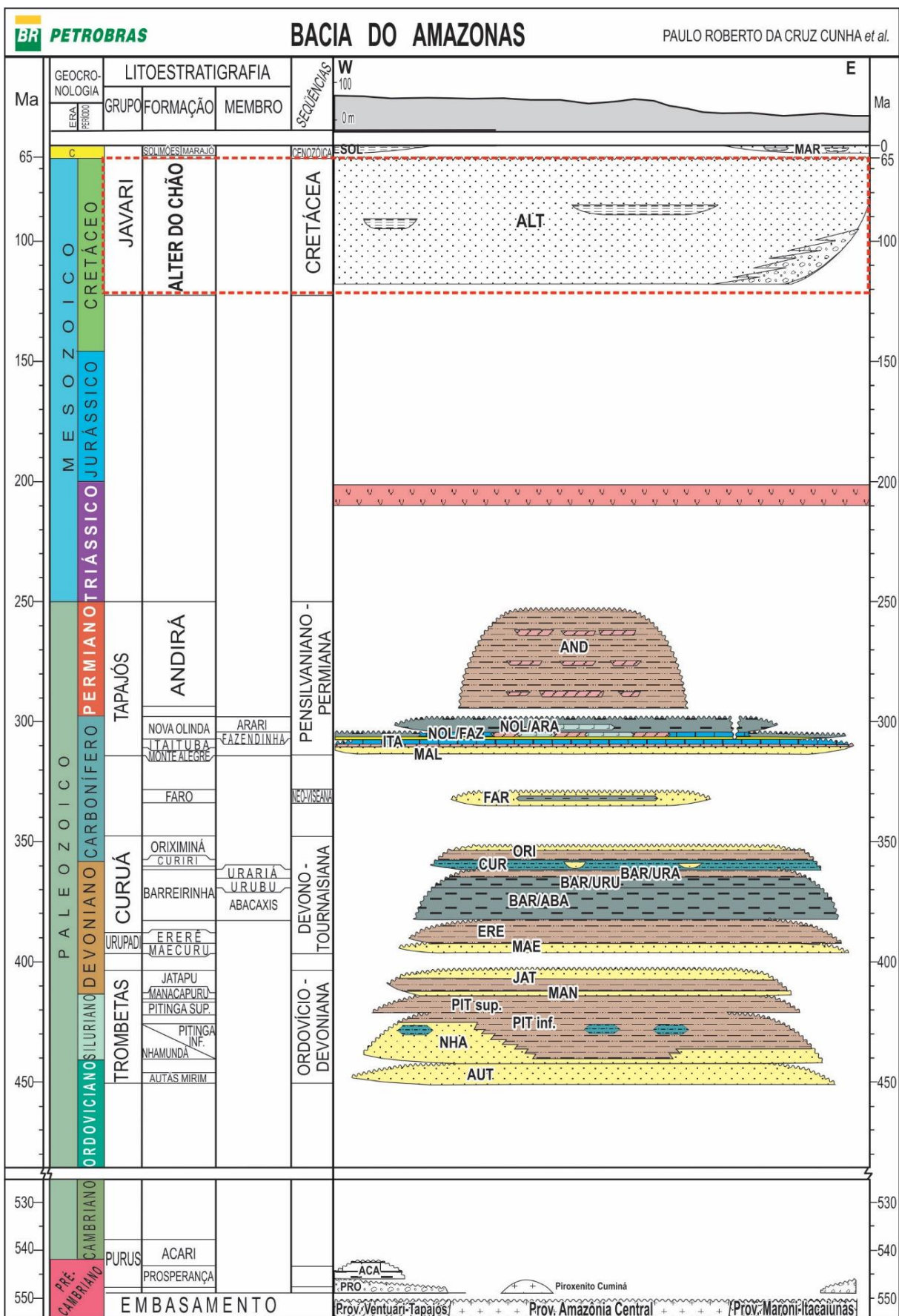


Figura 3 – Carta Estratigráfica da Bacia do Amazonas, com destaque para a Formação Alter do Chão, unidade de enfoque deste estudo (Modificada de CUNHA et al., 2007).



### 3.2 Caracterização Geológica da Formação Alter do Chão

A Formação Alter do Chão, objeto deste estudo, foi assim denominada em 1954 por Kistler (*apud* MENDES *et al.*, 2012), para descrever uma sucessão sedimentar pós-paleozoica da Bacia do Amazonas compostas de arenitos avermelhados, argilitos, conglomerados e brechas intraformacionais, tradicionalmente atribuídos a sistemas fluvial e lacustre/deltaico (DAEMON, 1975).

De acordo com sua seção-tipo, localizada na margem direita do rio Tapajós (poço 1-AC-1-PA), próximo à vila de Alter do Chão-PA, Caputo *et al.* (1972) estimaram uma espessura média de 300 m para esta unidade, podendo atingir até 600 m na região do depocentro da bacia. Distribui-se por toda a Bacia do Amazonas, estendendo-se e adentrando na Bacia do Solimões, na qual mantém a mesma denominação.

Seu contato com as unidades paleozoicas subjacentes é discordante, marcado por uma discordância regional referida por Cunha *et al.* (2007) como discordância pré-cretácea. O contato sobrejacente ainda é objeto de discussão na literatura, tendo Abinader (2008) e Soares *et al.* (2016) proposto um contato superior discordante e marcado por superfícies erosivas ou crosta laterítica bem desenvolvida.

A Formação Alter do Chão é constituída, predominantemente, por arenitos, intercalados com argilitos e siltitos e subordinadamente conglomerados avermelhados, e, conforme descrito por Daemon (1975), Caputo (1972) e Souza & Nogueira (2009), há escassos registros fósseis.

Particularmente na região de Manaus, Albuquerque (1922, *apud* CAPUTO *et al.*, 1972) identificou arenitos, siltitos e argilitos silicificados e ferruginosos, denominados informalmente de “Arenito Manaus”, que compõem diferentes níveis de ocorrência e formam corpos lenticulares, não sendo possível, portanto, mapeá-los formalmente como uma formação, conforme discutido em Caputo *et al.* (1972) e Caputo (2011).

Ao longo da Formação Alter do Chão, estudos voltados às análises sedimentológicas e faciológicas em distintas sucessões de rochas associadas à esta unidade identificaram que as principais litofácies são representadas por Conglomerado maciço (MENDES, 2015; MENDES *et al.*, 2012; PALMA, 2014; SILVA *et al.*, 2015; TAVARES *et al.*, 2017), Arenito com estratificação cruzada acanalada (FRANZINELLI & IGREJA, 2011; KUNIFOSHITA *et al.*, 2017; MENDES, 2015; MENDES *et al.*, 2012; PALMA, 2014; SILVA *et al.*, 2015; TAVARES *et al.*, 2017; VIEIRA, 2002), Arenito com estratificação cruzada tabular (FRANZINELLI & IGREJA,

2011; KUNIFOSHITA *et al.*, 2017; MENDES, 2015; MENDES *et al.*, 2012; PALMA, 2014; SILVA *et al.*, 2015; TAVARES *et al.*, 2017), Arenito maciço (MENDES, 2015; PALMA, 2014; ROSSETTI & NETTO, 2006; SILVA & MENDES, 2017; TAVARES *et al.*, 2017; VIEIRA, 2002); Pelito bioturbado (PALMA, 2014; ROSSETTI & NETTO, 2006; MENDES, 2015; MENDES *et al.*, 2012).

Com relação à idade da Formação Alter do Chão (TABELA 1), uma idade Cretácea foi sugerida primeiramente por Price (1960), com base na ocorrência de um dente de dinossauro da Classe Theropoda na porção superior desta unidade.

Posteriormente, resultados obtidos por Daemon (1975) a partir de análises palinológicas de rochas desta unidade indicaram que o início da deposição da Formação Alter do Chão provavelmente ocorreu entre o Meso-Albiano e o Neo-Albiano (Eocretáceo), estendendo-se pelo Cenomaniano e Turoniano (Mesocretáceo).

Resultados semelhantes foram obtidos por Dino *et al.* (1999), os quais a partir de análises estratigráficas e palinológicas, obtiveram idades do Aptiano para sequência inferior desta unidade e Cenomaniano para a sequência superior.

Apesar de grande parte dos autores concordarem que a Formação Alter do Chão tenha se depositado durante o Cretáceo, para Caputo (2011), a Formação Alter do Chão corresponde a uma unidade cenozoica que recobre uma unidade cretácea, proposto com base na revisão de análises palinológicas e sísmicas, as quais o autor considera terem sido erroneamente empregadas para a atribuição da idade da Formação Alter do Chão. Assim, o Cretáceo corresponde a “Formação Jazida da Fazendinha”, considerada uma unidade informal em função de seus limites estratigráficos não serem bem definidos e não possuir registro no léxico estratigráfico.

**Tabela 1** – Resumo das principais propostas de idades para a Formação Alter do Chão, fundamentadas em ocorrência de fósseis, palinologia, faciologia, paleobotânica e geofísica.

<b>Idade</b>	<b>Fundamentação</b>	<b>Referência</b>
<i>Cretáceo</i>	Identificação de fóssil de dinossauro da classe Theropoda	Price (1960)
<i>Eo-Cenomaniano/ Maastrichtiano</i>	Análises palinológicas	Daemon & Contreiras (1971)
<i>Meso-Albiano/ Turoniano</i>	Análises palinológicas	Daemon (1975)
<i>Cenomaniano (seq. Superior)</i> <i>Aptiano (seq. Inferior)</i>	Análises faciológicas e palinológicas	Dino <i>et al.</i> (1999)
<i>Cenozoico</i>	Análises paleobotânicas, palinológicas e geofísicas	Caputo (2011)

No que se refere aos paleoambientes deposicionais propostos para a Formação Alter do Chão (TABELA 2), Dino *et al.* (1999), baseados em análises sedimentológicas e palinológicas, reconheceram duas sequências sedimentares representativas de dois ambientes deposicionais para a Formação Alter do Chão: **i)** sequência inferior, caracterizada por influxo de terrígenos associados a um sistema fluvial meandrante que evolui para um sistema anastomosado, com retrabalhamento eólico; e **ii)** sequência superior, composta por ciclos progracionais flúvio-deltáicos lacustre.

Fundamentada em análises morfológicas, mineralógicas e químicas de perfis em arenitos pelíticos provenientes de afloramentos na região de Manaus e nos km 10 e 110 da rodovia BR-174, AM, Vieira (2002) sugeriu o desenvolvimento de paleossolos em depósitos de planície de inundação dentro de um sistema fluvial entrelaçado.

A partir de análises sedimentológicas e petrográficas realizadas em rochas siliciclásticas de afloramentos em Manaus (Praia da Ponta Negra) e no km 14 da rodovia BR-174, AM, Nogueira *et al.* (2003) interpretaram que níveis silicificados da Formação Alter do Chão, nas áreas de estudo, estão associados a depósitos de rios entrelaçados. Estes depósitos correspondem a planícies entrelaçadas e lagos sujeitos a variação sazonal quente e úmida.

Análises geoquímicas combinadas a dados sedimentológicos e mineralógicos em camadas vermelhas de arenitos e pelitos friáveis ou silicificados provenientes da região de Manaus e Presidente Figueiredo, AM, permitiram a Horbe *et al.* (2006) identificar depósitos de planícies e rios entrelaçados, formados sob condições de clima seco a úmido.

Por meio de análises faciológicas em rochas da Formação Alter do Chão na região de Óbidos, PA, Mendes *et al.* (2012), identificaram duas associações de fácies interpretadas como representativas de preenchimento de canal e depósitos externos ao canal, as quais permitiram a caracterização de um sistema fluvial de padrão meandrante com variação de sinuosidade e carga mista (*mixed-load*) para a unidade.

Embasada em análises faciológicas e pedogenéticas de escala micro e macroscópicas em rochas da Formação Alter do Chão na região de Manaus, Palma (2014) interpretou duas associações de fácies como representativas de depósitos de canal e planície de inundação em um sistema fluvial entrelaçado, no qual houve desenvolvimento de paleossolos, durante sazonalidade climática com períodos úmidos e secos.

A partir de análises integradas de sedimentologia, estratigrafia, icnologia e petrografia, além de datação por U-Pb de grãos de zircão, de rochas da Formação Alter do Chão em afloramentos entre as cidades de Manaus, AM, e Santarém, PA, Mendes (2015) propôs um modelo fluvial considerando um sistema meandrante na porção centro-oriental da Bacia do Amazonas, que varia lateralmente, em direção à porção mais ocidental da Bacia, para um estilo anastomosado com predomínio de grandes áreas de inundação.

Embora a grande maioria dos trabalhos desenvolvidos sobre esta unidade apontem para sistemas deposicionais continentais, Rossetti & Neto (2006), com base em análises sedimentológicas e icnológicas em afloramentos ao longo da margem esquerda do Rio Amazonas, na região do Careiro da Várzea, sugerem um sistema deltaico, dominado por ondas e com influência marinha. As autoras justificam este ambiente fundamentadas na predominância de estruturas sedimentares geradas por ondas e em uma suíte de *Thalassinoides*, que são reconhecidos como icnofósseis registrados mais comumente em ambientes marinhos.

**Tabela 2** – Resumo das principais propostas de paleoambiente deposicional para a Formação Alter do Chão, fundamentadas em análises faciológicas, sedimentológicas, paleontológicas, pedogenéticas e geoquímicas.

<b>Paleoambiente deposicional</b>	<b>Fundamentação</b>	<b>Referência</b>
<i>Sistema fluvial meandrante que evolui para sistema anastomosado (seq. Inferior) Sistema flúvio-deltáico lacustre (seq. Superior)</i>	Análises sedimentológicas e palinológicas	Dino <i>et al.</i> (1999)
<i>Depósitos de canal e planície de inundação em um sistema fluvial entrelaçado</i>	Análises morfológicas, mineralógicas e químicas	Vieira (2002)
<i>Planícies entrelaçadas e lagos sujeitos a variação sazonal quente e úmida</i>	Análises sedimentológicas e petrográficas	Nogueira <i>et al.</i> (2003)
<i>Depósitos de planícies e rios entrelaçado</i>	Análises geoquímicas combinadas a dados sedimentológicos e mineralógicos	Horbe <i>et al.</i> (2006)
<i>Sistema deltaico, dominado por ondas e com influência marinha</i>	Análises sedimentológicas e icnológicas	Rossetti & Netto (2006)
<i>Sistema fluvial de padrão meandrante</i>	Análises faciológicas e palinológicas	Mendes <i>et al.</i> (2012)
<i>Depósitos de canal e planície de inundação em um sistema fluvial entrelaçado</i>	Análises faciológicas e pedogenéticas de escala micro e macroscópicas	Palma (2014)
<i>Sistema fluvial meandrante que evolui para sistema anastomosado</i>	Análises sedimentológicas, estratigráficas, icnológicas e petrográficas	Mendes (2015)

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Por se tratar de um trabalho voltado principalmente para a estudos icnológicos, serão abordados neste capítulo fundamentos empregados em icnologia que se destinam a classificação de icnofósseis e ao levantamento paleoecológico de icnoassociações.

### 4.1 Icnologia

De acordo com Frey (1975), a Icnologia compreende o estudo de todos os tipos de escavações, ranhuras e traços feitos por organismos vivos ou extintos. Levando em consideração o meio em que são gerados estes icnofósseis, Fernandes *et al.* (2007) definem a Icnologia como o estudo de vestígios de atividade orgânica dentro ou sobre um determinado substrato, não necessariamente sedimentar, estando incluídos aqueles que reflitam qualquer tipo de comportamento e metabolismo. Nesse contexto, Ribeiro (2001) afirma que os objetos de estudo da Icnologia englobam tanto as estruturas de bioturbação (*e. g.*, escavação e substrato não litificado), quanto de bioestratificação (*e. g.*, estromatólitos e tapetes algáicos) e de bioerosão (perfurações em substratos litificados), além de vestígios orgânicos de outras naturezas (*e. g.*, pelotas fecais, coprólitos, ninhos, ovos e outras feições geradas por organismos vivos).

Conforme elucidado por Figueiredo Souto *et al.* (2017), entre algumas das principais contribuições do estudo de icnofósseis estão:

- a) Possibilitar o registro da presença de organismos de corpo mole que geralmente não são preservados;
- b) Mostrar a diversidade de comportamento das associações fossilíferas;
- c) Auxiliar nas interpretações paleoecológicas e paleoambientais, uma vez que não sofrem reelaboração, ou seja, não podem ser reproduzidos;
- d) Possibilitar a inferência de topo e base em estratos de rocha;
- e) Fornecer informações sobre o grau dos retrabalhamentos de origem biogênica.

No que se refere a utilização e aplicação dos icnofósseis em investigações de cunho geológico, distintos autores apontam algumas vantagens do grupo em relação aos fósseis corpóreos, entre as quais citam:

- a) Longo intervalo temporal (SEILACHER, 1964), o que para Figueiredo Souto *et al.* (2017) é um elemento que facilita as comparações paleoecológicas em rochas com diferentes idades de formação;

- b) Estreita variação de fácies (SEILACHER, 1964), o que na concepção de Figueiredo Souto *et al.* (2017), conduz à formação de traço-fósseis semelhantes através de longos intervalos de tempo, em resposta a determinados parâmetros ecológicos;
- c) Evidenciam vários aspectos comportamentais, ecológicos e sedimentológicos que fósseis corpóreos não conseguem como, por exemplo, o sentido do movimento do organismo (FREY, 1975);
- d) São em geral representantes diretos de uma biocenose, já que na maioria das vezes ocorrem *in situ* (FERNANDES *et al.*, 2007).
- e) Ausência de deslocamento secundário, pois uma vez que são preservados *in situ*, possuem estreita relação com o ambiente em que foram produzidos, refletindo a biocenose original;
- f) São registrados com frequência em determinados tipos de rochas (*e. g.*, siltitos e arenitos) em que fósseis corpóreos são menos comuns ou quando presentes estão muitas vezes mal preservados (FERNANDES *et al.*, 2007);
- g) Em determinados grupos observa-se uma tendência de favorecimento da diagênese à visibilidade de caracteres morfológicos nos icnofósseis, enquanto nos fósseis corpóreos se observa o oposto, como indicado por Fernandes *et al.* (2007).

Este conjunto de características possui grande utilidade no levantamento de aspectos paleoecológicos e assumem, conseqüentemente, um importante papel na interpretação e reconstrução de ambientes de sedimentação pretéritos. O que por sua vez, na opinião de Figueiredo Souto *et al.* (2017), pode auxiliar no estabelecimento de fundamentos para estudos estratigráficos, sedimentológicos e tafonômicos.

## 4.2 Classificação de Icnofósseis

Embora a Icnologia englobe o estudo de vestígios de todas as naturezas, a Icnotaxonomia *strito sensu* segue as normas do Código Internacional de Nomenclatura Zoológica (ICZN), pois, como já foi dito, este é o único código a conceber a atribuição de nomes formais da hierarquia taxonômica Linaeniana para estruturas biogênicas. Assim, todos aqueles icnofósseis que recebem uma designação uninominal (gênero) ou binomial (espécie) e são posicionados em categorias taxonômicas de maior hierarquia (*e. g.*, família, ordem, classe, filo) seguem o clássico modelo de **Classificação Sistemática Linnaeana**.

Por outro lado, a evolução do conhecimento do grupo ao longo dos últimos dois séculos trouxe à tona várias questões e dificuldades de aplicação plena deste modelo, assim, distintos critérios para a classificação de icnofósseis são hoje reconhecidos como elementos de classificação para o grupo, cujo histórico e o estado da arte deste tema podem ser apreciados em Rindsberg (2012).

De acordo com este autor, além do clássico modelo Linnaeano (Classificação Sistemática), distinguem-se hoje três principais propostas de classificação para icnofósseis, as quais enfocam três critérios essenciais: a Classificação Estratinômica, a Classificação Etológica e a Classificação Biológica.

A **Classificação Estratinômica** considera como principais critérios de classificação aspectos derivados de processos bioestratinômicos responsáveis pela preservação do vestígio até o seu soterramento (e. g., propriedades físicas do substrato e toponomia). Em outras palavras, os icnofósseis são classificados de acordo com seu modo de preservação nos estratos de rochas. Exemplo: um traço fóssil preservado no topo da superfície de uma camada é classificado como *epichnion* (plural *epichnia*), enquanto outro preservado na base é classificado como *hypichnion* (plural *hypichnia*) e um outro preservado no interior de uma camada é classificado como *endichnion* (plural *endichnia*).

A **Classificação Etológica** baseia-se no comportamento dos organismos geradores como elemento responsável pela formação do vestígio (e. g., locomoção, habitação, alimentação, hábito, defesa, predação, entre outros), havendo, assim, numerosas propostas de categorias dessa natureza. Exemplo: vestígios produzidos por atividade de locomoção são classificados como *Repichnia*, como resultado de estratégias de alimentação *Fodinichina* e como produto de escavações e habitação *Domichnia*.

A **Classificação Biológica Filogenética** fundamenta-se, essencialmente, em aspectos filogenéticos e ecológicos morfo-funcionais e parte da designação da natureza do vestígio seguida da identificação do organismo que o gerou.

Assim, em se chegando a identificação do organismo responsável pela formação dos icnofósseis, sua classificação seguirá a clássica Classificação Sistemática Lineana, a qual, por sua vez, é regida pelo Código Internacional de Nomenclatura Zoológica (ICZN), por ser, como já mencionado, o único código a reconhecer estruturas biogênicas como apropriadas para receberem nomes formais da hierarquia Lineana.

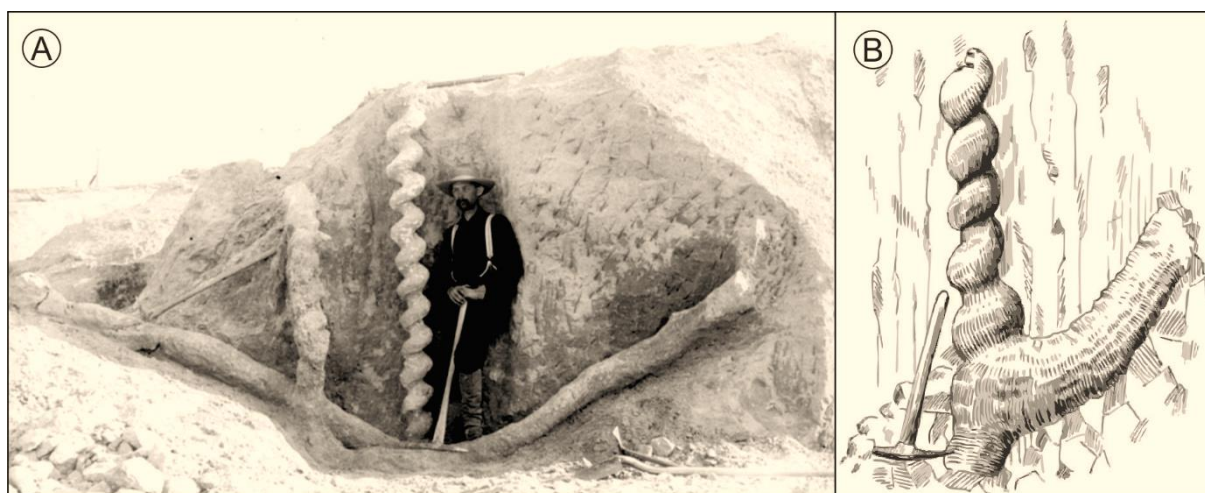


Apesar disso, por representarem evidências indiretas de organismos e não propriamente a organismos, sua classificação sistemática é artificial e, conseqüentemente, embora as normas do ICZN sejam seguidas, algumas particularidades foram adaptadas à taxonomia do grupo, como por exemplo, a adição do prefixo icno aos táxons (e. g., icnofamília, icnogênero, icnoespécie) (adaptado de RIBEIRO, 2001).

Deve-se ressaltar, entretanto, que embora a morfologia do vestígio possa apresentar caracteres diagnósticos de um determinado táxon de hierarquia superior (e. g., filo, classe, ordem), na maioria das vezes não é possível chegar ao nível de espécie ou mesmo de gênero. Nesse sentido, uma dificuldade comum é o fato de diferentes organismos gerarem o mesmo tipo de vestígio em função do mesmo tipo de atividade ou de funcionamento metabólico.

Apesar destas dificuldades, avanços e novas descobertas paleontológicas têm favorecido o reconhecimento de vestígios diagnósticos de táxons específicos, ainda que a nível de categorias hierárquicas superiores. Um exemplo clássico são os traços fósseis de trilobitas, cujo uso e emprego consagrados dispensam inclusive a citação da classe e as pistas são classificadas de acordo com a natureza do movimento do organismo – *Rusophycus*, *Cruziana* e *Diplichnites*.

Um exemplo de classificação biológica filogenética de icnofósseis continentais é a classificação do icnotáxon que corresponde às helicoidais paleotocas de *Palaeocaster*, registradas por Barbour (1892) como *Daimonelix* (FIGURA 4):



**Figura 4** – *Daimonelix* (*devil's corkscrews*). A) Paleotoca helicoidal de *Palaeocaster* do Mioceno, Nebraska, EUA (Fotografia de James St. John – Domínio Público); e B) Desenho esquemático de *Daimonelix* (Modificado de BARBOUR, 1892).

Neste estudo foram identificadas duas categorias de icnofósseis paleotocas e rizólitos, cuja caracterização é apresentada a seguir.

## Paleotocas

No que se refere ao conceito de paleotocas, Simpson (1975) descreve como escavações feitas em sedimentos inconsolidados que podem estar preenchidas (*burrows cast*) ou não (*burrows*). De maneira complementar, Ruchkys *et al.* (2014) as definem como escavações produzidas por vertebrados extintos, usadas para habitação, refúgio ou estivação, constituindo um registro indireto da presença de grupos taxonômicos onde fósseis corpóreos são inexistentes.

Considerando o preenchimento destas estruturas, o termo crotovina pode ser utilizado para designar paleotocas preenchidas, no entanto, segundo Ponomarenko & Ponomarenko (2019), a crotovina corresponde especificamente a tocas preenchidas produzidas por mamíferos, comumente associadas a solos modernos ou a paleossolos quaternários (*e. g.*, BUCHMANN *et al.*, 2009; PIETSCH, 2013; PIETSCH *et al.*, 2013; WANG *et al.*, 2017). Assim, neste trabalho, o termo “paleotoca” será empregado de acordo com o *sensu* de Ruchkys *et al.* (2014).

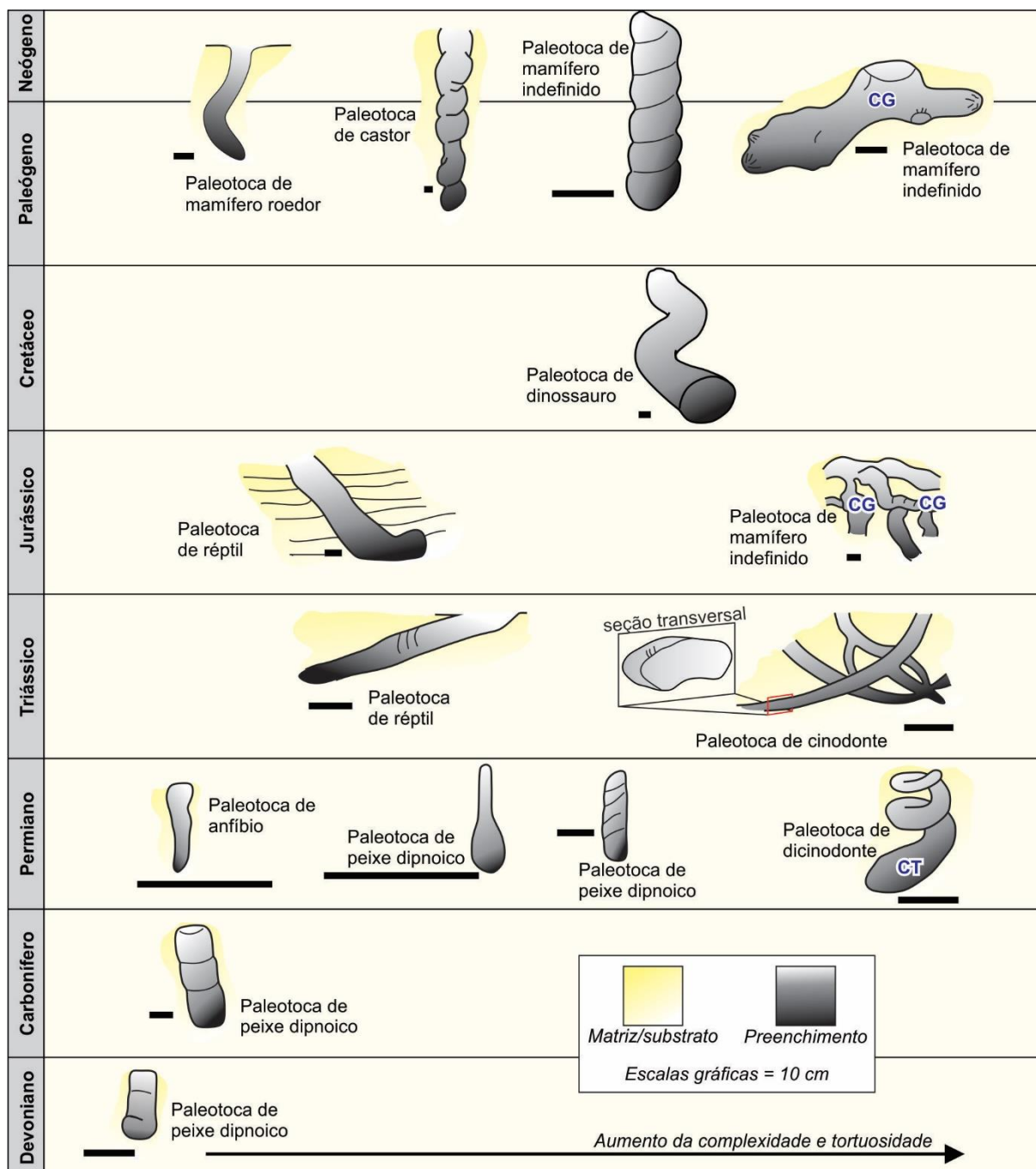
As paleotocas podem apresentar arquitetura e morfologia variada ao longo do tempo geológico, o que se deve, principalmente, a aspectos evolutivos do organismo produtor. Apesar disso, de um modo geral, são reconhecidos três padrões essenciais de arquitetura – simples (*e. g.*, DENTZIEN-DIAS *et al.*, 2012; MILLER *et al.*, 2001; SIDOR *et al.*, 2008), helicoidal (*e. g.*, GROENEWALD, 1991; SMITH, 1987) ou em redes complexas (GROENEWALD *et al.*, 2001; VOIGT, 2011).

Quanto as dimensões das paleotocas, estas podem ser muito variadas visto que o tamanho da paleotoca deve ser proporcional ao tamanho do animal produtor. Com isso, conseqüentemente deriva também de aspectos relacionados a ontogenia e a ecologia do animal produtor, os quais por sua vez, podem envolver um complexo conjunto de parâmetros bióticos e abióticos a influenciar no tamanho e também na morfologia geral das tocas (*e. g.*, tempo de utilização, hábitos, habitat, comportamento, entre outros).

De acordo com Dentzien-Dias *et al.* (2012), alguma das estruturas comumente observadas em paleotocas são a câmara de giro (CG), que é uma área ampla no meio da toca, na qual o animal faria o retorno ou por onde deixaria outro animal de mesma colônia passar, e a câmara terminal (CT), que é uma expansão oval ou redonda, ao final do túnel, onde o animal repousa (*e. g.*, MODESTO & BOTHA-BRINK, 2010; SIDOR, 2008).

Na visão de Hasiotis *et al.* (2007), o comportamento fossorial evoluiu inúmeras vezes em diferentes grupos de vertebrados ao longo do tempo. As tocas de uso

permanente a temporário escavadas por vertebrados registram características comportamentais que indicam, até certo ponto, as condições físico-químicas e climáticas do ambiente em que foram produzidas. Todos os grupos de vertebrados desenvolveram adaptações para diferentes tipos de *habitats* na maioria das condições climáticas, como exemplificado na Figura 5, onde são ilustrados registros fósseis de diferentes grupos animais desde o Devoniano até o Neógeno.



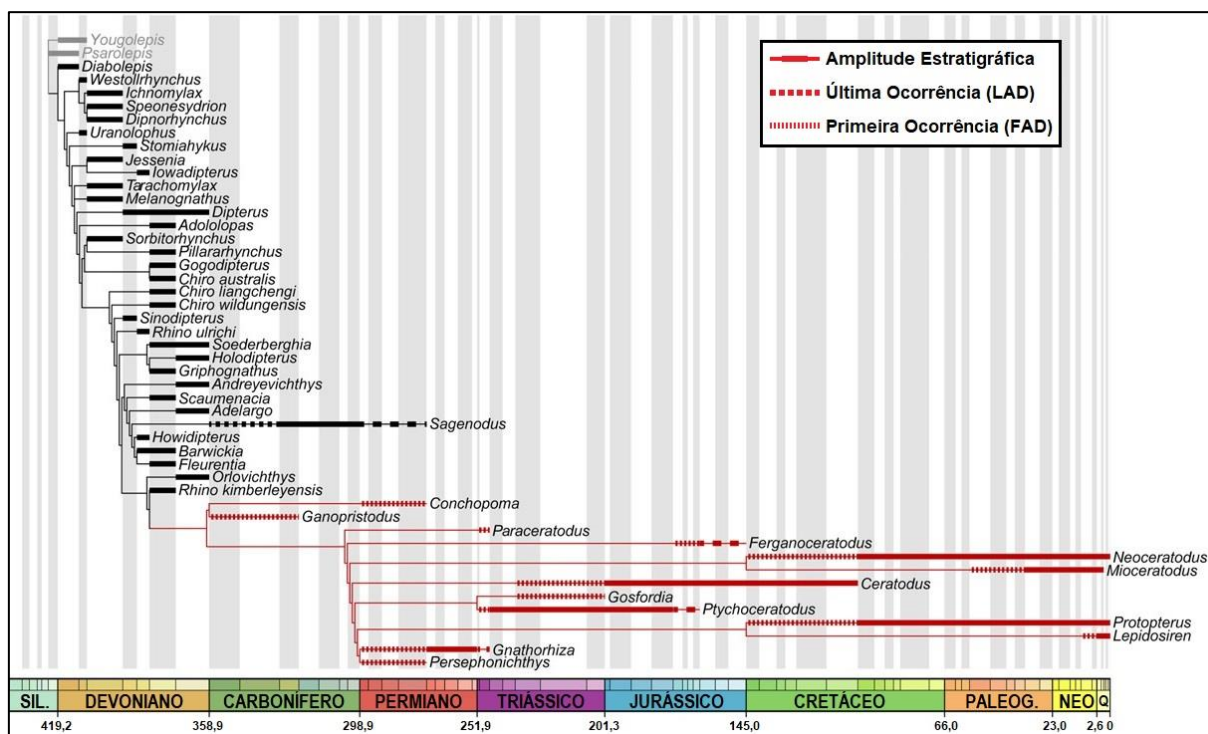
**Figura 5** – Ilustrações de alguns registros de paleotocas produzidos por distintos animais fósseis desde o Devoniano até o Neógeno (Modificado de HASIOTIS *et al.*, 2007). **CG** = câmara de giro e **CT** = câmara terminal.

De acordo com Romer & Olson (1954), as paleotocas de vertebrados mais antigas conhecidas são atribuídas a peixes dipnoicos e sua construção é interpretada por estes autores como indicativa de secas sazonais ao longo do tempo geológico.

### Paleotocas de peixes dipnoicos

Os dipnoicos (Superordem DIPNOI, *sensu* NELSON *et al.*, 2016), constituem um grupo de peixes sarcopterígios (peixes ósseos mandibulados de nadadeira lobada), popularmente conhecidos como peixes pulmonados (*lungfishes*) por serem dotados de um ou dois pulmões funcionais, além de brânquias. A presença de pulmões e brânquias modificadas lhes confere respiração aérea, podendo, neste sentido, ser tanto pulmonados facultativos (com respiração branquial na presença de água e respiração pulmonar na ausência de água) quanto pulmonados obrigatórios (quando as brânquias são reduzidas) (adaptado de BURGGREN & JOHANSEN, 1986).

De acordo com Cloutier & Ahlberg (1996), os dipnoicos são reconhecidos como um grupo natural, cujo registro paleontológico se estende desde o Devoniano Inferior até o Recente (FIGURA 6), tendo atingido sua maior diversidade durante o Devoniano (mais de 85 espécies).



**Figura 6** – Filogenia e amplitude estratigráfica estimada de gêneros de peixes dipnoicos entre o Devoniano e o Quaternário (Modificado de KEMP *et al.*, 2017).

Os membros devonianos mais antigos conhecidos do grupo incluem *Uranolophus wyomingensis* (Wyoming, USA), *Diabolepis speratus* (Yunnan, China),

*Speonesydrion iani* (Ohio, USA; New South Wales, Austrália), do Pragiano (~410-407 Ma) e, *Sorbitorhynchus deleaskitus* (Guangxi Province, China) e *Dipnorhynchus suessmilchi* (New South Wales, Austrália) do Emsiano (~407-393 Ma) (CLOUTIER & AHLBERG, 1996).

No Mesozoico, apesar de apresentarem representativa abundância por constituírem importantes remanescentes da extinção em massa do Permo-Triássico, seu registro fóssil neste intervalo de tempo ainda é bastante incompleto (SKRZYCKI *et al.*, 2018). De acordo com Kemp *et al.* (2017), entre alguns gêneros representativos da paleofauna mesozoica de dipnoicos estão *Paraceratodus*, *Gnathorhiza*, *Ferganoceratodus*, *Ceratodus*, *Beltanodus*, *Microceratodus*, *Asiatoceratodus*, *Arganodus*, *Gosfordia*, *Namatozodia*, *Ptychoceratodus*, *Retodus*, *Lavocatodus*, *Metaceratodus*, *Mioceratodus*, *Neoceratodus*, *Lepidosiren* e *Protopterus*.

No Cenozoico, as formas viventes estão inseridas na Ordem CERATODONTIFORMES, de acordo com a proposta de classificação sistemática de Nelson *et al.* (2016), e são representadas por apenas três gêneros e seis espécies, *Lepidosiren paradoxa* da América do Sul; *Protopterus annectens*, *Protopterus amphibious*, *Protopterus aethiopicus* e *Protopterus dolloi* da África; e *Neoceratodus forsteri* da Austrália (CRISWELL, 2015).

Durante o Paleozoico são reconhecidas tanto formas marinhas quanto mixohalinas e dulciaquícolas, porém, segundo Almeida-Val *et al.* (2016), a partir do final do Carbonífero passaram a habitar somente águas doces e algumas espécies adquiriram a habilidade de estivação durante o Permiano, elaborando, para tanto, escavações tubulares do tipo toca.

Clement & Long (2010) sugerem que o desenvolvimento da utilização o ar atmosférico por peixes dipnoicos pode estar relacionado com uma combinação entre o aumento da atividade metabólica e baixos níveis globais de oxigênio, tanto no final do Paleozoico, quanto em determinadas fases durante o Mesozoico. A estivação é uma característica que pode ser observada em dois dos gêneros atuais *Protopterus* e *Lepidosiren*, nos quais os pulmões são utilizados durante a respiração atmosférica, quando o corpo d'água em que habitam seca.

Estudos voltados a compreensão dos mecanismos envolvidos no processo de estivação em peixes dipnoicos (e. g., PEREZ-GONZALEZ & GRINKRAUT, 1971; SAWAYA & SHINOMIYA, 1972), demonstraram que *Lepidosiren* e *Protopterus* estivam de forma muito semelhante, habitando águas tropicais com baixo teor de

oxigênio, porém, *Lepidosiren* não experimenta condições de completo ressecamento do substrato e, por isso, não produz o muco observado em tocas de *Protopterus*.

No gênero *Neoceratodus* não é observado o processo de estivação, o que segundo Perez-Gonzalez & Grinkraut (1971) e Pusey *et al.* (2004), deve-se ao fato de habitar águas com concentração relativamente alta de oxigênio dissolvido e de ser exclusivamente aquático, embora respire ar atmosférico. Sob este aspecto, Kemp (1986) comenta que *Neoceratodus* possui menor capacidade de resistência ao ressecamento do que *Lepidosiren* e *Protopterus*.

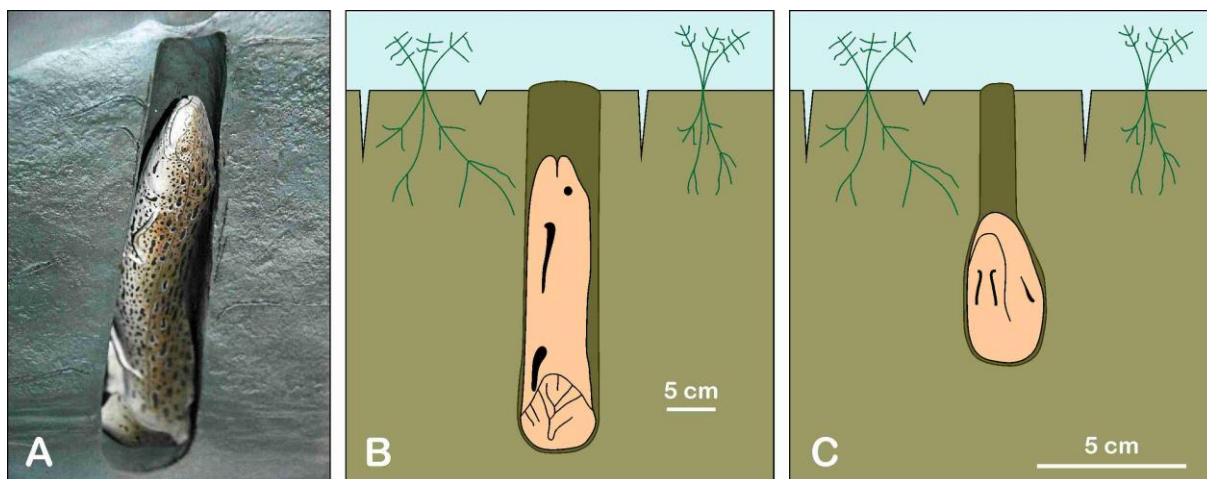
Tanto no Paleozoico quanto no Mesozoico e Cenozoico, o registro paleontológico dos peixes dipnoicos é representado predominantemente por placas dentárias (e. g., GOTTFRIED *et al.*, 2009; HARRELL & EHRET, 2018; TOLEDO *et al.*, 2011) e, secundariamente, por esqueletos (completos e incompletos) principalmente durante o Paleozoico (e. g., MILES, 1977).

Em relação à paleotocas de dipnoicos o registro fóssil mais antigo é do Devoniano Superior (Frasniano–Famenniano) e provém da Formação Catskill, centro-norte da Pennsylvania, USA (WOODROW & FLETCHER, 1969).

Segundo Hembree (2010), o registro de tocas de dipnoicos torna-se comum a partir do Permiano, exemplificando-se neste período as tocas de *Gnathorhiza* (Figura 07A), como uma das tocas de dipnoicos mais bem descritas na literatura e, por isso, também tipicamente usadas como modelo para a caracterização deste tipo de icnofóssil por paleontólogos, distinguindo-se duas morfologias básicas.

O **primeiro tipo** (Figura 07B) possui cerca de 1-10 cm de diâmetro, eixo cilíndrico com uma seção transversal circular a elíptica e com diâmetro relativamente consistente desde a terminação basal até a abertura; já o **segundo tipo** (Figura 07c) possui forma de frasco com um eixo superior cilíndrico de 1-10 cm de diâmetro que leva a uma câmara bulbosa expandida. Em ambos os tipos, as escavações possuem entre 10 e 50 cm de comprimento e são primariamente verticais com uma leve inclinação de 5° a 8° (HEMBREE, 2010).

Quando preservadas *in situ*, estas tocas têm lados e bases distintas, mas topos indistintos ao nível da rocha hospedeira; a superfície superior possui uma ruptura atribuída ao retrabalhamento biológico e físico dos sedimentos de superfície, após a desocupação da toca; as paredes são bem definidas e geralmente lisas, embora algumas possuam pequenas protuberâncias ou estrias horizontais e verticais (HEMBREE, 2010).

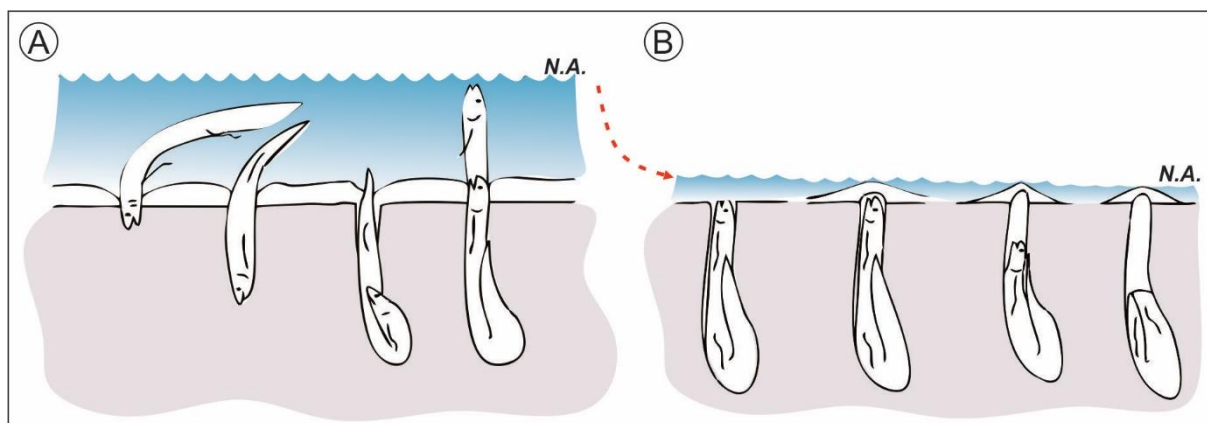


**Figura 7** – A) Reconstituição de *Gnathorhiza* (Fonte: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diorama\\_of\\_a\\_Pennsylvanian\\_forest\\_floor\\_-\\_Gnathorhiza\\_lungfish\\_\(43789196490\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diorama_of_a_Pennsylvanian_forest_floor_-_Gnathorhiza_lungfish_(43789196490).jpg)); B e C) Diagrama esquemático em seção transversal de escavações fósseis de estivação (tocas) de Peixes dipnoicos permianos, B) Tipo 1 = tubos cilíndricos alongados; C) Tipo 2 = tubos em forma de frasco (Modificado de HEMBREE, 2010).

Hasiotis *et al.* (1993) comentam que quando estabelecidas comparações entre as tocas de estivação de *Gnathorhiza* e as de *Protopterus* e *Lepidosiren* (dipnoicos atuais), é possível observar tanto semelhanças icnológicas entre estas, quanto a evolução na arquitetura das tocas das formas modernas. Nesse sentido, nota-se que a dimensão da porção terminal bulbosa foi aparentemente sendo ampliada ao longo do tempo geológico.

A presença de paleotocas de peixes dipnoicos, de acordo com Dubiel *et al.* (1987), quando associada a dados sedimentológicos, podem fornecer informações adicionais sobre ambientes deposicionais e controle climático. Segundo Silva *et al.* (2008), isto se deve ao fato de que estes peixes produzem tocas para estivação, o que reflete o comportamento de dormiência que o animal desenvolve quando submetidos a condições ambientais adversas (estivação). Quando um lago seca, durante a estiagem, o peixe dipnoico escava uma toca dentro do substrato lamoso, o que permite movimentos e mudança de posição (FIGURA 8).

Neste contexto, Dentzien-Dias *et al.* (2012) acreditam que a construção de tocas reflete a adaptabilidade de certos animais ao ambiente, uma vez que podem ser utilizadas para que os animais escapassem dos predadores, se protegessem de condições climáticas extremas (como frio extremo ou aridez), estabelecessem moradia permanente, ou ainda acessassem de maneira segura sua comida.



**Figura 8** – Desenho esquemático da reconstituição do peixe dipnoico produzindo a toca para estivação. A) com o nível da água (N.A.) baixando, o peixe inicia a produção da toca; e em B) o nível de água torna-se extremamente baixo e, durante a estiagem, o peixe ficará em estivação dentro da toca, recoberto de muco (Modificado de HASIOTIS *et al.*, 1993).

Assim, entre outros aspectos, o estudo de paleotocas pode levar à importantes inferências paleoecológicas, as quais, conseqüentemente poderão ser empregadas em interpretações paleoambientais, uma vez que refletem aspectos do modo de vida destes organismos condicionados por parâmetros ambientais do meio em que vivem.

### Rizólitos

Klappa (1980) definiu rizólitos como **estruturas organo-sedimentares que preservam a atividade das raízes de plantas superiores**, sendo reconhecidos por este autor e por Sarjeant (1975) **como produtos da exposição subaérea e da pedogênese**.

Para Sarjeant (1975) e Klappa (1980), constituem, assim, **fósseis vestigiais** formados pela preservação de características anatômicas da raiz por processos como substituição, incrustação ou impregnação mineral, mesmo que, eventualmente, possam também ser preservados conjuntamente restos do indivíduo gerador (FIGURA 9).

Em definições mais modernas (*e. g.*, RETALLACK, 2001; HASIOTIS, 2004), são reconhecidos rizólitos como **traços fósseis que preservam as interações planta-substrato e que indicam a posição relativa das zonas vadosa ou freática**.

As estruturas e padrões produzidos pelas raízes indicam atividade e comportamento ao longo da vida útil da planta (SARJEANT, 1975), conseqüentemente, também refletem o comportamento da planta, uma vez que os padrões produzidos pelas raízes representam a busca de água e minerais intersticiais



pela planta através de seu sistema radicular e é, neste contexto, que as raízes produzem vestígios fósseis (adaptado de KRAUS & HASIOTIS, 2006).

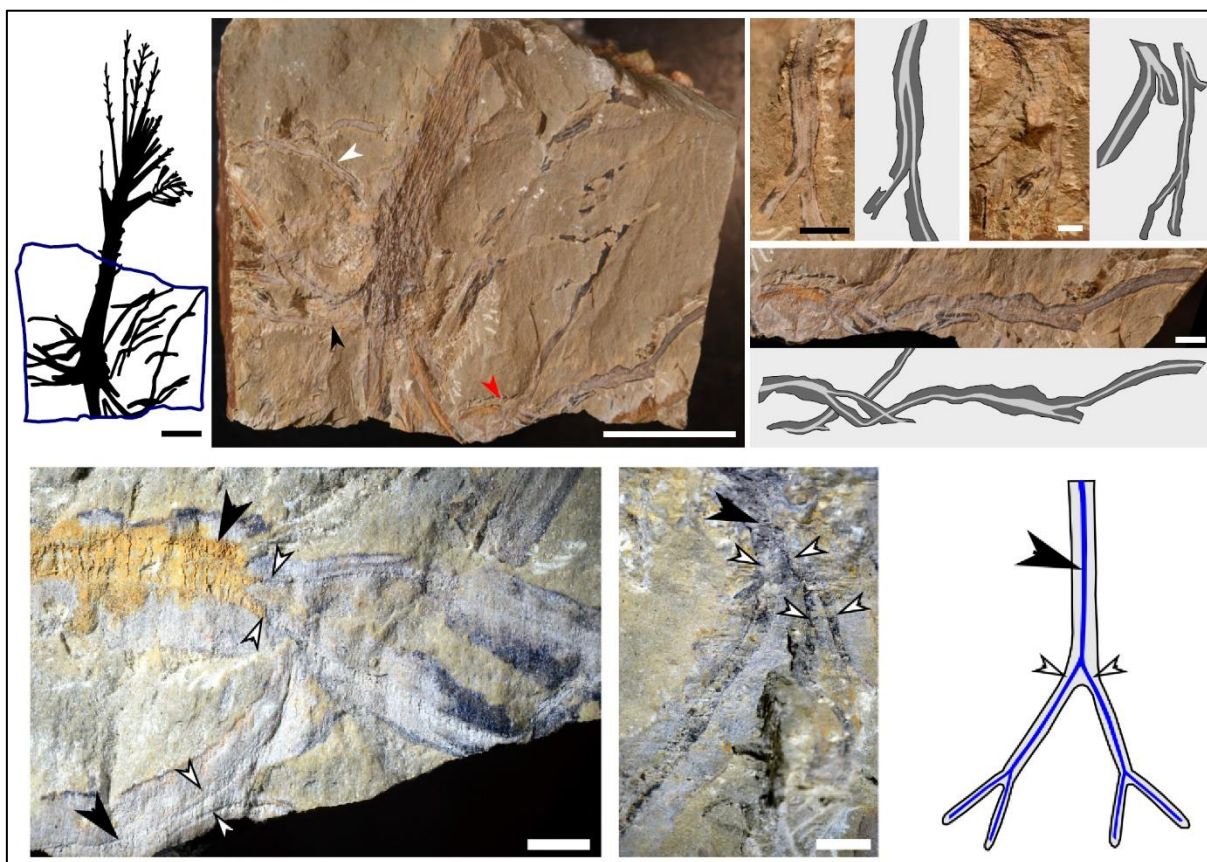


Figura 9 – Rizólitos de *Lorophyton goense* (Cladoxylopsida) do Devoniano Médio da Bélgica (Modificado de HETHERINGTON *et al.*, 2020).

Segundo Klappa (1980), de acordo com sua gênese os rizólitos podem ser classificados em 5 (cinco) tipos básicos de (FIGURA 10):

- Moldes de raiz (*root moulds*): vazios tubulares que marcam as posições das raízes atualmente decompostas;
- Contramoldes de raiz (*root casts*): moldes de raízes preenchidos por sedimentos e/ou cimento;
- Túbulos de raiz (*root tubules*): cilindros cimentados em volta dos moldes de raiz;
- Rizocrecções (*rhizocretions*): acumulações minerais pedodiagenéticas em torno da raiz da planta;
- Petrificações de raiz (*root petrifications*): são impregnações ou substituições minerais da matéria orgânica, preservando características anatômicas de raízes, parcial ou totalmente.

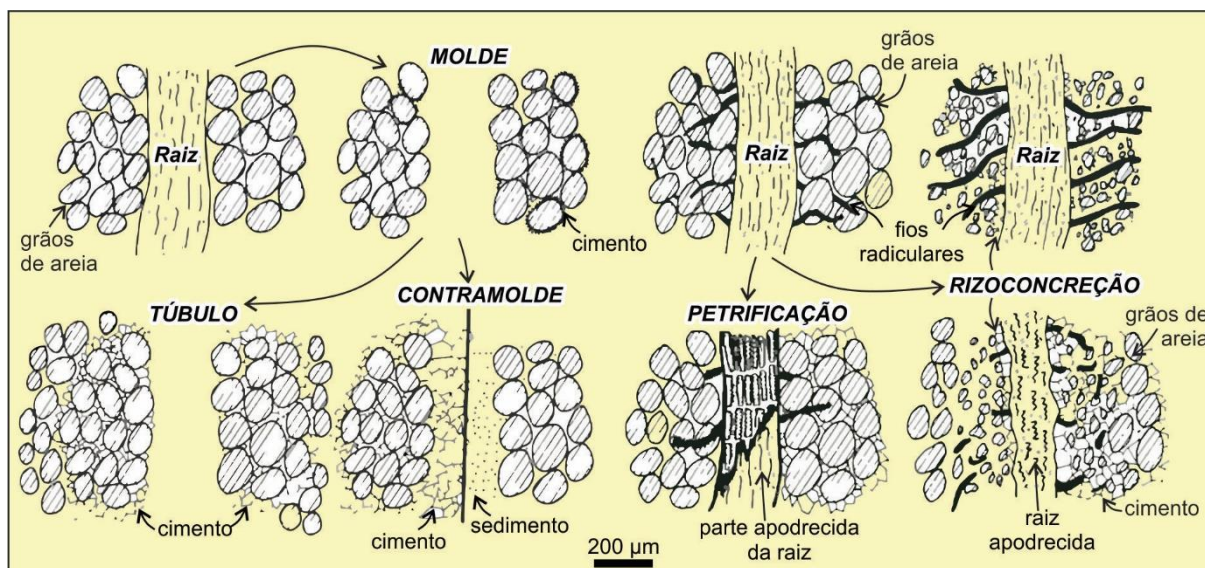


Figura 10 – Representação esquemática dos cinco tipos de rizólito (molde, contramolde, túbulo, petrificação e rizoconcreção) e suas relações de desenvolvimento (Modificado de KLAPPA, 1980).

Complementarmente, Kraus & Hasiotis (2006) introduziram o termo **rizohalo** (*rhizohalo*) para descrever uma zona empobrecida de Fe e Mn que se forma em torno da raiz. Esta zona se forma devido à flutuação dos níveis de umidade do solo e consequente deterioração da raiz. Segundo estes autores, sem a zona de depleção, o traço da raiz não é visível porque, de outra forma, nenhum molde ou contramolde da estrutura tubular é preservado.

Em termos de morfologia, segundo Jones *et al.* (1998), o comprimento e o diâmetro dos rizólitos, está diretamente relacionado ao tamanho da raiz da planta ao redor do qual esta estrutura se desenvolveu. Já a arquitetura, o padrão e a profundidade de enraizamento, estão associados à distribuição de água e nutrientes presentes no paleossolo, pois refletem diretamente o comportamento da planta, conforme Nascimento *et al.* (2019).

Nesse contexto, deve-se ressaltar que, sabendo-se que a cobertura vegetal é influenciada pelas características do solo, o estudo de rizólitos possui grande importância e aplicabilidade no reconhecimento e caracterização de paleossolos (e. g., WRIGHT, 1992; RETALLACK, 2001), pois constituem indicadores diretos de antigos padrões de cobertura vegetal, da presença de uma rizosfera (região do solo influenciada pelas raízes e com máxima atividade microbiana) e, conseqüentemente, das interações entre raízes, solo e microrganismos em um paleoecossistema.

Sob este aspecto alguns tipos de rizólitos podem ainda fornecer informações sobre o regime hidrológico de paleossolos, a exemplo daqueles que se preservam na forma de tubos alongados e acinzentados com aros ricos em ferro, uma feição

interpretada como característica de processos redoximórficos associados a saturação sazonal e ao preenchimento de canais radiculares com água.

Assim, o estudo de rizólitos, também se mostra bastante útil na obtenção de informações empregadas em outras interpretações geológicas, como em reconstituições paleoambientais (e. g., ALONSO-ZARZA *et al.*, 2008; KRAUS & HASIOTIS, 2006; LI *et al.*, 2015; NASCIMENTO *et al.*, 2019; RODRÍGUEZ-ARANDA & CALVO, 1998; SUN *et al.*, 2019).

De acordo com Genise *et al.* (2016) o registro paleontológico mais antigo de rizólitos provém de rochas do Devoniano Inferior (Emsiano) pertencentes a Formação Battery Point (Québec, Canadá), descritos no final da década de 1990 por Elick *et al.* (1998) (FIGURA 11).

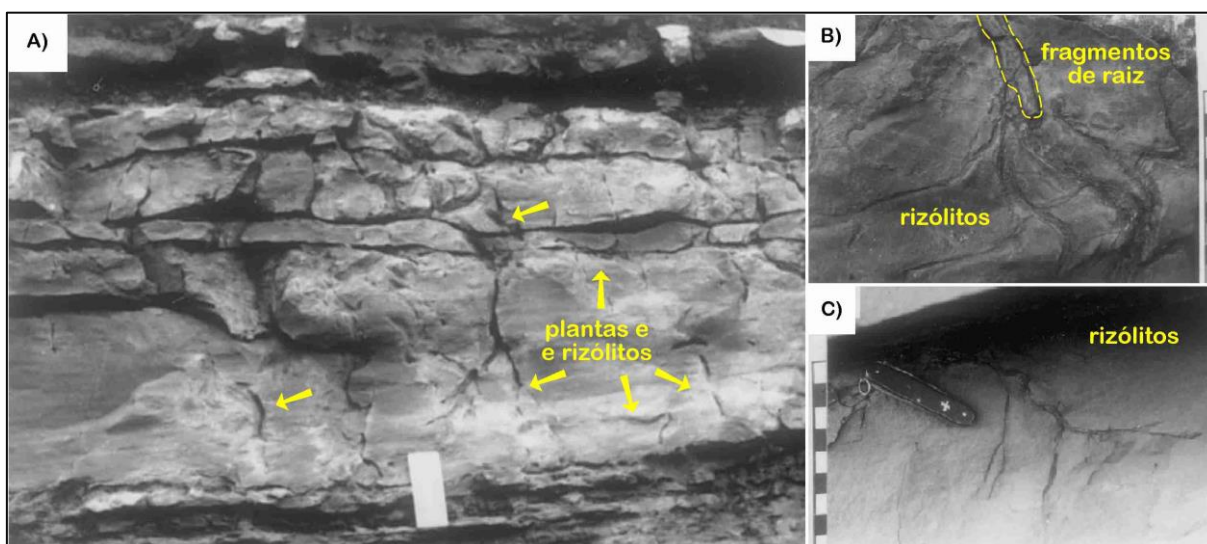


Figura 11 – Visão geral de uma sucessão de rochas devonianas (Emsiano) da Formação Battery Point (Québec, Canadá), com fósseis (restos de plantas) e icnofósseis (rizólitos) (Modificado de ELICK *et al.*, 1998).

A partir do Devoniano Médio o registro destes icnofósseis se amplia consecutivamente, tornando-se relativamente comum a partir do Carbonífero (*vide* GENISE *et al.*, 2016).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base na integração e interpretação dos dados sedimentológicos e paleontológicos levantados durante os trabalhos de campo e daqueles provenientes das análises desenvolvidas em laboratório, esta dissertação resultou no manuscrito intitulado “***Paleotocas de Dipnoicos da Formação Alter do Chão (Cretáceo, Bacia do Amazonas) em Ponta das Lajes, Manaus – AM: Classificação e Significado Paleoambiental***” submetido ao Anuário do Instituto de Geociências (ISSN 0101-9759) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), que encontra-se no Apêndice A, e os resultados pormenorizados das análises desenvolvidas são os seguintes:

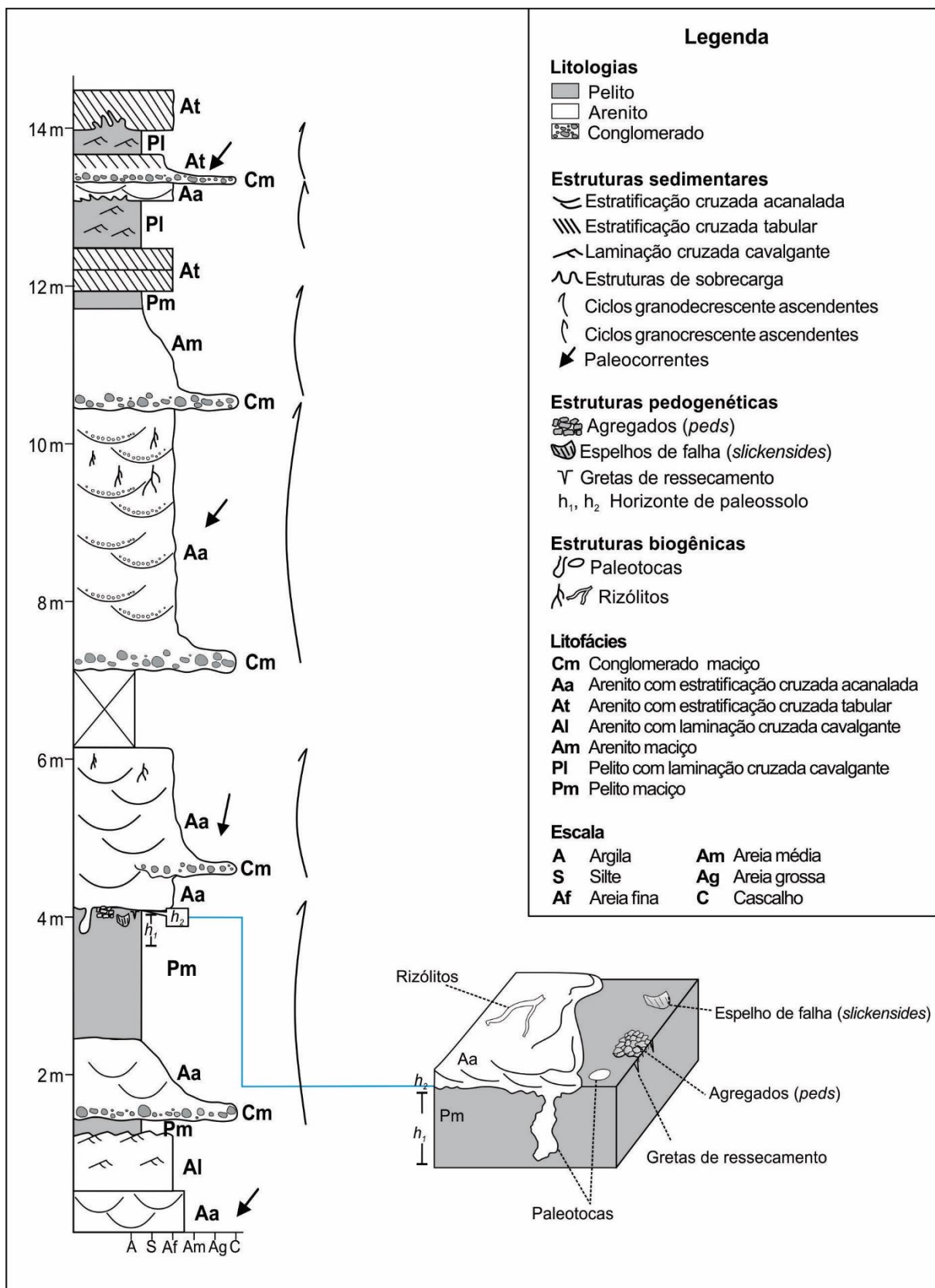
### 5.1 Análise de Fácies

A sucessão sedimentar estudada apresenta espessura de aproximadamente 15 m, perfazendo uma área total de 113.000 m<sup>2</sup> de extensão. Sua constituição litológica é caracterizada por rochas de natureza siliciclástica, representadas por arenitos, siltitos, argilitos e lentes de conglomerados. Parte desta sucessão está bastante silicificada e foram identificadas **estruturas sedimentares** (e. g., estratificações e laminações), **feições pedogenéticas** (e. g., superfícies de fricção pedogenéticas, gretas de ressecamento e agregados de solo) e **icnofósseis** (e. g., paleotocas e marcas de raiz).

A análise de fácies sedimentares desta sucessão resultou na identificação de 7 (sete) litofácies: Conglomerado maciço (**Cm**), Arenito com estratificação cruzada acanalada (**Aa**), Arenito com estratificação cruzada tabular (**At**), Arenito com laminação cruzada cavalgante (**Al**), Arenito maciço (**Am**), Pelito com laminação cruzada cavalgante (**Pl**) e Pelito maciço (**Pm**), cuja sucessão e caracterização estão sumarizados e ilustrados na Tabela 3 e na Figura 12.

**Tabela 3** – Caracterização das litofácies da Formação Alter do Chão identificadas no afloramento Ponta das Lajes, Manaus – AM, com processos deposicionais de acordo com a classificação de fácies de Miall (1977b, 2006).

<b>Litofácies</b>	<b>Descrição</b>	<b>Processo</b>
<b>Conglomerado maciço (Cm)</b>	Conglomerado lenticular oligomítico matriz suportado, com clastos de argila avermelhada com diâmetro entre 2 e 10 cm, arredondados e mal selecionados. A matriz composta por arenito esbranquiçado de granulometria fina a média, arredondados, moderadamente selecionada. Apresenta estrutura maciça. O contato inferior é erosivo com Pm e Aa e o superior é gradacional com Aa, At e Am.	Fluxo de detritos subaquosos.
<b>Arenito com estratificação cruzada acanalada (Aa)</b>	Arenito tabular esbranquiçado a rosado, granulometria fina a média, arredondados e moderadamente selecionados. Apresenta estratificação cruzada acanalada, com sets de 20 a 30 cm de espessura e paleocorrentes unimodal para SW, e ocorrência de rizólitos. O contato inferior é gradacional com Cm e Pm, e plano com Sl. O contato superior é gradacional com Pm, erosivo com Cm e plano com Al.	Migração de dunas de cristas sinuosas em regime de fluxo inferior.
<b>Arenito com estratificação cruzada tabular (At)</b>	Arenito tabular esbranquiçado a rosado, granulometria fina a média, arredondados e moderadamente selecionados. Apresenta estratificação cruzada tabular, com sets de 20 a 50 cm de espessura. O contato inferior é plano com Pm, ondulado com Sl e gradacional com Cm e o superior plano com Sl. O padrão de paleocorrentes é unimodal, com direção preferencial para SW.	Migração de dunas de cristas retas em regime de fluxo inferior.
<b>Arenito com laminação cruzada cavalgante (Al)</b>	Arenito tabular esbranquiçado, granulometria fina, arredondados e bem selecionados. Apresenta laminação cruzada cavalgante subcrítica com preservação do stoss side. O contato inferior é plano com Aa e o superior é ondulado Pm.	Migração de marcas de onda sob corrente tratativa em regime de fluxo inferior.
<b>Arenito maciço (Am)</b>	Arenito tabular esbranquiçado a rosado, granulometria fina a média, arredondados e bem selecionados. Apresenta estrutura maciça. Contato inferior gradacional com Cm e superior gradacional com Pm.	Fluxo denso episódico.
<b>Pelito com laminação cruzada cavalgante (Pl)</b>	Siltito avermelhado tabular com estrutura maciça. O contato inferior é plano Aa e At e o superior é irregular com a fácies Aa e At.	Suspensão associada a tração.
<b>Pelito maciço (Pm)</b>	Pelito tabular avermelhado, estrutura interna ausente, com estruturas pedogenéticas (superfícies de fricção pedogenéticas e agregados de solo) e biogênicas (paleotocas e rizólitos). O contato inferior é gradacional com Aa e Am, e ondulado com Al. O contato superior é plano com Aa e At, e erosivo com Cm.	Suspensão, com exposição subaérea e alterações pedogenéticas.



**Figura 12** – Perfil estratigráfico da Formação Alter do Chão em Ponta das Lajes, Manaus –AM, com detalhe para o bloco diagrama do contato entre as fácies Aa (sobreposta) e Pm (sotoposta) e as estruturas pedogenéticas e biogênicas identificadas no paleossolo representados pelos horizontes  $h_1$  e  $h_2$ .

### 5.1.1 Descrição das Litofácies

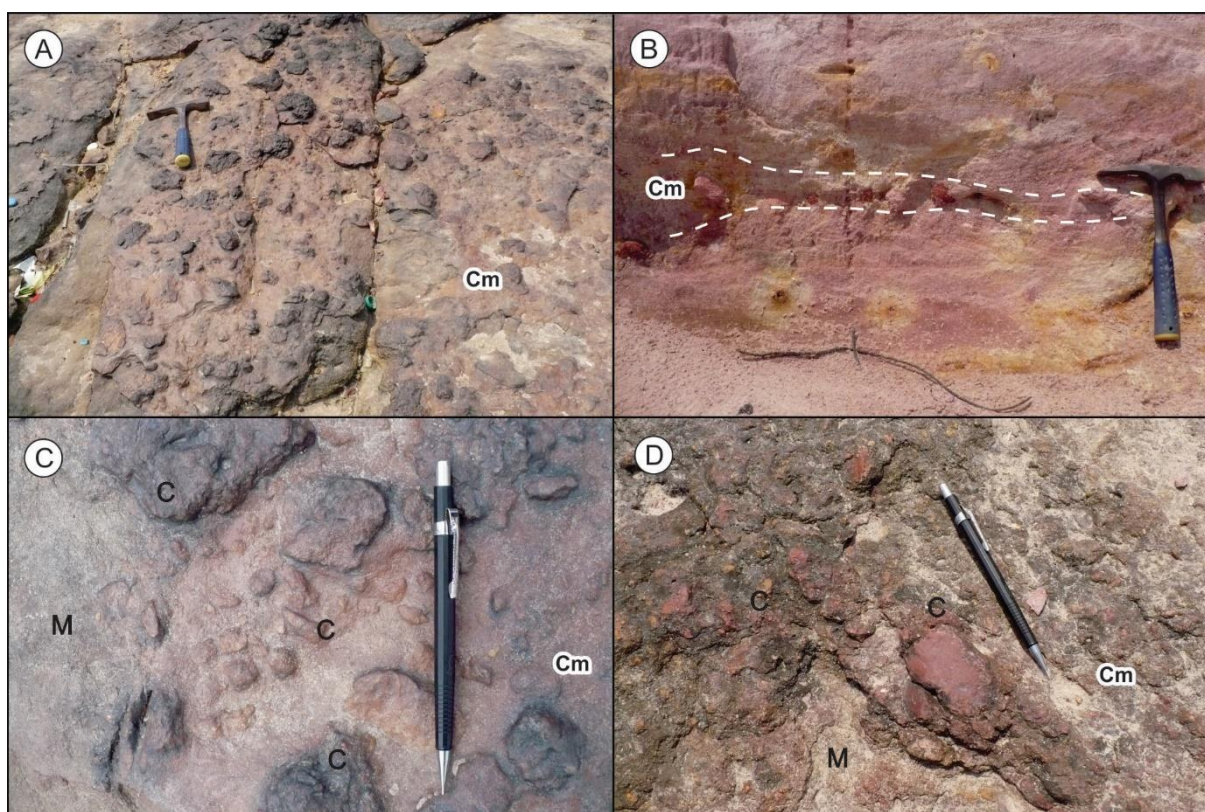
#### **Conglomerado maciço – Cm**

Descrição: esta fácies é constituída por conglomerado oligomítico e matriz suportado (FIGURA 13A e 13B), geometria lenticular e que pode atingir 15 cm de espessura.

Os clastos são arredondados a sub-arredondados, mal selecionados e constituídos por argila avermelhada com dimensões que variam entre 2 e 15 cm (FIGURA 13C e 13D). A matriz é composta por arenito esbranquiçado a rosado de granulometria fina a média, com grãos arredondados e moderadamente selecionados.

Esta fácies apresenta estrutura maciça e contato inferior erosivo com a fácies Aa, no qual marca o início de ciclos granodecrescente ascendentes. O contato superior com as fácies Aa, At e Am é gradacional.

Interpretação: A ausência de estruturas internas em conglomerados e a má seleção de clastos, segundo Miall (2006), são indicativas de uma sedimentação rápida sob fluxo de alta energia. Conforme proposto em Miall (1977a, 1992), esta fácies apresenta características consistentes com uma deposição em canal fluvial sob forma de depósitos residuais (*lag*).



**Figura 13** – Fácies composta por conglomerado. A e B) Fácies Cm com clastos de argila e matriz suportados, no qual marca a variação da espessura no nível de clastos (tracejado em branco); C e D) Clastos de argila mal selecionados e arredondados a subarredondados. C = clastos; M = matriz.

### **Arenito com estratificação cruzada acanalada – Aa**

Descrição: esta fácies é constituída por arenito esbranquiçado a rosado com geometria tabular que pode atingir até 4 m de espessura. Apresenta granulometria fina a média, com grãos arredondados e moderadamente selecionados.

Os *sets* são compostos por estratificação cruzada acanalada com espessura entre 20 e 30 cm e inclinação dos *foresets* entre 20° e 33° (FIGURAS 14A e 14B) e apresentam padrão de correntes unimodal para SW (média de 218,3° Az). Além disso, em alguns *sets*, os *foresets* são marcados por segregações de seixos e grânulos constituídos principalmente de quartzo, cuja geometria é acunhada (FIGURA 14C).

Alguns *sets* apresentam estruturas de deformação por sobrecarga do tipo chama (*flame structure*). As estruturas em chama ocorrem na base de *sets* em contato com a fácies PI (sotoposta) e constituem estruturas arredondadas com 0,5 a 1 cm de profundidade.

A presença de um nível de paleossolo é marcado pela ocorrência de estruturas associadas a raízes (rizólitos). Este nível de paleossolo ocorre na porção superior da fácies Aa, com aproximadamente 50 cm de espessura, no qual estão disseminados rizólitos tubulares avermelhados a amarelados, preenchidos ou não, e com orientação horizontal e vertical (FIGURAS 14D e 14E).

O contato inferior com a fácies Cm é gradacional e erosivo com as fácies Pm e SI, enquanto o contato superior com a fácies Pm é gradacional, erosivo com a fácies Cm e plano com a fácies Al.

Interpretação: considerando o modelo proposto em Miall (1977a, 2006), a estrutura sedimentar primária dominante (estratificação cruzada acanalada) indica que esta fácies possivelmente se desenvolveu a partir da migração de dunas de crista sinuosa (3D) associadas a um fluxo unidirecional sob regime de fluxo inferior.

Sob este prisma, a segregação de seixos e grânulos nos *foresets* de alguns *sets* pode ser interpretada como resultado da migração de marcas onduladas parasíticas em dunas sub aquosas cuja sedimentação, segundo Reesink & Bridge (2009) e Tucker (2003), está associada ao acúmulo de grossos em forma de cunha preservado no *lee-side*.

As estruturas de sobrecarga em chama (*flame structure*) no contato da fácies Al (sotoposta) com as fácies At (sobrepota) é interpretado como uma feição desenvolvida pelo pelo afundamento rápido de uma camada na outra em função da densidade diferencial, em conformidade com as propostas de MacNaughton *et al.* (2005) e Tucker (2003).



No que se refere a presença de marcas de raiz, observada em parte dessa sucessão, Tucker (2003) coloca a exposição subaérea do leito como uma interpretação para a geração de condições para o desenvolvimento de paleossolo e, por sua vez, de vegetação.

### **Arenito com estratificação cruzada tabular – At**

Descrição: esta fácies é constituída por arenito esbranquiçado a rosado com geometria tabular que pode atingir até 50 cm de espessura. Apresenta granulometria fina a média, com grãos arredondados e moderadamente selecionados.

Os *sets* são compostos por estratificação cruzada tabular com espessura entre 20 e 50 cm e inclinação dos *foresets* entre 8° e 12° (FIGURA 14B). Além disso, apresentam padrão de correntes unimodal para SW (média de 219° Az) e estruturas de deformação por sobrecarga do tipo chama (*flame structure*).

As estruturas em chama ocorrem na base de *sets* de arenito em contato com a fácies PI (sotoposto) e compreendem estruturas bulbosas com 0,5 a 1 cm de profundidade.

O contato inferior da fácies At é plano com a fácies Pm, ondulado com a fácies SI e gradacional com Cm. Já o contato superior com a fácies SI é brusco.

Interpretação: considerando a estrutura sedimentar primária dominante (estratificação cruzada tabular) e em concordância com o modelo proposto por Miall (2006), esta fácies possivelmente se desenvolveu a partir da migração de dunas de crista reta (2D), estando estas estruturas associadas a um fluxo unidirecional em regime de fluxo inferior.

As estruturas de sobrecarga em chama (*flame structure*) no contato da fácies AI (sotoposta) com as fácies At (sobrepota) é interpretado como uma feição desenvolvida pelo pelo afundamento rápido de uma camada na outra em função da densidade diferencial, em conformidade com as propostas de MacNaughton *et al.* (2005) e Tucker (2003).

### **Arenito com laminação cruzada cavalgante – AI**

Descrição: esta fácies é constituída por arenito esbranquiçado com geometria tabular que pode atingir até 50 cm de espessura. Apresenta granulometria fina, com grãos arredondados e bem selecionados.

Os *sets* são compostos por laminação cruzada cavalgante subcrítica, caracterizados por baixa amplitude (~5 cm), comprimento de até 1 cm e preservação de *stoss-side* possivelmente por filmes milimétricos de argila (FIGURA 14F).

No topo destes *sets* ocorrem marcas onduladas de cristas assimétricas, caracterizadas pelo comprimento de até 22 cm e amplitude 5 cm, aproximadamente (FIGURA 14G).

O contato inferior da fácies Al é plano com a fácies Aa e o contato superior é ondulado com a fácies Pm.

Interpretação: A presença de marcas onduladas assimétricas e laminação cruzada cavalgante com o *stoss-side* preservado por filmes de argila indica deposição por meio de processos alternados de tração e suspensão, sob fluxo unidirecional em regime de fluxo inferior, como proposto em Miall (1977a, 2006).

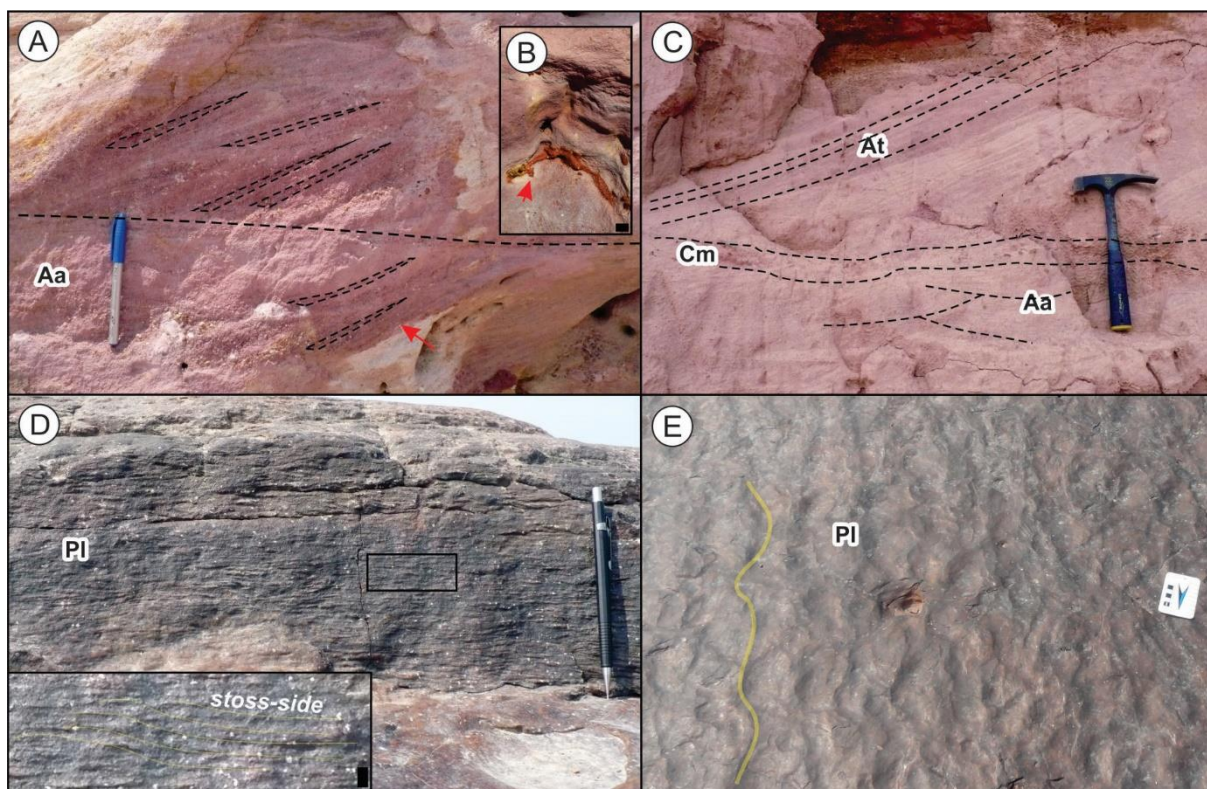
Além disso, o desenvolvimento de marcas onduladas de cristas assimétricas, segundo Tucker (2003), está associado ao fluxo unidirecional, que geram ondulações com amplitude menor que 5 cm, como também definido em Miall (2006).

### **Arenito maciço – Am**

Descrição: esta fácies é constituída por arenito esbranquiçado a rosado com geometria tabular que pode atingir até 100 cm de espessura. Apresenta granulometria fina a média, com grãos arredondados e moderadamente selecionados.

A estrutura sedimentar é maciça e o contato inferior desta fácies é gradacional com a fácies Cm, enquanto o contato superior com a fácies Pm é gradacional.

Interpretação: considerando a estrutura maciça do arenito, sua deposição pode ser resultante de uma rápida sedimentação, como proposto por Tucker (2003) para acamamentos maciços, o qual pode ser representado por um colapso de banco arenoso, de acordo com as interpretações propostas em Martin & Turner (1998) e Miall (2006).



**Figura 14** – Fácies compostas por arenitos. A) Fácies Aa, com *foresets* com seixos de quartzo na base (tracejado); B) Rizólitos que ocorrem na fácies Aa; C) Fácies At e Fácies Aa separadas por lente de conglomerado; D) Fácies Al, com destaque para a preservação do *stoss-side* por pelito; e E) Vista em planta da fácies Al, na qual destaca-se a sinuosidade das marcas onduladas. *Escala gráfica = 5cm.*

### **Pelito com laminação cruzada cavalgante – PI**

**Descrição:** esta fácies é constituída por siltito avermelhado com geometria tabular que pode atingir até 50 cm de espessura.

Os *sets* são compostos por laminação cruzada cavalgante subcrítica, caracterizados por baixa amplitude (~0,1 cm), comprimento de até 0,2 cm e preservação de *stoss-side* por filmes milimétricos de pelito de tom mais escuro (FIGURA 15A).

O contato inferior desta fácies com as fácies Aa e At é plano. E o contato superior desta fácies com as fácies Aa e At é irregular, em função das estruturas de sobrecarga e o peso da camada adjacente (FIGURA 15B).

**Interpretação:** considerando a estrutura sedimentar primária dominante (laminação cruzada cavalgante subcrítica) com preservação do *stoss side* recoberto por argila, de acordo com o modelo proposto em Miall (1977a, 2006), esta fácies foi depositada por suspensão associada a fraca tração sob fluxo unidirecional em regime de fluxo inferior.

### **Pelito maciço – Pm**

Descrição: esta fácies é constituída por pelito avermelhado de geometria tabular, com estruturas sedimentares internas ausentes ou incipientes, que pode atingir até 150 cm de espessura.

A presença de paleossolo é representada por dois horizontes ( $h_1$  e  $h_2$ ), nas quais o horizonte  $h_1$  apresenta aproximadamente 50 cm de espessura, ao qual estão associadas estruturas cilíndricas com orientação subvertical no topo do nível de paleossolo, cujo preenchimento por arenito é coincidente com a fácies Aa (sobrepota), referenciadas como paleotocas (FIGURA 15C).

O horizonte  $h_2$  apresenta espessura média de 20 cm é observado principalmente na superfície fácies Pm, sendo constituído por um arranjo de agregados de solo em forma de blocos (*blocky peds*), separados entre si por gretas de ressecamento, além da presença de superfícies de fricção (*slickensides*) pedogenéticas.

No que se refere às estruturas pedogenéticas, as gretas de ressecamento poligonais (FIGURA 15D) são preenchidas por arenito médio a grosso e apresentam perfil em V, com afunilamento da seção transversal em profundidade. E as superfícies de fricção (*slickensides*) pedogenéticas constituem superfícies lisas e lustrosas comumente inclinadas em relação ao acamamento (FIGURA 15E).

O contato inferior desta fácies com a fácies Am e Aa é gradacional e com a fácies Al é irregular. O contato superior da fácies Pm com as fácies Aa e At é irregular e com a fácies Cm é erosivo.

Interpretação: considerando sua litologia, a ausência de estruturas internas e a presença de bioturbações, a sedimentação da fácies Pm pode ser análoga ao modelo proposto por Miall (1977a, 2006), no qual pelitos maciços depositam-se por suspensão.

Além disso, em conformidade com Retallack (2001), o nível de paleossolo identificado é indicativo de um período de exposição subaérea, tendo como principais estruturas diagnósticas o arranjo em agregados de solo (*peds*), gretas de ressecamento, superfícies de fricção pedogenéticas e paleotocas.

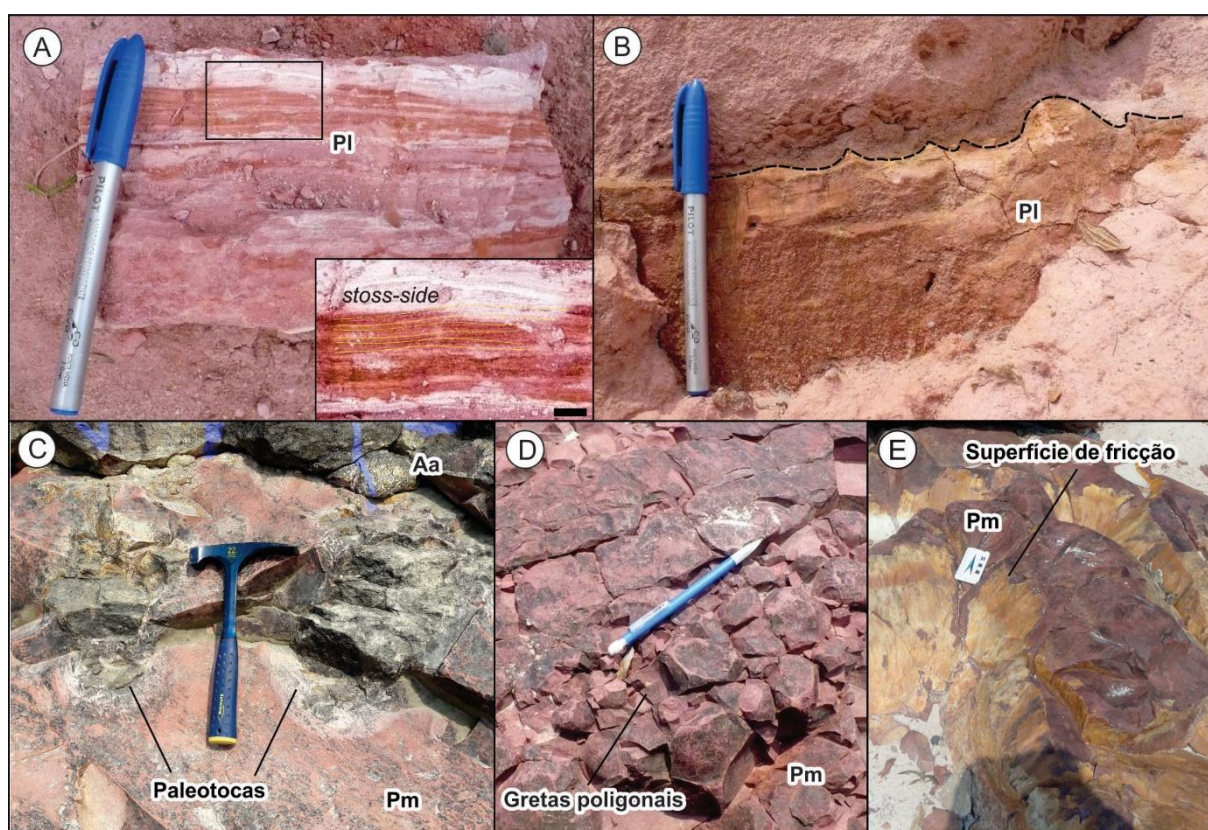
Segundo Retallack (2001), estas estruturas se desenvolvem nos solos em diferentes graus e obliteram progressivamente estruturas sedimentares pré-existentes da rocha parental, tais como estruturas de acamamento.

O desenvolvimento das estruturas pedogenéticas, de acordo com Retallack (1988, 2001), pode ser relacionado a um solo composto por argilas expansivas, nos

quais as tensões diagonais em função da dilatação das argilas ao absorver umidade, após as chuvas, formam os arranjos em agregados de solo do tipo bloco.

As gretas de ressecamento se originam a partir do ressecamento dos níveis mais superficiais do solo quando submetidos a exposição subaérea. Segundo Tanner (1978), a redução de volume resultante da perda de fluido gera tensões de tração distribuídas igualmente em todas as direções dentro do plano de acamamento, aliviadas pela formação de um padrão característico de rachaduras poligonais abertas na superfície do sedimento.

As superfícies de fricção pedogenéticas em solos constituídos por argilas expansivas, de acordo com Retallack (1988, 2001) se formam pela contração e expansão dos argilominerais em resposta a alternância entre períodos úmidos e secos.



**Figura 15** – Fácies compostas por pelitos. A fácies PI caracteriza-se, principalmente, pelas marcas onduladas com preservação de *stoss side* por filmes de argila (A) e contato irregular (tracejado) com o arenito sobreposto (B); A fácies Pm apresentam um horizonte  $h_1$  de paleossolo no qual ocorrem as paleotocas (C) e um horizonte  $h_2$  no qual as feições pedogenéticas correspondem a gretas de ressecamento poligonais (D) e superfícies de fricção (E). Escala gráfica = 0,5cm.

### 5.1.2 Associação de fácies

As sete fácies identificadas na área de estudo foram agrupadas em três associações de fácies dentro de um sistema fluvial, cujos depósitos estão relacionados a subambientes de canal e, na planície de inundação, lago e *crevasse splay*.

#### Preenchimento de canal

Os depósitos de **preenchimento de canal** são caracterizados pela associação das fácies **conglomerado maciço** (Cm), **arenito com estratificação cruzada acanalada** (Aa), **arenito com estratificação cruzada tabular** (At), **arenito com laminação cruzada cavalgante** (Al) e **arenito maciço** (Am), e constituem depósitos que podem atingir 3,5 m de espessura.

De acordo com Tucker (2003) e Miall (2006), canais fluviais geralmente são preenchidos na base por conglomerados (*lag*) sobre os quais depositam-se as formas de leito arenosas, em função da velocidade de fluxo se tornar menor que a velocidade de deposição dos grãos de carga, como descrito por Allen (1965), caracterizando, desta forma, ciclos granodecrescente ascendentes.

Os ciclos granodecrescentes ascendentes possuem uma espessura variável entre 0,5 e 4 m de espessura, em sua maioria incompletos. Possuem base com contato brusco e topo gradacional e as fácies são compostas por conglomerados são sucedidos por arenitos e pelitos.

No que se refere as principais estruturas sedimentares identificadas nas fácies sedimentares, de acordo com a literatura (e. g., MIALL, 1977a; TUCKER, 2003) arenitos associados a depósitos de preenchimento de canal ocorrem como formas de leito depositadas sob fluxo unidirecional em regime de fluxo inferior.

Neste sentido, as estratificações cruzadas, a exemplo do que se observa nas fácies Aa e At reconhecidas nesta associação, se depositaram pela migração de dunas de crista sinuosa e reta (respectivamente), segundo o modelo propostos por Miall (1977a, 2006) e apresentam padrão de paleocorrentes para SW.

De acordo com Abinader (2008), as medidas de paleocorrentes para sudoeste obtidas em afloramentos da Formação Alter do Chão nas margens do Rio Amazonas são coincidentes com um sistema fluvial pretérito que fluía em direção ao Oceano Pacífico. Almeida (1974, apud POTTER, 1997) denominou este sistema fluvial como “Sanozama”, em referência à grafia de Amazonas ao contrário.

Em menor escala, as laminações cruzadas, a exemplo do identificado na fácies Al, se depositaram pela migração de marcas de ondas assimétricas sob alternância entre tração (produzindo as laminações cruzadas) e suspensão (responsável pela deposição dos finos preservando o *stoss-side*).

No entanto, a textura maciça indicativa da fácies Am pode ser interpretada, de acordo com o modelo de Miall (2006), como um depósito resultante de colapso de banco arenoso dentro do canal, no qual, em função da rápida sedimentação, não houve tempo suficiente para o desenvolvimento de estruturas internas.

A respeito da presença de marcas de raiz na fácies Aa, estas são indicativas de crescimento vegetal *in situ*, o que Tucker (2003) propões que sejam indicativas de exposição subaérea e desenvolvimento de paleossolo. Dessa forma, em concordância com as interpretações de Morais & Rocha (2016), a exposição de barras arenosas centrais pode estar relacionada a períodos de vazante<sup>1</sup>, no qual os depósitos de barras centrais ficam expostos no leito.

Assim, em comparação com os estudos desenvolvidos acerca de depósitos análogos em sistema fluvial (e. g., ALLEN, 1965, FIELDING, 1986; GHAZI & MOUNTNEY, 2009; GULLIFORD *et al.*, 2017; MENDES *et al.*, 2012), a sucessão representativa desta associação engloba alguns dos elementos diagnósticos para o reconhecimento de depósitos de preenchimento de canal, dentre os quais destacam-se a presença de arenitos e conglomerados organizados em ciclos granodecrescentes ascendentes, padrão de paleocorrente unidirecional e as formas de leito com estratificações e laminações.

### **Lagos de planície de inundação**

Os **depósitos de lagos** são caracterizados pela associação das fácies **Pelito com laminação cruzada cavalgante** (Pl) e **pelito maciço** (Pm), e sua espessura podem apresentar 2 m.

Segundo Basilici (2000) e Gulliford *et al.* (2017), lagos de planície de inundação são formados pela deposição por suspensão de partículas finas, a exemplo das fácies Pl e Pm, em áreas topograficamente rebaixadas dentro da planície de inundação, geralmente pouco drenados.

O reconhecimento de superfícies de paleossolos em exposições no afloramento Ponta das Lajes, Manaus – AM, em trabalhos anteriores (e. g., PALMA, 2014; VIEIRA, 2002) corroboram as interpretações de uma superfície de paleossolo no presente estudo, no qual a presença de feições pedogenéticas e de bioturbação

nestes depósitos, em concordância com as interpretações de Retallack (2001), são indicativas de exposição subaérea.

<sup>1</sup>Esta exposição subaérea pode se dar em função da exposição do fundo do lago ao secar durante períodos de vazante, a partir da qual formam-se estruturas pedogenéticas associadas a umidade do solo composto por argilas expansivas, conforme abordado por Gray & Nickelsen (1989) e Retallack (2001), a exemplo das superfícies de fricção (*slickensides*) e de gretas de ressecamento.

Quanto a presença de bioturbações nestes depósitos, Retallack (2001) sugere que as concentrações de traço-fósseis, tais como paleotocas, também podem ser empregadas no reconhecimento do topo de paleossolos, uma vez que estas estruturas registram períodos de redução ou não deposição nos quais os sedimentos estavam sendo retrabalhados pelos organismos. Este processo pode ser exemplificado, por Nascimento *et al.* (2017b), pelo reconhecimento de paleotocas de lagostins que ocorrem nos paleossolos da Formação Marília (Cretáceo Superior, Bacia Bauru) em Minas Gerais (MG), em depósitos associados a planície de inundação.

Neste contexto, considerando depósitos análogos de lagos de planície de inundação em sistemas fluviais (*e. g.*, BASILICI, 2000; GULLIFORD *et al.*, 2017; NASCIMENTO *et al.*, 2017b) a sucessão representativa desta associação engloba alguns dos elementos diagnósticos para o reconhecimento de depósitos, a exemplo da sedimentação por suspensão das fácies pelíticas e evidências de exposição subaéreas, associadas a um nível de paleossolo, tais como gretas de ressecamento e superfícies de fricção pedogenéticas, além da presença de paleotocas.

### ***Crevasse splay***

Os depósitos de ***crevasse splay*** são caracterizados pela associação das fácies **conglomerado maciço (Cm)**, **arenito com estratificação cruzada acanalada (Aa)**, **arenito com estratificação cruzada tabular (At)**, **Pelito com laminação cruzada cavalgante (Pl)** e **Pelito maciço (Pm)**. Estes depósitos podem apresentar 2,30 m de espessura.

De acordo com Miall (1992) e Tucker (1991), a sedimentação desta associação pode ser interpretada como depósitos formados pelo rompimento da margem de canal, no qual os sedimentos provenientes do preenchimento de canal adentram a planície de inundação, a partir do qual, segundo Miall (2006), os

---

<sup>1</sup>O termo vazante se refere aos períodos hidrológicos nos quais o nível de água no rio diminui.



sedimentos são depositados como resultado da expansão e diminuição da energia do fluxo, à medida que se espalha como inundações na planície.

Neste sentido, as fácies associadas ao preenchimento de canal se depositam por fluxos hiperdensos (Cm) e por migração de dunas sob fluxo unidirecional (paleocorrente para SW) em regime de fluxo inferior (Aa e At), enquanto que a fácies associada aos depósitos de lago (Sl) se depositam por suspensão alternada com tração, de modo que as estratificações e laminações cruzadas geradas são consideradas estruturas comuns em depósitos de *crevasse splay* em Miall (2006).

Além disso, nesta associação identificam-se ciclos granodecrescente ascendentes incompletos, além de ciclo granocrescente ascendente no qual a sequência pelítica (Pl) e arenosa (Aa e At) é sucedida por depósito residual de conglomerados (Cm). A deposição deste ciclo, segundo Miall (2006), se deve à progradação no *crevasse splay*, no qual a granulometria dos sedimentos tende a diminuir para porções mais afastadas do canal principal.

### 5.1.3 Sistema deposicional

As análises faciológicas das rochas que afloram em Ponta das Lajes, Manaus-AM, resultaram no reconhecimento de depósitos de preenchimento de canal e de planície de inundação dentro de um sistema fluvial, o que, em concordância com trabalhos anteriores realizados na Formação Alter do Chão, pode ser associado a um padrão fluvial meandrante (e. g., DINO *et al.*, 1999; MENDES *et al.*, 2012) ou entrelaçado (e. g., HORBE *et al.*, 2006; NOGUEIRA *et al.*, 2003).

Do ponto de vista deposicional, Miall (1977a) estabelece critérios para diferenciar os depósitos associados a rios de padrão meandrante do entrelaçado, porém ressalta que em alguns casos a diferença entre estes rios e seus depósitos pode ser sutil. Nesse sentido, Miall (1985, 2006) sugerem que todos os depósitos fluviais são compostos por proporções diferentes de elementos arquiteturais, a exemplo dos depósitos de acreção lateral e finos de planície de inundação. Além disso, segundo Allen (1965), os ciclos granocrescente ascendentes também se desenvolvem em ambos os rios, embora sua origem possa ser diferente.

No que se refere a área de estudo, a sucessão está organizada em ciclos, dentre os quais os ciclos granocrescente ascendentes são dominantes e marcam uma elevada migração lateral, ainda que a maioria destes ciclos estejam incompletos. No entanto, considerando a proporcionalidade entre depósitos de preenchimento de canal e planície de inundação, é observada pouca representatividade de finos de planície

de inundação (e. g., pelitos), o que confere a esta sucessão ciclos dominados por sedimentação arenosa.

O levantamento de medidas de paleocorrentes, conforme sugerido por Miall (1981), é um critério de diferenciação entre rios meandrantés e entrelaçados. Segundo Riccomini & Coimbra (1993), o fator consistência do vetor de paleocorrentes é mais elevado em barras de canais entrelaçados, apresentando menor dispersão, em relação aquelas obtidas em barras de pontal em rios meandrantés.

Na área estudada, o levantamento de medidas de paleocorrentes em *sets* de estratificações cruzadas de depósitos de preenchimento de canal apresentam padrão unimodal para SW (média de 218,3° Az) e baixa dispersão, o que, segundo Semeraro (2019) e Tucker (2003), apresenta maior afinidade com os padrões identificados em depósitos de rios entrelaçados, pois os canais apresentam a maioria de suas direções fluindo com valores próximos ao da direção do vetor principal.

Nos depósitos de *crevasse splay*, medidas de paleocorrentes em *sets* de estratificações cruzadas apresentam padrão unimodal para SW (média de 218,3° Az), o que é coincidente com o levantamento de paleocorrentes nos depósitos de preenchimento de canal e indicam uma sinuosidade do canal, no qual o depósito de *crevasse splay*, ao invés de ser ortogonal ao canal principal, flui no mesmo quadrante que o canal principal.

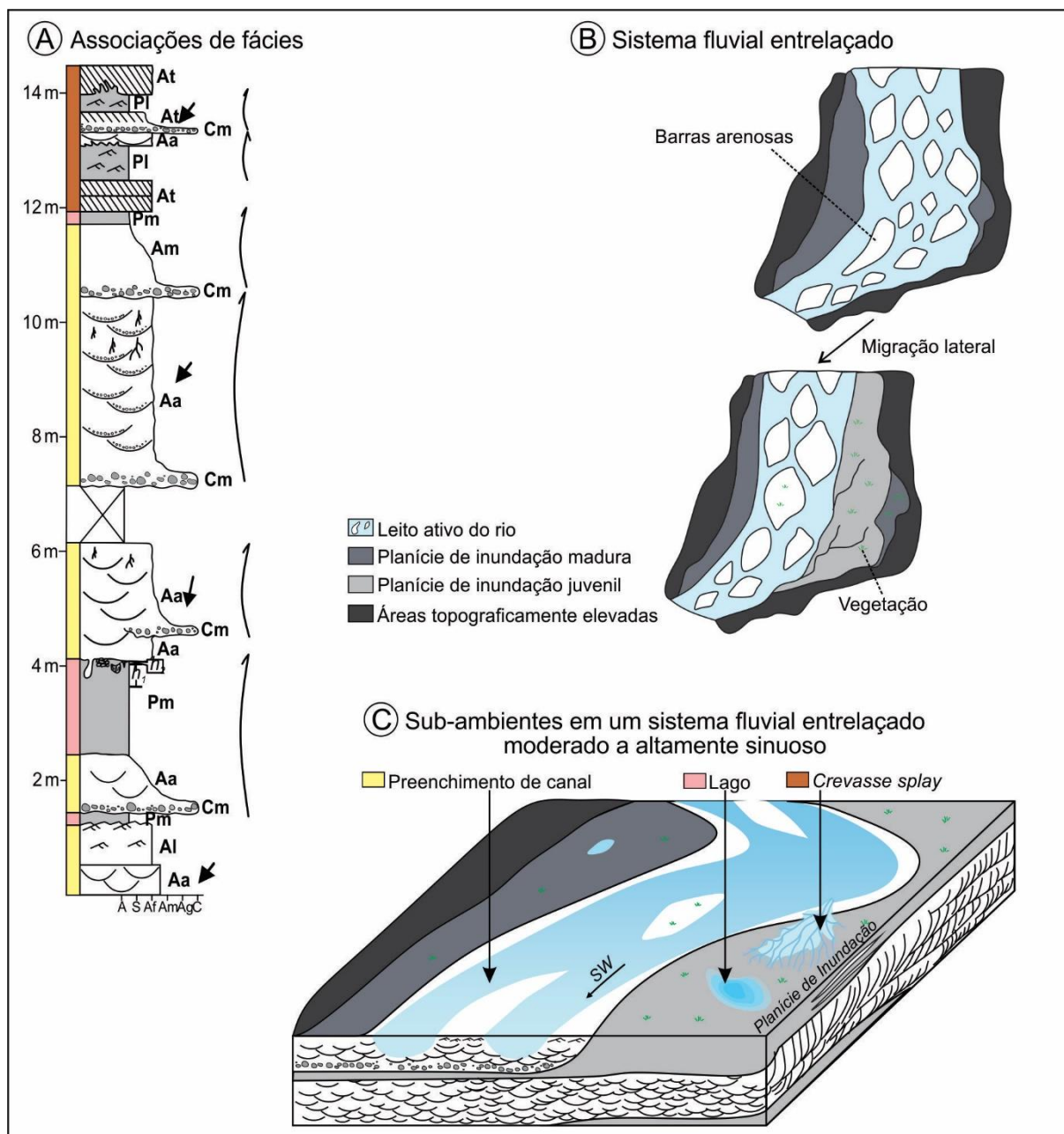
Além disso, dentre os critérios para o reconhecimento de depósitos de rios entrelaçados propostos por Ore (1964), destaca-se as características internas de *foresets* em depósitos de barras, como mudanças no tamanho dos grãos em estratos cruzados, resultando na segregação de grânulos e seixos com geometria acunhada em *foresets*, como também identificado em *sets* da fácies Aa na área de estudo.

Dessa forma, a partir comparação entre as características da sucessão estudada e os modelos deposicionais fluviais propostos na literatura (e. g., MIALL, 1977a; 2006), apesar da semelhança entre depósitos associados principalmente a rios meandrantés e entrelaçados, interpreta-se que as rochas da Formação Alter do Chão no afloramento Ponta das Lajes, Manaus – AM, foram depositadas em um sistema fluvial e apresentam canalizações com estilo entrelaçado (*braided*) de moderada a alta sinuosidade.

E embora uma única sucessão sedimentar não possa ser considerada representativa de toda unidade, com base nas análises faciológicas em rochas da Formação Alter do Chão na área de estudo, a reconstituição do sistema fluvial

proposta no modelo deposicional é representado por um rio de padrão entrelaçado moderadamente sinuoso (FIGURA 16).

De acordo com as associações de fácies definidas neste estudo (FIGURA 16A), propõem-se que o desenvolvimento de planícies de inundação pode ocorrer por abandono do leito do rio, durante a migração lateral de um canal fluvial com padrão entrelaçado (FIGURA 16B), no qual estão associados os subambientes de *crevasse splay* e lagos, conforme ilustrado no bloco diagrama (FIGURA 16C).



**Figura 16** – Sistema fluvial com canalizações de estilo entrelaçado. A) Perfil colunar com associações de fácies propostas para a Formação Alter do Chão em Ponta das Lajes, Manaus – AM; B) Sistema fluvial entrelaçado com desenvolvimento de planície de inundação a partir da migração lateral do canal (modificado de GRAY & HARDING, 2007); C) Bloco diagrama de um sistema fluvial entrelaçado com subambientes deposicionais de preenchimento de canal e planície de inundação (modificado de GRAY & HARDING, 2007).

## 5.2 Análise de Icnofósseis

A análise dos icnofósseis identificados no afloramento Ponta das Lajes, Manaus-AM, resultou na caracterização de dois grupos de icnofósseis com arquitetura distinta, o primeiro corresponde a estruturas cilíndricas a subcilíndricas de arquitetura simples e o segundo é constituído por estruturas tubulares em complexas galerias.

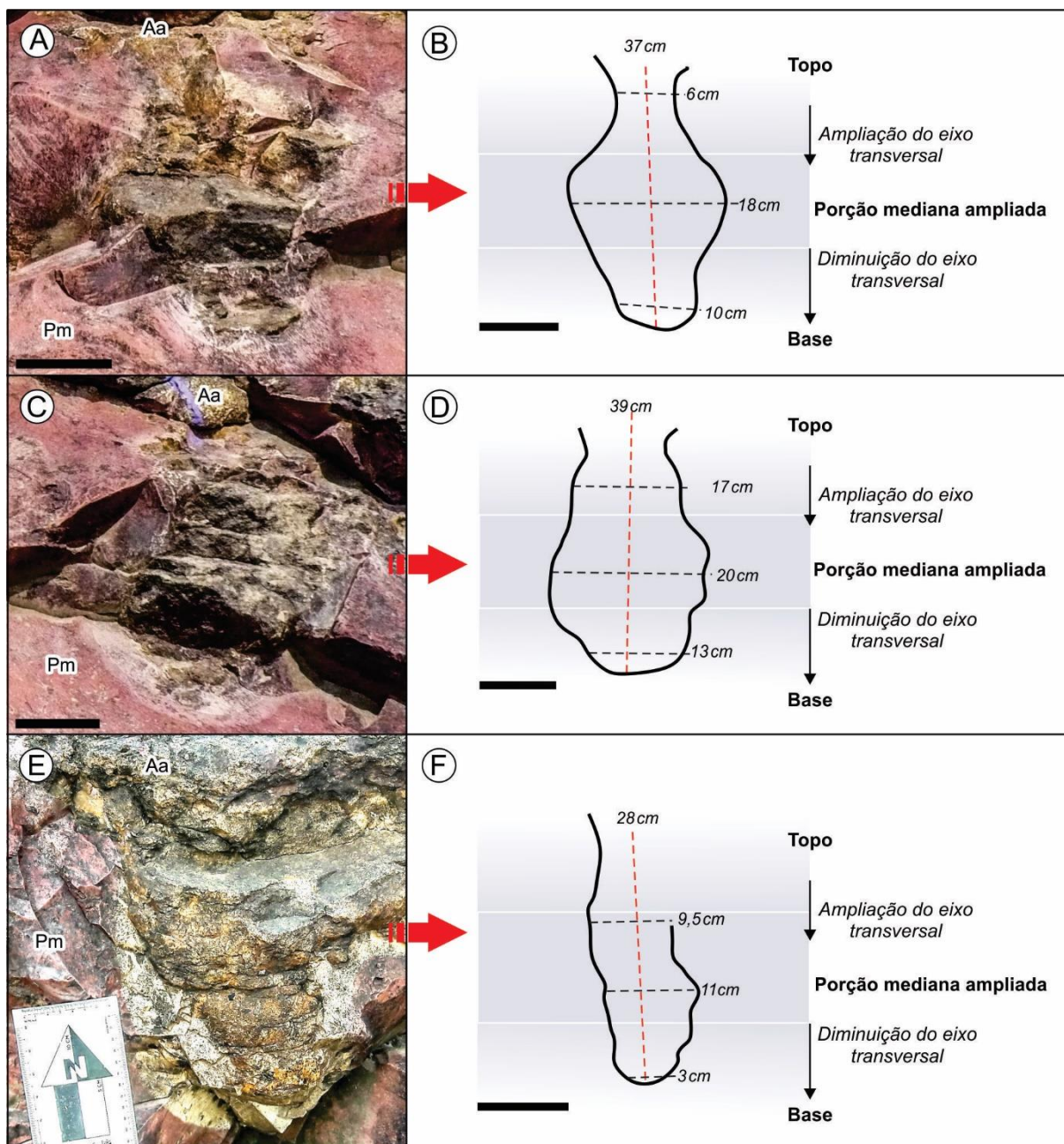
Com base nos critérios de descrição de diferentes categorias de icnofósseis, as estruturas cilíndricas a subcilíndricas de arquitetura simples foram interpretadas como **paleotocas**, uma vez que, além destas características, apresentam uma orientação sub vertical em relação ao acamamento, entrada indistinta, terminação arredondada e, principalmente, variação do diâmetro ao longo da estrutura, o que é condizente com estruturas de escavações produzidas para habitação temporária ou permanente, como descritas na literatura (e. g., FREY, 1975; LUCAS *et al.*, 2006; HASIOTIS *et al.*, 2007).

Quanto as estruturas tubulares, seguindo os critérios propostos na literatura para identificação de estruturas relacionadas a raízes (e. g., KLAPPA, 1980; GREGORY *et al.*, 2004), estas foram interpretadas como **rizólitos**, principalmente por apresentarem um eixo principal com orientação vertical e ramificações laterais com orientação horizontalizada, ramificações dicotômicas (em forma de Y) com junções que não se ampliam e diminuição do diâmetro em direção à terminação de cada ramificação.

### 5.2.1 Paleotocas

As paleotocas, via de regra, ocorrem no topo da fácies Pm e apresentam preenchimento maciço por areia fina a média condizente com a camada sobreposta (Fácies Aa), orientação sub vertical, superfície lisa a segmentada, terminações inferiores arredondadas e terminações superiores indistintas (FIGURA 17).

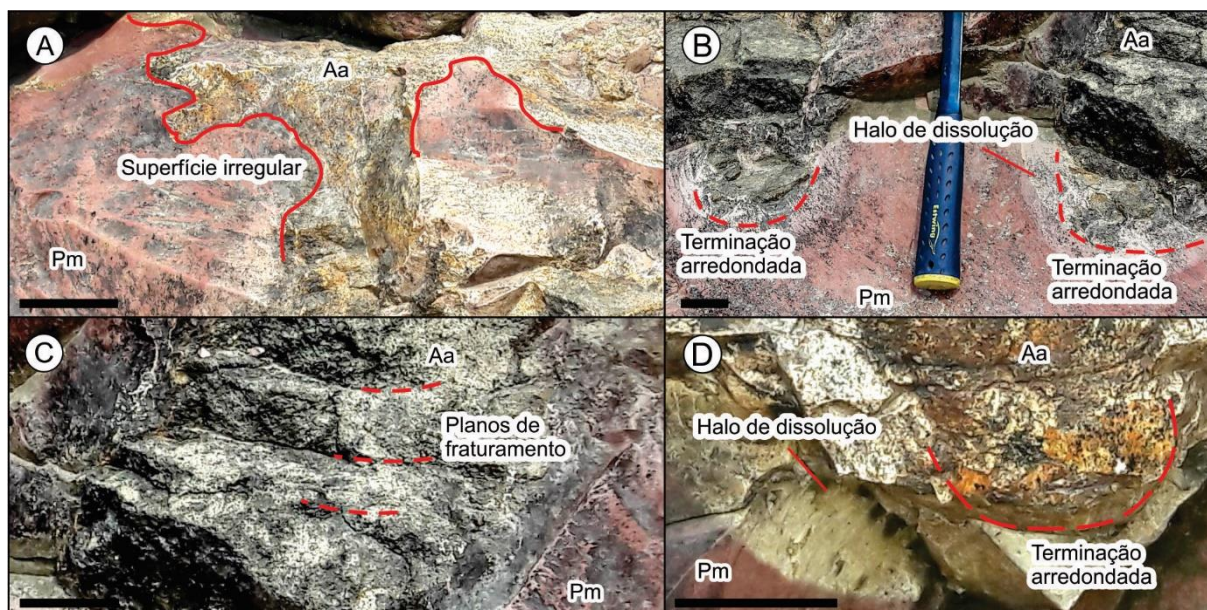
Em vista longitudinal (FIGURA 17A, 17C e 17E), apresentam arquitetura simples, orientação sub vertical e forma cilíndrica a subcilíndrica. O comprimento, a partir da base, varia entre 28 e 39 cm (média de 34 cm). Em seção transversal, possuem contorno arredondado e, em média, diâmetro de 7,1 cm no topo, 14,7 na porção mediana e 8 cm na base. O maior diâmetro observado, ocorre, em geral, na forma de uma ampliação na porção mediana da escavação, uma vez que todos os exemplares apresentam uma ampliação gradual do eixo transversal ao meio da estrutura e diminuição em direção à base, como demonstrado nos desenhos esquemáticos nas Figuras 17B, 17D e 17F.



**Figura 17** – Paleotocas. A, C e E) Vista longitudinal paleotocas sub verticalizadas, com arquitetura morfológica simples e seus respectivos desenhos esquemáticos (B, D e F), no qual foram destacadas as porções de topo, mediana e de base das estruturas, bem como a variação do eixo transversal. *Escala gráfica = 10 cm.*

As paleotocas apresentam uma superfície irregular, com entrada indistinta (FIGURA 18A) e terminação com forma arredondada (FIGURA 18B e 18D). Ao longo das paleotocas, são observadas marcas de segmentações transversais ao eixo principal, com espessura entre 2 e 3 cm, consideradas planos de faturamento preferenciais destas estruturas (FIGURA 18C).

Halos de descoloração com espessura entre 2 e 8 cm, aqui relacionados à processos de dissolução das extremidades da estrutura, envolvem irregularmente as paleotocas, destacando o contorno preexistente (FIGURA 18B e 18D).



**Figura 18** – Destaque de porções das paleotocas. A) Superfície irregular do topo da estrutura, o que oblitera a identificação da entrada da paleotoca; B) Terminações arredondadas da base da paleotoca e halos de dissolução; C) Segmentações ao longo da paleotoca atribuídos aos planos de faturamento preferenciais; D) Halo de dissolução esbranquiçado que envolvem irregularmente a paleotoca e base arredondada. *Escala gráfica = 5 cm.*

Além destes exemplares, na fácies Pm é possível observar em seção transversal numerosas estruturas circulares a semicirculares angulosas as quais foram aqui interpretadas também como paleotocas (FIGURA 19A). Em seção transversal, são observados principalmente os contornos que podem ser arredondados com diâmetro médio de 3 cm (n=9), angulosos e elípticos, com eixos menores de 2,7 cm em média e eixos maiores de 4,8 cm (n=5) em média.

Lateralmente, os fragmentos apresentam variação de espessura entre 0,6 e 1,4 cm e apresentam forma tanto de disco como arredondada (FIGURA 19B), e a observação destas estruturas *in situ* apontou para uma reconstituição do dos fragmentos em uma estrutura tubular cilíndrica (FIGURA 19C).



**Figura 19** – Paleotocas. A) Vista em planta das paleotocas, próximo ao contato (tracejado em branco) entre as fácies Aa (sobreposta) e Sb (sotoposta), com setas indicando alguns exemplares; B) Variedade de formas observadas nos fragmentos atribuídos à paleotocas; C) Fragmentos empilhados em forma de cilindro. *Escala gráfica = 2 cm.*

Interpretações e discussões: Registros de escavações de vertebrados e invertebrados são comuns em depósitos continentais ao longo do Fanerozoico (*e. g.*, HASIOTIS *et al.*, 1993; HASIOTIS *et al.*, 2004; HASIOTIS & BOWN, 1992; HEMBREE *et al.*, 2004; GROENEWALD, 1991, entre outros), e, conforme observado por Hasiotis *et al.* (2007), estas estruturas são morfologicamente semelhantes e podem ser confundidas entre si.

Neste sentido, Lucas *et al.* (2006) distinguem paleotocas de vertebrados a partir de um conjunto de características que compreendem a arquitetura inclinada e discordante ao acamamento; a seção transversal com forma circular à elíptica; o contraste do preenchimento da paleotoca com a rocha hospedeira; o revestimento interno; a presença de marcas de unhas; uma ou mais entradas na superfície; e a presença de câmaras terminais, ainda que hajam paleotocas de câmara terminal ausente (*e. g.*, MILLER *et al.*, 2001; ROMER & OLSON, 1954).

A depender de sua geometria, as paleotocas podem ser confundidas com estruturas inorgânicas, como aquelas resultantes de sobrecarga (*e. g.*, *ball-and-pillow*), formadas pelo afundamento de areia dentro de sedimentos menos densos e

pelo rompimento de massas de geometria arredondada a adelgada, as quais Tucker (2003) e Rossetti (1999) caracterizam como estruturas de morfologia ampla, sinclinal ou concêntrica. Nesse sentido, as paleotocas identificadas neste estudo se distinguem de estruturas de sobrecarga por apresentarem, principalmente, arquitetura simples e cilíndrica.

Ainda que diferentes critérios sejam empregados na identificação e classificação de paleotocas, assim como em outros icnofósseis, a ausência de registros fósseis corpóreos associada ao icnofóssil pode muitas vezes ser considerada um empecilho tanto para o seu reconhecimento quanto para o do organismo gerador.

Apesar disso, graças a consecutiva ampliação do registro paleoicnológico, hoje já são reconhecidos caracteres morfológicos diagnósticos de um grande número de icnofósseis, não sendo diferente para as paleotocas.

No que se refere às paleotocas, segundo Hasiotis *et al.* (2007) a interpretação do produtor de uma paleotoca baseia-se, primeiramente, no estabelecimento de comparações morfológicas com animais existentes e suas tocas.

Neste sentido, inúmeros registros de paleotocas continentais (*e. g.*, BORDY & KRUMECK, 2016; KRAPOVICKAS *et al.*, 2013; LUCAS *et al.*, 2006; MARTIN, 2009; VOIGT *et al.*, 2011; MILLER *et al.*, 2001; SIDOR *et al.*, 2008; VARRICCHIO *et al.*, 2007, entre outros) têm sido atribuídos a diferentes grupos de invertebrados (*e. g.* crustáceos) e vertebrados (*e. g.*, répteis, anfíbios, peixes, mamíferos, aves), amplamente reconhecidos como produtores de tocas.

Considerando o registro conhecido de paleotocas em paleoambientes correlatos ao interpretado para a área de estudo (a saber planície de inundação fluvial), segundo Miller *et al.* (2001), escavações do tipo paleotoca neste ambiente são mais comumente atribuídas a crustáceos e peixes dipnoicos, embora registros de paleotocas de tetrápodes em depósitos de planície de inundação também sejam descritas na literatura (*e. g.*, GROENEWALD *et al.*, 2001; LUCAS *et al.*, 2006; MILLER *et al.*, 2001; MODESTO & BOTHA -BRINK, 2010; VARRICCHIO *et al.*, 2007).

Assim, a comparação entre paleotocas registradas em ambientes continentais durante Mesozoico foi uma alternativa importante para a identificação dos produtores de paleotocas deste estudo, pois constituiu a base para o reconhecimento de caracteres morfológicos usualmente empregados como diagnósticos no reconhecimento deste icnofóssil (*e. g.*, arquitetura, largura, comprimento).



Neste contexto, visando fornecer uma visão geral, dos critérios morfológicos utilizados na comparação do material estudado com os de outros trabalhos, bem como de uma síntese das principais características de paleotocas atribuídas a crustáceos, tetrápodes e peixes dipnoicos, particularmente aquelas registradas em depósitos de planície de inundação do Mesozoico, é abaixo apresentada a Tabela 4, seguida de uma breve descrição e de ilustrações pertinentes (FIGURA 20).

**Tabela 4** – Principais características de paleotocas continentais registradas em ambientes continentais do Mesozoico.

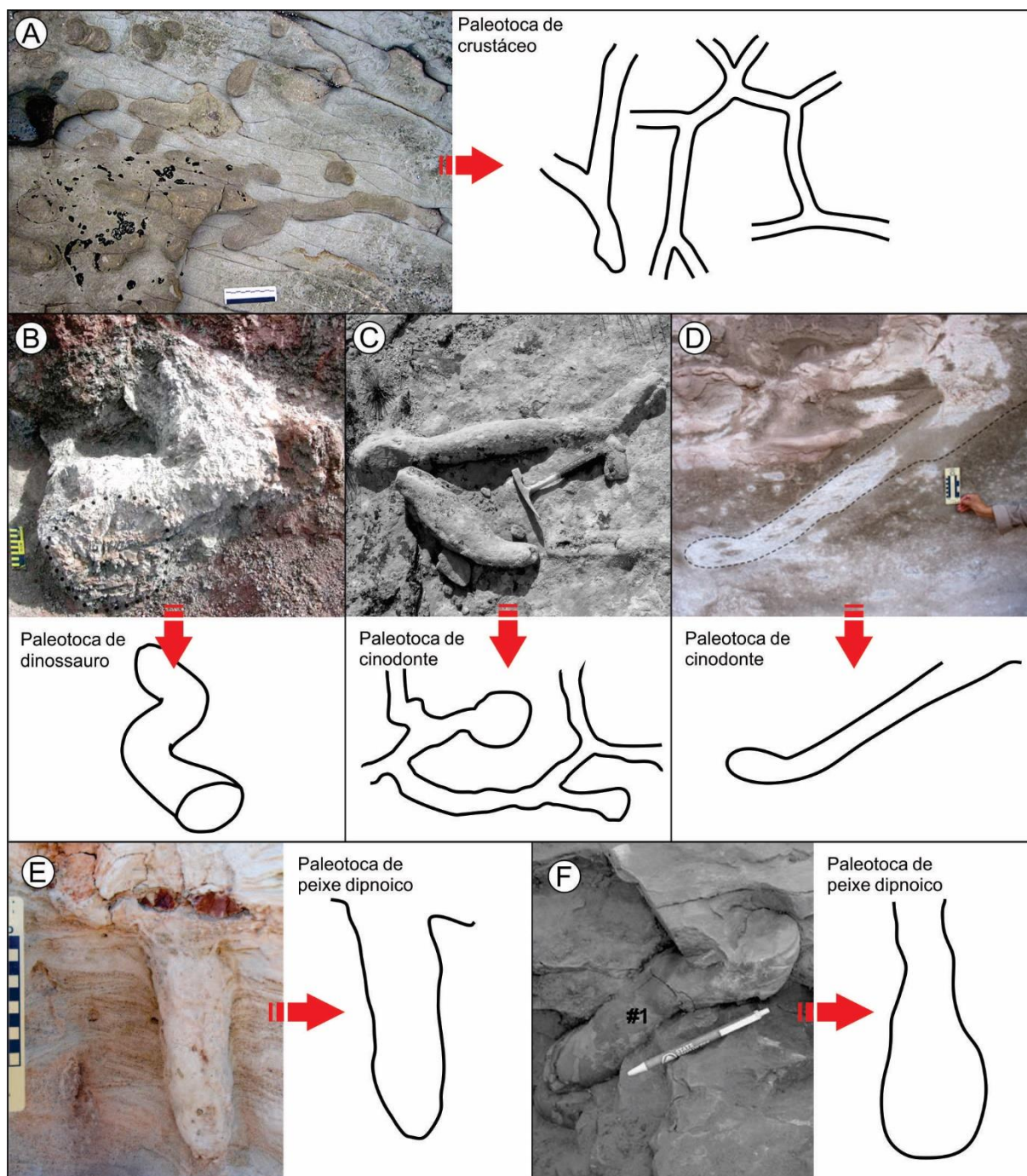
Organismos produtores		Astacidea (Crustáceo)	Terapsídeos			Dinos- sauros	Peixes dipnoicos	
			Indeter- minado	Dicinodontes	Cinodontes			
Autor(es)	Este Trabalho	Hasiotis & Mitchell (1993)	Miller <i>et al.</i> (2001)	Modesto & Botha-Brink (2010)	Lucas <i>et al.</i> (2006)	Varricchio <i>et al.</i> (2007)	Marshall & Rogers (2012)	
Idade	Cretáceo	Triássico	Triássico	Triássico	Jurássico	Cretáceo	Cretáceo	
Unidade (Formação)	Alter do Chão	Chinle	Fremouw	Balfour	Navajo Sandstone	Blackleaf	Maevarano	
Ocorrência	Brasil	E.U.A.	Antártica	Áfricado Sul	E.U.A.	E.U.A.	Madagascar	
Principais caracteres morfológicos	Arquitetura	Simples, cilíndrica, retilínea a levemente inclinada	Simples a galerias	Inclinada, retilínea a curva	Simples, relativamente retilínea	Cilíndrico, inclinada, em complexas galeria	Inclinada a sinuosa	Simples, retilínea
	Formato	Circular a elíptica	Circular	Achatado	Arredondado	Sub-circular, bilobada	Achatado	Circular, elíptica e em forma de 8
	Orientação	Sub-vertical	Vertical com componentes na horizontal	Sub-horizontal	Sub-horizontal	Horizontais ou raramente verticais	-	Sub-vertical
	Diâmetro (cm)	2,7–15,6	0,5–12,5	8–19	12–34	10–20	30–35	2–15
	Comprimento (cm)	20–40	24–200	8–25	Indeterminado	Indeterminado	~115	6–70
	Terminação	Arredondada e estreitada	Arredondada	Arredondada	Arredondada e ampliada	Arredondada e ampliada	Arredondada e ampliada	Arredondada e estreitada
	Câmara terminal	Ausente	Presente	Presente	Presente	Presente	Presente	Ausente
	Ramificação	Ausente	Múltipla	Raro	Ausente	Múltipla	Presente	Ausente

No que se refere as paleotocas produzidas por crustáceos (FIGURA 20A), diversos estudos voltados a caracterização da sua morfologia a partir da comparação com tocas modernas (*e. g.*, BAUCON *et al.*, 2014; HASIOTIS *et al.*, 1993; HASIOTIS & MITCHELL, 1993; MARTIN *et al.*, 2008), caracterizam-nas como estruturas verticalizadas a sub horizontalizadas de arquitetura variada (desde simples até galerias complexas com várias ramificações e câmaras), com uma extensa variedade de comprimentos e diâmetros (comumente menores que 10 cm) e com seções transversais, preferencialmente, circulares. Além disso, sua superfície é frequentemente marcada por arranhões ou revestimentos lamosos. Considerando os caracteres morfológicos de paleotocas produzidas por crustáceos (*vide* HASIOTIS *et al.*, 1993; MARTIN *et al.*, 2008), as paleotocas deste estudo se distinguem destas, principalmente, por apresentarem arquitetura simples, orientação sub vertical e terminação arredondada com diminuição do diâmetro.

Quanto as paleotocas produzidas por tetrápodes (FIGURAS 20B, 20C, 20D), distintos estudos acerca da caracterização morfológica de paleotocas e da correlação com tetrápodes atuais (*e. g.*, BORDY *et al.*, 2017; GROENEWALD *et al.*, 2001; LUCAS *et al.*, 2006; MARTIN, 2009; MILLER *et al.*, 2011; MODESTO & BOTHA-BRINK, 2010; VARRICCHIO *et al.*, 2007) descrevem-nas como estruturas de arquitetura simples, sinuosas a helicoidal (GROENEWALD, 1991; SMITH, 1987; VARRICCHIO *et al.*, 2007) ou em galerias complexas (COLOMBI *et al.*, 2012; GROENEWALD *et al.*, 2001; VOIGT, 2011), com orientação preferencialmente sub-horizontal e raramente sub vertical e dotadas de câmaras terminais. De acordo com estes caracteres morfológicos, as paleotocas deste estudo distinguem-se destas por apresentarem uma forma com tendência cilíndrica, orientação sub vertical, terminação arredondada e variação longitudinal do diâmetro configurando três porções.

No que diz respeito aos peixes dipnoicos (FIGURA 20E e 20F), verifica-se que gêneros modernos produzem tocas para estivação (*vide* GAILLARD *et al.*, 2013; HASIOTIS *et al.*, 1993; HASIOTIS *et al.*, 2007) e em comparação com paleotocas registradas durante o Mesozoico (*vide* DUBIEL *et al.*, 1987; MARSHALL & ROGERS, 2012) destacam-se pela arquitetura simples e cilíndrica e por geralmente apresentarem orientação vertical a sub vertical. Podem ainda exibir variação de diâmetro da base (mais larga) para o topo (mais estreita) em seção transversal (*e. g.*, SURLYK *et al.*, 2008), possuir terminação arredondada com forma similar à de um tubo de ensaio (*e. g.*, GOBETZ *et al.*, 2006), em direção à base ser ligeiramente mais larga (*e. g.*, SENNIKOV, 2018) ou mais estreita (*e. g.*, McCAHON & MILLER, 2015),

possuir segmentos transversais ao eixo principal (e. g., GOBETZ *et al.*, 2006; ROMER & OLSON, 1954) e ter entrada ou abertura comumente indistinta.



**Figura 20** – Diversidade morfológica de paleotocas do Mesozoico ilustradas na literatura. A) Paleotocas de crustáceo (MARTIN *et al.*, 2008) e sua representação esquemática em perfil; B) Paleotoca de dinossauro (VARRICCHIO *et al.*, 2007) e sua representação esquemática; C e D) Paleotocas de cinodonte (LUCAS *et al.*, 2006; KRAPOVICKAS *et al.*, 2013) e suas representações esquemáticas; E e F) Paleotocas de dipnoico (MARSHALL & RODGERS, 2012; GOBETZ *et al.*, 2006) e suas representações esquemáticas.

Nesse sentido, em comparação às paleotocas produzidas por peixes dipnoicos, os espécimes descritos neste trabalho assemelham-se pela arquitetura simples, ou seja, sem ramificações ou em forma de galerias; pela orientação sub-

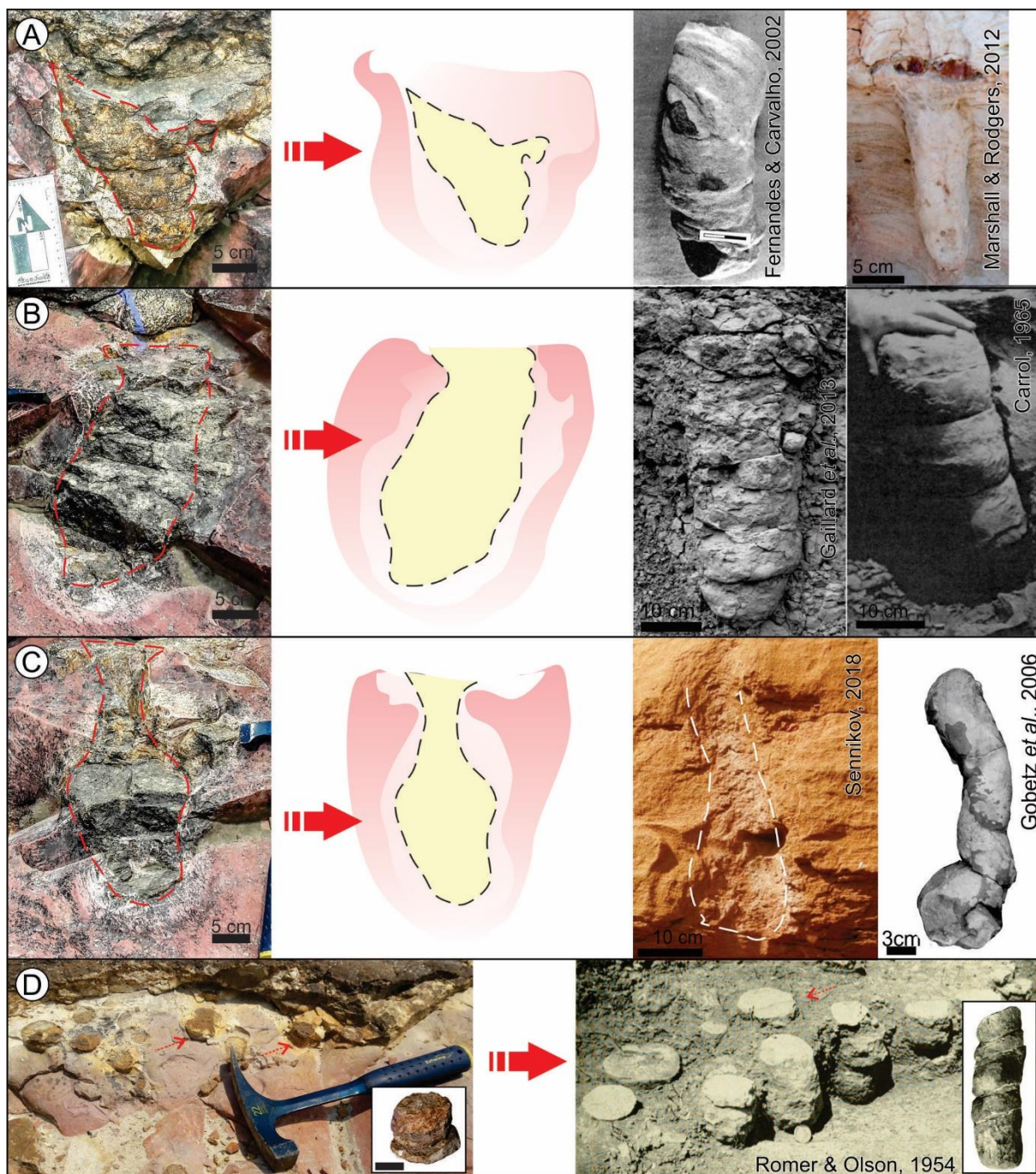
vertical das paleotocas em relação ao acamamento; pela forma cilíndrica a subcilíndrica, pela base arredondada e pela variação de diâmetro ao longo da estrutura, marcado por uma sutil ampliação na porção mediana e estreitamento em direção à terminação basal, enquanto a terminação superior é indistinta.

Além dos aspectos morfológicos, as dimensões médias inferidas (comprimento em torno de 40 cm e diâmetro entre 2,7 e 15,6 cm) também são compatíveis com aquelas descritas na literatura para paleotocas de peixes dipnoicos (e. g., DUBIEL *et al.*, 1987; GOBETZ *et al.*, 2006; MARSHALL & ROGERS, 2012; McALLISTER *et al.*, 1988), resumidas da Tabela 5, as quais comumente variam entre 10 a 70 cm de comprimento e diâmetros com eixos entre 2 e 15 cm. Esta variação em comprimento e diâmetro, Segundo Dubiel *et al.* (1987), pode ser explicado pela variação de tamanho ao longo da evolução ontogenética do peixe.

**Tabela 5** – Dimensões identificadas em algumas paleotocas de dipnoico ao longo do Fanerozoico.

Autores	Romer & Olson (1954)	Vaughn (1964)	McCahon & Miller (2015)	Dentzien-Dias <i>et al.</i> (2015)	Gobetz <i>et al.</i> (2006)	Dubiel <i>et al.</i> (1987)	Surlyk <i>et al.</i> (2008)	Marshall & Rodgers (2012)	Gaillard <i>et al.</i> (2013)
Idade	Permiano			Triássico		Cretáceo		Paleoceno	
Diâmetro (cm)	2–10	4,5–6,5	1,3–4,96	~8,2	~5,8	2–11	1–8,5 4,7–7,5	10–15,7 5–11	10–17
Comprimento (cm)	28	~23	8–10	62	6–35	25–70	30–45	15–60	45–90

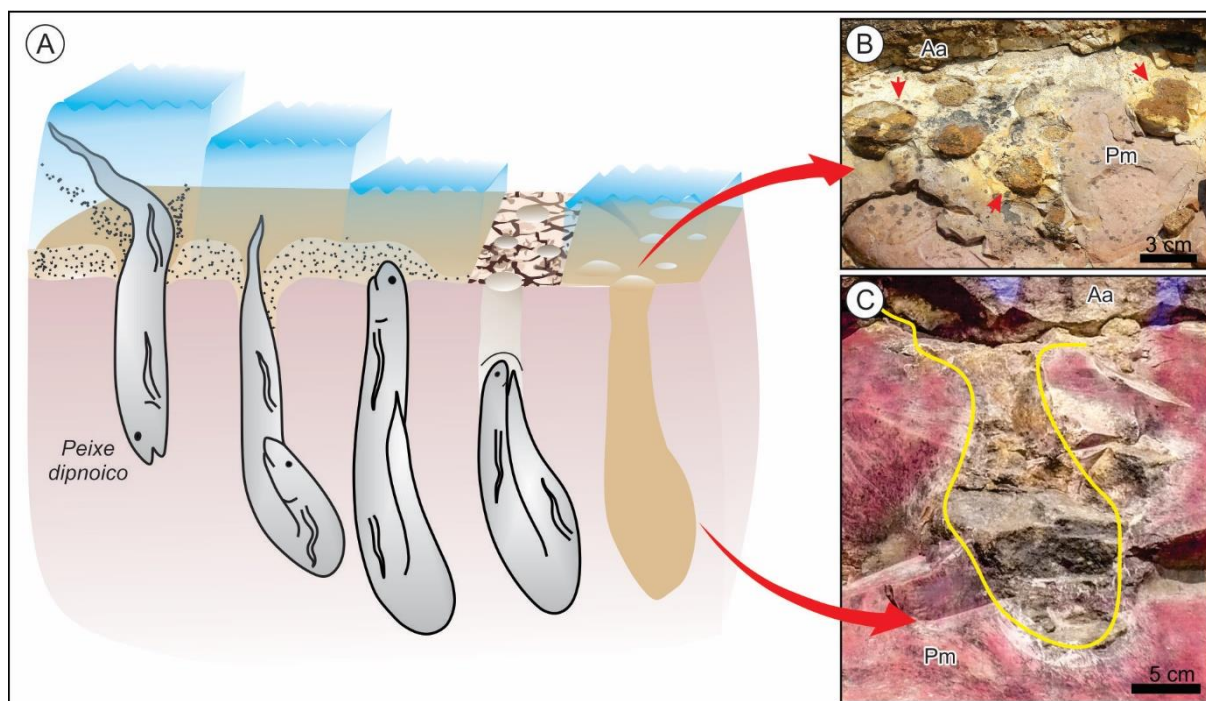
As semelhanças entre as paleotocas estudadas com registros conhecidos de paleotocas de peixes dipnoicos, tanto no Paleozoico (*vide* CARLSON, 1968; CARROLL, 1965; DENTZIEN-DIAS *et al.*, 2015; FERNANDES & CARVALHO, 2002; McCAHON & MILLER, 2015; ROMER & OLSON, 1954; VAUGHN, 1964) quanto no Mesozoico (*vide* DUBIEL *et al.*, 1987; GOBETZ *et al.*, 2006; SURLYK *et al.*, 2008; MARSHALL & RODGERS, 2012; SENNIKOV, 2018) e no Cenozoico (*vide* GAILLARD *et al.*, 2013), estão ilustradas na Figura 21.



**Figura 21** – Comparação morfológica entre as paleotocas de peixes dipnoicos. A, B, C) Paleotocas que ocorrem no afloramento Ponta das Lajes, Manaus-AM com seus respectivos esboços esquemáticos e paleotocas de dipnoicos ilustradas na literatura (CARROLL, 1965; FERNANDES & CARVALHO, 2002; GAILLARD *et al.*, 2013; GOBETZ *et al.*, 2006; MARSHALL & RODGERS, 2012; ROMER & OLSON, 1954; SENNIKOV, 2018); D) Paleotocas que ocorrem no afloramento Ponta das Lajes, Manaus-Am com paleotocas de dipnoicos ilustradas em Romer & Olson (1954), com destaque para a vista transversal e empilhamento de fragmentos em forma de disco.

Considerando a análise morfológica e comparativa das paleotocas estudadas, é possível propor uma reconstituição de como seriam estas paleotocas de peixe dipnoico (Figura 22A). Dentro deste cenário, os fragmentos em forma de disco mostrando variações de diâmetro foram aqui associados a diferentes seções transversais ao longo das paleotocas (FIGURA 22B). Em vista longitudinal foi possível

observar a arquitetura cilíndrica típica de paleotocas, bem como a forma arredondada da porção basal e a gradual ampliação do diâmetro da base para a porção mediana, um aspecto aqui interpretado como produto do movimento giratório do animal e da sua acomodação durante a fase de estivação (FIGURA 22C).



**Figura 22** – Reconstituição de paleotoca de peixe dipnoico. O desenho esquemático em (A) ilustra as fases de produção de uma toca para estivação de peixe dipnoico e as paleotocas de dipnoico no afloramento Ponta da Lajes correspondem a seção transversal (B) e a seção longitudinal (C) destas estruturas.

Os registros de restos fósseis de dipnoicos na América do Sul são relativamente frequentes na literatura (e. g., AGNOLIN, 2010; APESTEGUÍA *et al.*, 2007; CIONE *et al.*, 2007; SOTO e PEREA, 2010).

No Brasil, de acordo com de Toledo e Bertini (2005), o registro paleontológico de peixes dipnoicos é composto principalmente por placas dentárias, distinguindo-se as ocorrências das bacias do Paraná, Parnaíba, Bauru, Araripe, São Luís-Grajaú e Acre, entre as quais destaca-se o registro das espécies *Asiatoceratodus* sp. e *Ceradotus* sp. (ALVES *et al.*, 2013), *Asiatoceratodus* cf. *tiguidiensis* (CASTRO *et al.*, 2004), *Ptychoceratodus* cf. *philipsi* (RICHTER E TOLEDO, 2008), *Equinoxiodus alcantarensis* (TOLEDO *et al.*, 2011) e *Lepidosiren megalos* (SILVA SANTOS, 1987).

No que se refere a achados de paleotocas de dipnoicos na América do Sul, o Brasil dispõe de registros na Bacia do Paraná (DENTZIEN-DIAS *et al.*, 2015, FERNANDES & CARVALHO, 2002; FRANCISCHINI *et al.*, 2018) e na Bacia do Araripe (BARRETO JUNIOR *et al.*, 2018). Desta forma, as paleotocas apresentadas

neste estudo correspondem ao primeiro registro da ocorrência de peixes dipnoicos na Bacia do Amazonas.

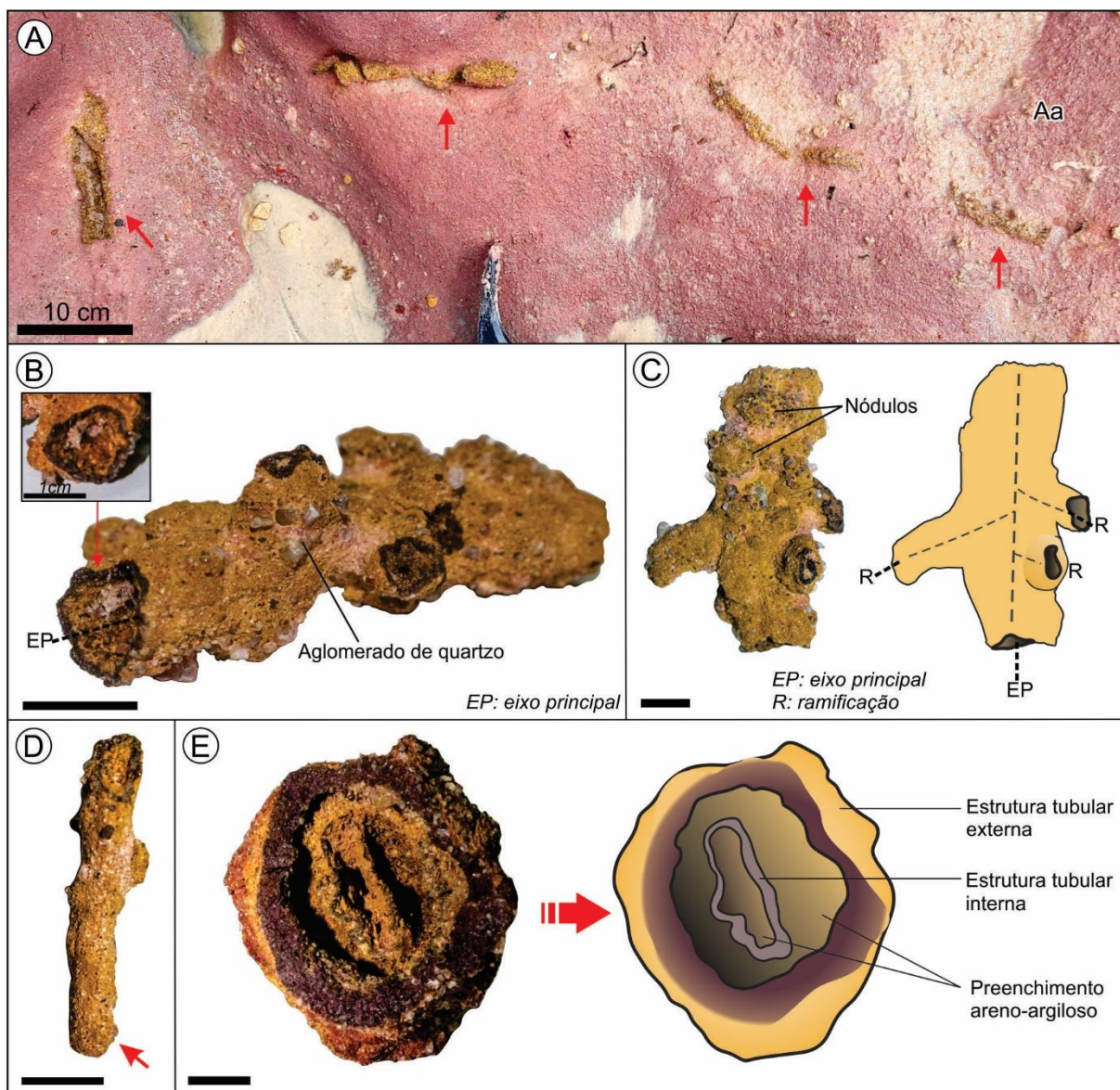
### 5.2.2 Rizólitos

Os rizólitos constituem estruturas tubulares e cilíndricas, retilíneas a levemente sinuosas, orientadas preferencialmente na posição horizontal e ocorrem em camadas da fácies Aa. Apresentam, comumente, ramificações dicotômicas (forma de Y), seção transversal circular a subcircular e diâmetros variáveis ao longo de um eixo principal, tendendo a diminuir em direção à terminação. No que se refere ao modo de preservação destes icnofósseis, destacam-se três tipos de rizólitos:

No primeiro tipo de rizólito (**RT1**), as estruturas tubulares apresentam cor amarelada e orientação horizontal (FIGURA 23A), são envolvidos por halos difusos e esbranquiçados e por uma crosta mineral composta por um aglomerado mal selecionado de grãos de quartzo e matriz fina (FIGURA 23B), que formam uma superfície irregular a nodular (FIGURA 23C).

Em seção transversal são subcirculares e possuem diâmetros variando entre 0,5 e 5,5 cm (FIGURA 23B), no qual os menores diâmetros correspondem às ramificações a partir do eixo principal (FIGURA 23C) e à terminação da estrutura (FIGURA 23D).

O preenchimento dos tubos pode ser total ou parcial, porém a presença de uma estrutura tubular concêntrica foi observada no interior de um fragmento maior do tubo (FIGURA 23E), onde é possível observar também a parede interna da estrutura tubular externa, que apresenta a mesma textura da superfície. A estrutura tubular interna apresenta contorno irregular achatado, coloração acinzentada, sem preenchimento, eixos transversais de 0,5 a 2 cm e, possivelmente correspondente ao material radicular.



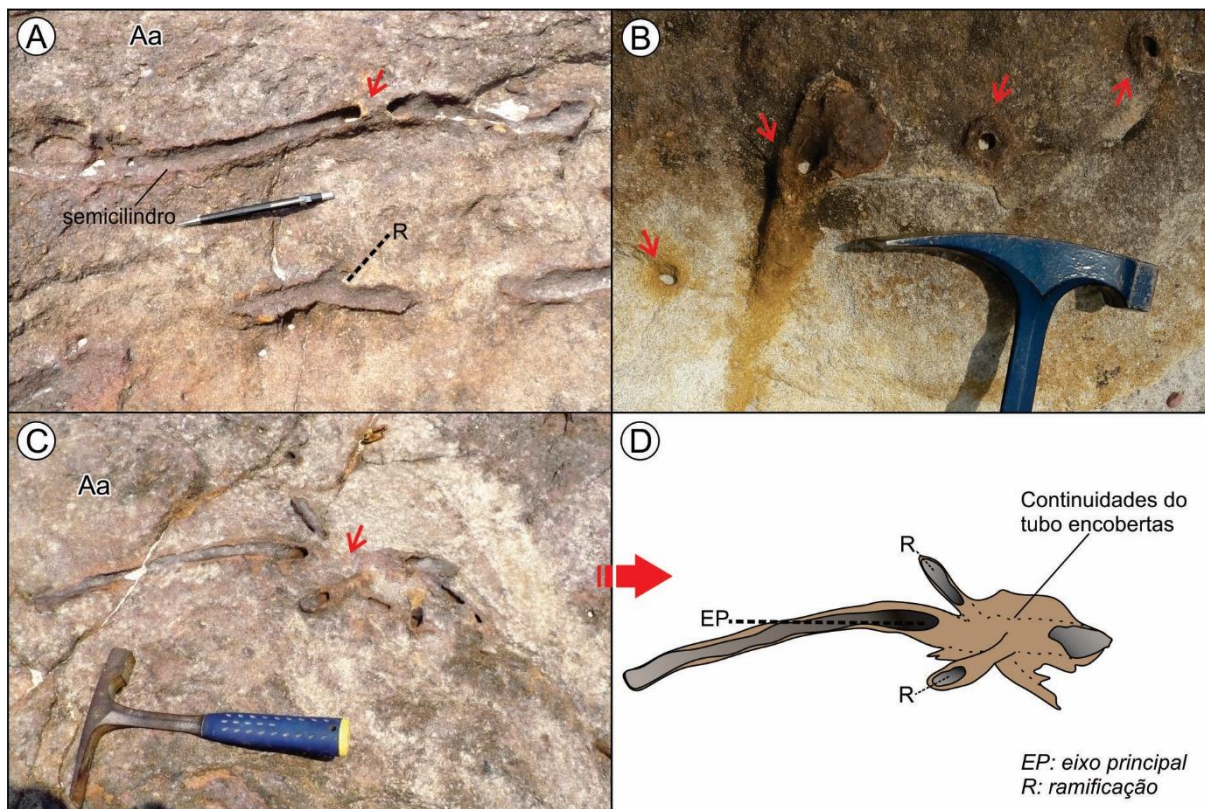
**Figura 23** – Rizólitos com crosta. A) Rizólitos (setas vermelhas) orientados horizontalmente na fácies Aa; B) Superfície marcada por grãos de quartzo mal selecionados e detalhe da seção vertical do tubo; C) Destaque para a ramificação dicotômica do rizólito; D) Terminação de um eixo radicular, com destaque para o arredondamento da extremidade e menor diâmetro em relação às demais porções; E) Fragmento com presença de estrutura tubular interna e seu desenho esquemático, destacando as estruturas externa e interna. *Escala gráfica = 2 cm.*

No segundo tipo de rizólito (**RT2**), as estruturas tubulares apresentam forma cilíndrica com revestimento de coloração marrom-amarelada e orientação horizontal (FIGURA 24A, 24B e 24C). A seção transversal é circular, os diâmetros variam entre 1 e 3 cm e o revestimento do tubo tem uma espessura média de 0,9 cm (FIGURA 24B).

Os tubos não apresentam preenchimento e em certas porções exibem forma de semicilindros, no qual apenas a parte inferior do tubo está preservada. A ramificação é dicotômica (FIGURA 24A), porém algumas junções de ramificações



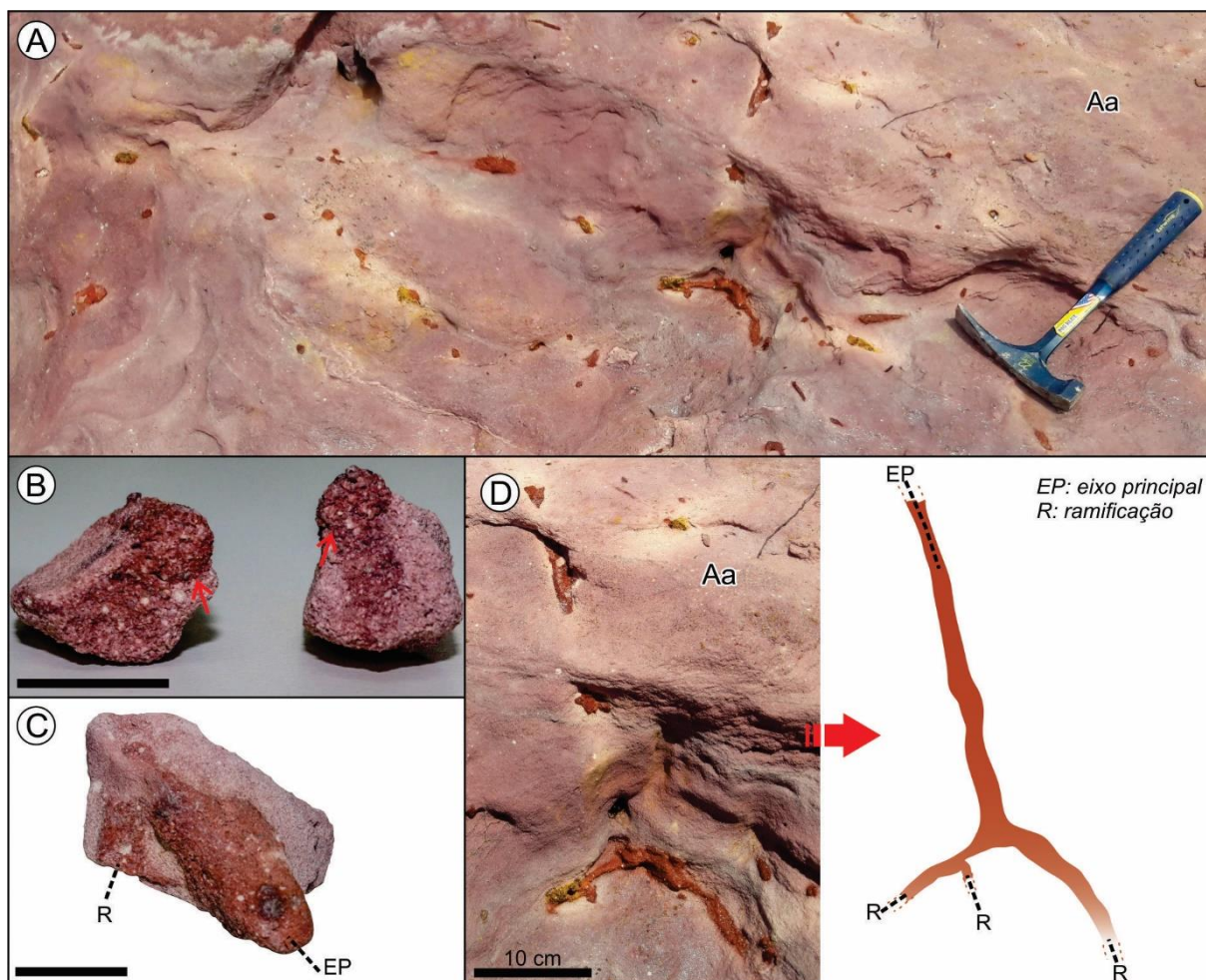
encobertas podem ser inferidas com base no contraste de coloração amarelada do revestimento dos tubos (FIGURA 24C).



**Figura 24** – Rizólitos sem preenchimento. A) Rizólito com forma semicilíndrica orientado horizontalmente na fácies Aa, com porção cilíndrica isolada (seta vermelha) e ramificação dicotômica; B) Seção transversal circular dos rizólitos; C) Aglomeração de rizólitos cilíndricos, com destaque para a halo de cor semelhante ao revestimento dos tubos (seta vermelha); e D) Desenho esquemático de tubos cilindros com junção da ramificação ao eixo radicular principal da Figura 22C.

No terceiro tipo de rizólito (**RT3**), as estruturas tubulares apresentam forma cilíndrica, cor avermelhada e orientação horizontal e, subordinadamente, vertical (FIGURA 25A). A seção transversal é circular a elíptica e os diâmetros variam entre 0,5 e 2 cm (FIGURA 25B).

Estes tubos estão totalmente preenchidos por siltito e arenito médio, condizente com a fácies Aa, envoltos por halos difusos resbranquiçados e apresentam ramificações dicotômicas (FIGURA 25C e 25D). Nas ramificações observa-se uma diminuição do diâmetro em relação ao eixo radicular principal (25C) e a preservação do eixo principal na posição vertical (FIGURA 25D), com recobrimento parcial.



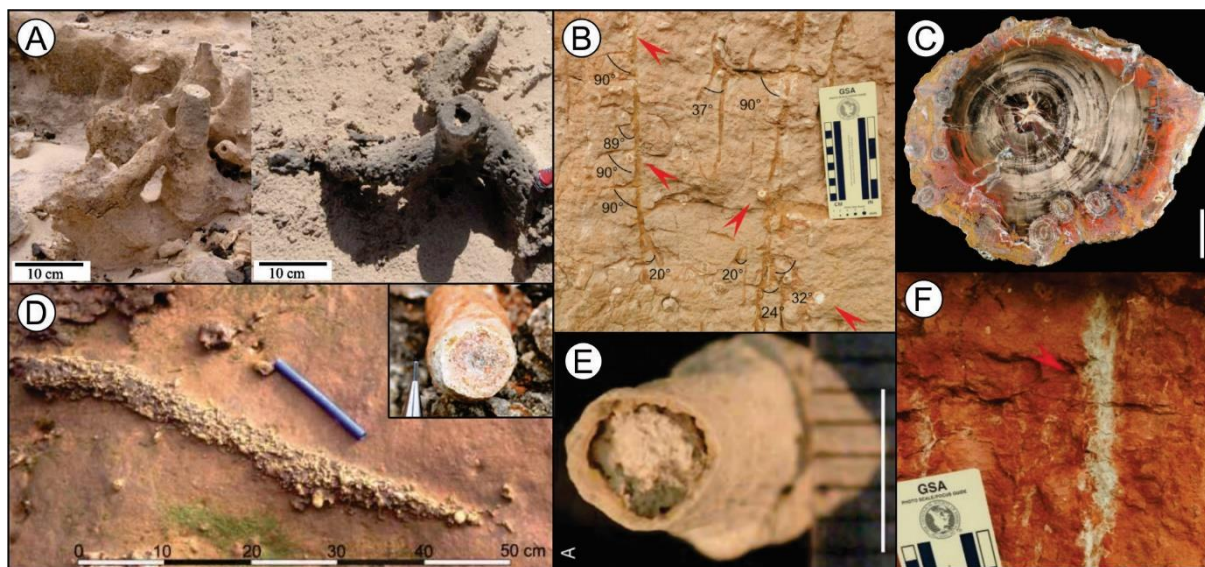
**Figura 25** – Rizólito com preenchimento. A) Rizólitos com forma cilíndrica e orientação horizontal e vertical na fácies Aa; B) Seção transversal de fragmentos coletados, onde observa-se o contorno circular (setas vermelhas); C) Ramificação com diâmetro menor em comparação com o eixo radicular principal; D) Ramificação a partir de um eixo radicular principal verticalizado e seu desenho esquemático. *Escala gráfica = 2 cm.*

Interpretações e discussões: Os registros de rizólitos são relativamente abundantes em paleossolos do Devoniano até o Recente (e. g., ALEKSEEVA, 2020; GENISE *et al.*, 2004; LI *et al.*, 2015; LUCAS *et al.*, 2006; NASCIMENTO *et al.*, 2019; RETALLACK & ALONSO-ZARZA, 1998; SCHNEIDER & RÖBLER, 1996; SILVA *et al.*, 2019, entre outros).

A variedade de tipos de rizólitos é associada por diferentes autores (e. g., EKDALE *et al.*, 1984; KLAPPA, 1980; KRAUS & HASIOTIS, 2006; SARJEANT, 1975) principalmente às diferenças morfológicas macro e microscópicas, bem como ao modo de preservação destes traços no substrato.

No que se refere a classificação, Klappa (1980) identificou cinco tipos de rizólitos (FIGURA 26): **moldes de raiz** – vazios tubulares associados a posição da raiz (FIGURA 26A); **contramoldes de raiz** – moldes externos da raiz preenchidos (FIGURA 26B); **petrificações de raiz** – substituição ou impregnações minerais da

matéria orgânica da raiz (FIGURA 26C); **rizoconcreções** – acumulações pedo-diagnéticas de minerais em torno da raiz (FIGURA 26D); **túbulo de raiz** – moldes internos de raiz preenchidos (FIGURA 26E). Posteriormente, Kraus & Hasiotis (2006) apresentaram o termo “**rizohalos**” para para descrever a zona empobrecida de Fe e Mn que se forma em torno da raiz (FIGURA 26F).



**Figura 26** – Exemplos de rizólitos segundo a classificação de Klappa (1980). A) Moldes de raiz (OUAJA *et al.*, 2011); B) Contramoldes de raiz (NASCIMENTO *et al.*, 2019); C) Petrificação (TAYLOR *et al.*, 2015); D) Rizoconcreções em planta (GALLOIS, 2013) e em seção transversal (SILVA *et al.*, 2017); E) Túbulo de raiz (LIUTKUS, 2009); e F) Rizohalo (KRAUS & HASIOTIS, 2006).

Ainda que a classificação proposta por Klappa (1980) estivesse voltada para rizólitos carbonáticos, segundo Genise (2017) os caracteres morfológicos diagnósticos destas estruturas também podem ser observados em rizólitos não-carbonáticos (*e. g.*, ALHONEN *et al.*, 1975; BOWN, 1982; GENISE *et al.*, 2011; GREGORY *et al.*, 2004; JONES *et al.*, 1998; KRAUS & HASIOTIS, 2006).

Desta forma, com base na descrição dos rizólitos deste estudo e na comparação com o modelo de classificação proposto por Klappa (1980), foram identificados três tipos de rizólitos: **rizoconcreções (RT1)**, **túbulos (RT2)** e **contramoldes de raiz (RT3)** (FIGURA 27).

A formação de rizoconcreções e túbulos de raiz, segundo Klappa (1980), envolve a dissolução de componentes minerais dentro da rizosfera e a precipitação de alguns ou todos os minerais dissolvidos no substrato que envolve a raiz (FIGURA 27A, 27B e 27C), o que pode acontecer durante a vida ou após a morte da raiz.

De acordo Retallack (1988), a rizosfera é uma zona gelatinosa em volta da raiz com captação ativa de nutrientes e rica em bactérias e fungos. Nesta zona gelatinosa, segundo Catarino *et al.* (1983), aglutinam-se partículas orgânicas e

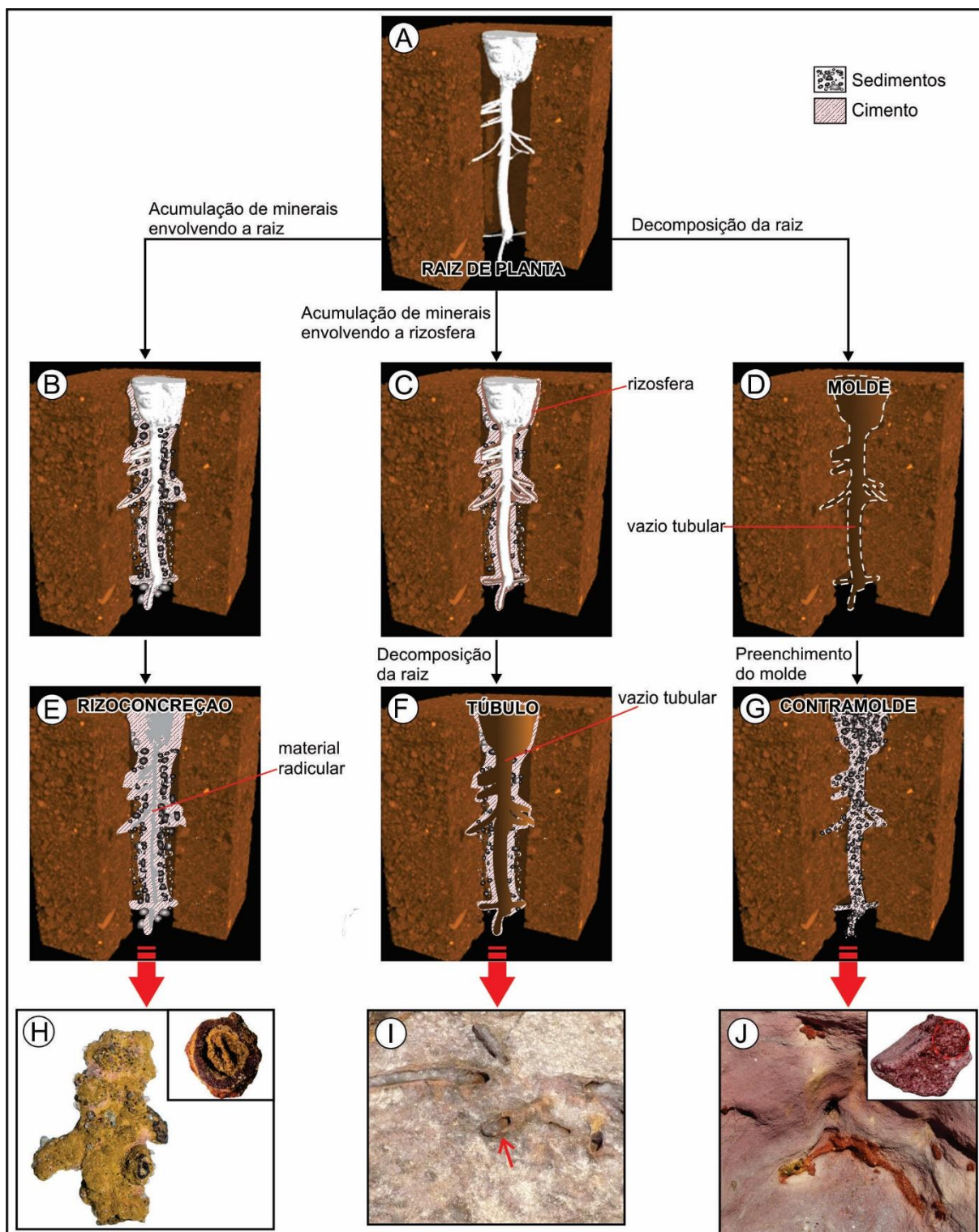
inorgânicas presentes nos sedimentos. Os processos de alteração bioquímicas na interface raiz-sedimento causariam alterações em alguns componentes do solo, como o ferro, passa para o estado insolúvel (óxido de ferro) e funcionando como agente de cimentação da argila, causando seu endurecimento e a coloração avermelhada, e formando as rizoconcreções ferruginosas.

Quanto aos túbulos de raiz, semelhante às rizoconcreções, sua formação está associada a sedimentação e/ou cimentação em torno da raiz, de acordo com Klappa (1980). No entanto, os túbulos se formam a uma distância (milimétrica) da interface raiz-sedimentos, no limite externo da rizosfera (FIGURA 27C). O diâmetro do túbulo, portanto, representa o diâmetro da rizosfera, aproximadamente. Segundo Balin (2000), o material radicular pode eventualmente se deteriorar deixando um vazio na área central da estrutura, caracterizando túbulo de raiz (FIGURA 27F e 27I).

Os contramoldes de raiz, segundo Klappa (1980), se formam pelo preenchimento de moldes (FIGURA 27D) por sedimentos e/ou cimentos (FIGURA 27G e 27H). De acordo com Hernández *et al.* (1997), com a preservação de vazios deixados no substrato pela decomposição de um sistema radicular, este espaço pode ser preenchido por sedimentos que, podem garantir a preservação do contramolde, desde que sejam constituídos por grãos suficientemente grossos para se diferenciar do substrato e finos o suficiente para preencher os espaços vazios sem destruí-los.

No que se refere a morfologia da raiz preservada por estes rizólitos, segundo Balin (2000), as rizoconcreções preservam caracteres morfológicos da raiz mais próximos da realidade, enquanto os túbulos e contramoldes de raiz preservam a morfologia geral das raízes, mas não preservam componentes radiculares. Não apenas a morfologia radicular, mas também a rizosfera, segundo Retallack (1988) pode ser representada por halos difusos e descoloridos em torno dos rizólitos.

Além do mais, em concordância com Serjant (1975) e Silva & Delatorre (2009), o padrão radicular das plantas está relacionado às condições de seu ambiente de crescimento, podendo ser modificado em função da variação da disponibilidade de nutriente no solo e/ou quantidade de água no solo.



**Figura 27** – Reconstituição da gênese de rizólitos de acordo com Klappa (1980) e comparação com rizólitos identificados neste estudo. A) Representação tridimensional de parte de um sistema de raiz (Modificado de BAO *et al.*, 2014); B) Raiz envolvida por sedimentos e cimentos; E e H) Rizoconcreções; C) Rizosfera envolvida por sedimentos e cimentos; F e I) Túbulos de raiz; D) Molde de raiz; G e J) Contramolde de raiz.

As marcas de raízes, via de regra, são as feições mais diagnósticas para a identificação de paleossolos, pois indicam que a rocha hospedeira foi exposta à atmosfera e colonizada por plantas, segundo Ladeira (2010) e Retallack (1988, 2001).

Assim, apesar da classificação dos rizólitos neste estudo envolver apenas a classificação dentro da icnocatégoria (*i. e.*, tipos de rizólitos), uma vez que não foi possível identificar a planta da qual derivam, algumas interpretações podem ser inferidas sobre o significado paleoambiental destes icnofósseis para a Formação Alter do Chão, entre as quais se destacam:

- A orientação horizontalizada da maioria dos rizólitos como possível indicador de raízes que se desenvolvem em solos bem drenados e no qual a chuva é a principal forma de fornecimento de água, conforme o que sugere Van Donselaar-Ten Bokkel Huinink (1966);

- Os rizólitos de coloração avermelhada a amarelada são comparáveis aos traços de raiz descritos em depósitos da Formação Alter do Chão por Horbe *et al.* (2006) e Vieira (2002), cujo preenchimento foi caracterizado por estes autores como sendo constituídos de hematita e goethita. Esta composição, segundo Melo *et al.* (2001) e Mielki (2014), é condizente com solos bem drenados, os quais apresentam altos teores de óxidos de ferro.

- Uma vez que as marcas de raiz descritas neste estudo estão associadas aos depósitos arenosos de preenchimento de canal, segundo Retallack (2001), a grande concentração de marcas de raiz pode ser interpretada como um horizonte próximo ao topo de um paleossolo, o que, no caso das barras arenosas em um canal fluvial, pode ocorrer em barras estáticas a partir da exposição de depósitos de barras centrais no leito do canal em função de períodos de vazante, de acordo com Alexander *et al.* (1999) e Fielding *et al.* (1997).

### 5.3 Sistema Depositional e a Gênese de Icnofósseis

As análises faciológicas das rochas aflorantes em Ponta das Lajes, Manaus-AM, resultaram no reconhecimento de depósitos de preenchimento de canal e de planície de inundação em um sistema fluvial, cujas canalizações apresentam estilo entrelaçado moderado a altamente sinuoso.

De acordo com a literatura (e. g., DOEGLAS, 1962; MIAL, 1977a; RICCOMINI & COIMBRA, 1993) em rios entrelaçados variabilidade de descarga é alta, uma vez que em curtos intervalos de tempo recebem grande quantidade de água, como em regiões de secas sazonais. Quando a capacidade de transportar toda carga de fundo do rio é baixa, a deposição resulta na formação de barras e ilhas. E quando a alta descarga excede as margens do canal, a água flui para as planícies, gerando depósitos de planície de inundação, como lagos e *crevasse splay*.

O registro de paleotocas de peixe dipnoicos são comumente associadas a depósitos de planície de inundação (e. g., DUBIEL *et al.*, 1987; FRANCISCHINI *et al.*, 2018; McCAHON & MILLER, 2015) e, embora a identificação seja problemática, vários estudos abordaram a descrição detalhada destas paleotocas com registros de restos fósseis (e. g., ROMER & OLSON, 1954; VAUGHN, 1964), o que fundamentou o reconhecimento destas estruturas em depósitos correlatos na área de estudo.

Como peixes dipnoicos podem respirar tanto o oxigênio atmosférico quanto o dissolvido na água, a depender das condições reinantes em seu habitat é possível que tenham uma fase terrestre e uma aquática, conforme levantado por Sawaya & Shinomiya (1972). Neste sentido, sabe-se hoje, tanto com base na observação das espécies modernas, quanto no registro paleontológico, que os peixes dipnoicos escavam tocas para habitação temporária em substratos lamosos para se proteger durante períodos de vazante de rios e, conseqüente ressecamento de lagos de planície de inundação, o que Smith (1911) descrevem da seguinte forma:

Os peixes dipnoicos habitam lagos de água doce, onde geralmente, alimentam-se de moluscos e outros animais no lago. Com a chegada da estiagem e/ou vazante do rio, os níveis de água do lago baixam e a alimentação torna-se escassa, então o animal escava uma toca em forma de casulo com uma pequena abertura no substrato lamoso.

O peixe entra na toca e produz um muco que evitará sua dissecação durante a seca, iniciando a estivação. Neste período, o peixe usará os pulmões para respiração até que o lago se reabasteça e ele flutue para fora de sua toca.

Neste contexto, a variação do nível da água no sistema fluvial é uma condição relevante para o desenvolvimento de paleotocas de dipnoicos. Dessa forma, com base na identificação de depósitos de canal fluvial e planície de inundação, seccionados pela reta A – B (FIGURA 28A), a reconstituição de um sistema fluvial entrelaçado pode ser reinterpretada em função da variação do nível de água e como esta variação influencia na produção da toca por peixes dipnoicos. Distingui-se, assim, as seguintes fases de evolução do sistema (FIGURA 28B):

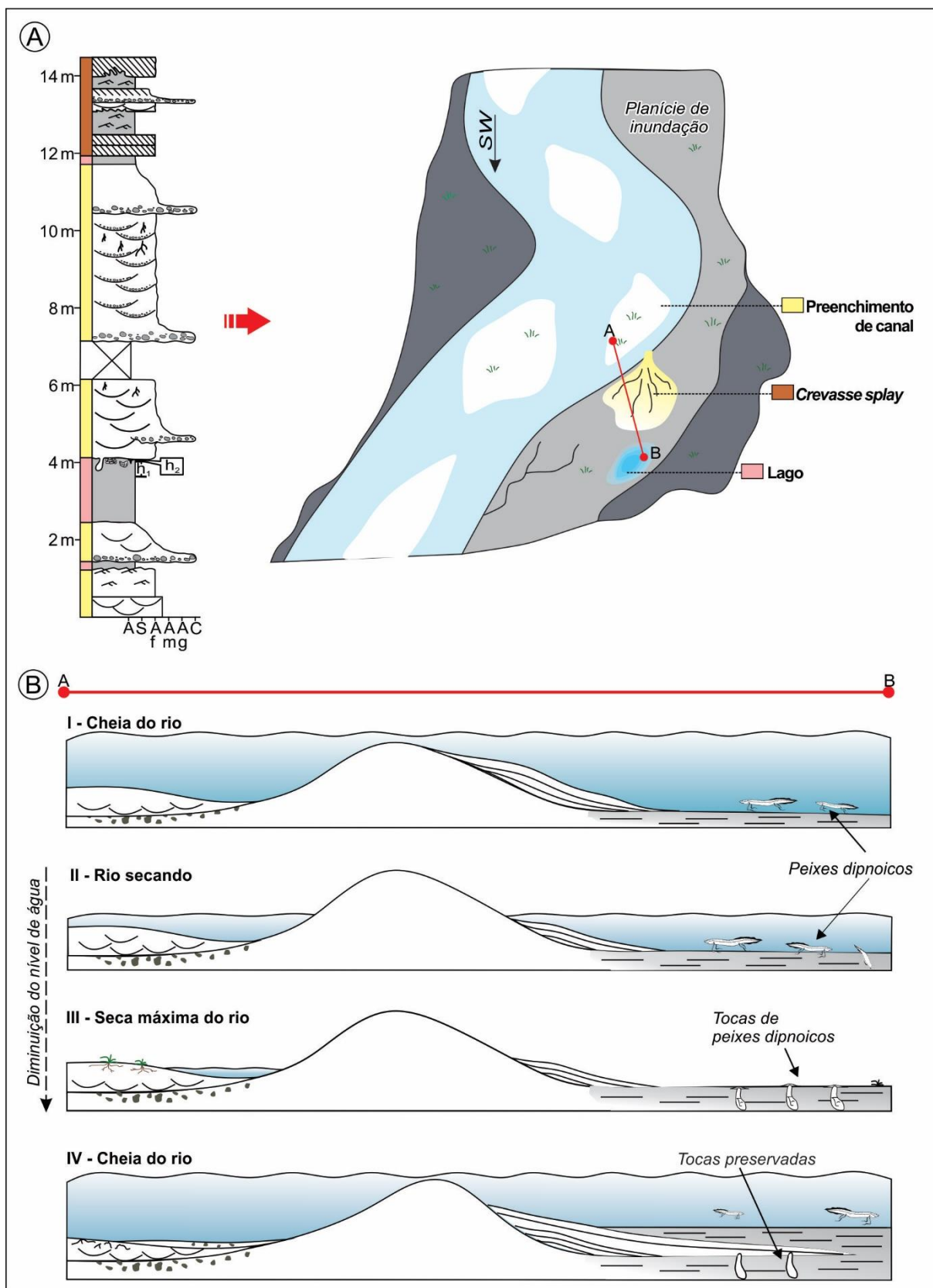
I) No período de cheia do rio, os peixes viviam em um lago formado na planície de inundação e reabastecido pelo canal principal;

II) Com o início da vazante do rio, o lago deixa de ser reabastecido pelo canal principal e seu nível de água conseqüentemente diminui, fazendo com que os peixes iniciem a fase de escavações;

III) No período de seca do rio, as barras arenosas formadas no canal são expostas por um período suficiente para o desenvolvimento de solo e o aparecimento de vegetação. Enquanto na planície de inundação, o peixe se protege do ressecamento do solo, causado pela seca do lago, estivado em sua toca;

IV) em um novo período de cheia do rio, as raízes de plantas são preservadas nas barras arenosas em forma de rizólitos. Enquanto na planície de inundação, com o lago reabastecido, os peixes abandonam as tocas e a preservação destas estruturas pode ocorrer por preenchimento de sedimentos provenientes do canal principal, como os depósitos de *crevasse splay*.





**Figura 28** – Sistema deposicional e a gênese de icnofósseis. A) Reconstituição paleoambiental do sistema fluvial, no qual a seção A-B abrange os subambientes deposicionais de preenchimento de canal e planície de inundação; e B) A partir da seção A-B, representa-se a variação no nível da água no sistema fluvial e sua influência na produção de rizólitos, em barras dentro do canal principal, e paleotocas de peixes dipnoicos, em lagos de planície de inundação.

## 6 CONCLUSÕES

Apesar da Formação Alter do Chão (Grupo Javari, Cretáceo da Bacia do Amazonas) ter sido objeto de um número considerável de estudos sedimentológicos, a partir dos quais grande parte da evolução geológica desta unidade vem sendo desvendada e reconstituída, no tocante a paleontologia, ainda há muito a ser realizado no intuito de compor um registro paleontológico que possa contribuir efetivamente na construção do arcabouço geológico desta unidade.

Assim, considerando a reconhecida carência de fósseis corpóreos da Formação Alter do Chão e o uso comum de icnofósseis como indicadores de processos biogênicos e também sedimentares, a realização deste trabalho foi motivada tanto pela necessidade de ampliação do registro paleontológico desta unidade, quanto da de avaliar o potencial como indicadores paleoambientais de icnofósseis provenientes de rochas sedimentares siliciclásticas que afloram na margem esquerda do Rio Negro na porção leste da cidade de Manaus (AM), conhecida localmente como Ponta das Lajes.

Para tanto, o desenvolvimento deste estudo teve como premissas essenciais a classificação e o levantamento paleoecológico de icnofósseis e a caracterização faciológica da sucessão de rochas na qual ocorrem.

Os resultados da análise sedimentológica, voltada à caracterização de fácies sedimentares, levaram ao reconhecimento de 7 (sete) fácies sedimentares, cujos atributos geológicos permitiram identificar 3 (três) associações de fácies, interpretadas como representativas de depósitos de **Preenchimento de Canal** (fácies Cm – Conglomerado maciço, Aa – Arenito com estratificação cruzada acanalada, At – Arenito com estratificação cruzada tabular, Al – Arenito com laminação cruzada cavalgante, Am – Arenito maciço), **Lago de planície de inundação** (fácies Pl – Pelito com laminação cruzada cavalgante, Pm – Pelito maciço) e **Crevasse splay** (fácies Cm – Conglomerado maciço, Aa – Arenito com estratificação cruzada acanalada, At – Arenito com estratificação cruzada tabular, Pl – Pelito com laminação cruzada cavalgante).

Os principais elementos empregados na identificação dos **depósitos de preenchimento de canal** foram a presença de arenitos (Aa, At, Al e Am) e conglomerados (Cm) organizados em ciclos granodecrescentes ascendentes, o padrão unidirecional de paleocorrente e as formas de leito com estratificações e laminações. Os **lagos de planície de inundação** foram interpretados a partir de

evidências de sedimentação por suspensão ( fácies pelíticas PI e Pm) e pela ocorrência de feições pedogenéticas (e. g., *slickensides*, *peds*, *gretas de ressecamento*) e biogências (icnofósseis) indicativas de exposições subaéreas periódicas. Já os depósitos do tipo **crevasse splay** (rompimento de diques marginais), foram caracterizados pela identificação de um ciclo granocrescente ascendente (*coarsening upwards*), no qual a sequência arenosa (Aa e At) e pelítica (PI) são sucedidas por depósito residual de conglomerados (Cm).

A análise do padrão de sucessão destas fácies e associações de fácies, indicou um **sistema deposicional fluvial com canalizações de estilo entrelaçado de moderada a alta sinuosidade para a Formação Alter no Chão na área de estudo**, cuja interpretação foi motivada principalmente pela organização em ciclos da sucessão, na qual se observou franco predomínio de ciclos granocrescente ascendentes; pouca representatividade de finos de planície de inundação, indicando ciclos dominados por sedimentação arenosa; e por medidas de paleocorrentes em sets de estratificações cruzadas de depósitos de preenchimento de canal apresentando padrão unimodal para SW (média de 218,3° Az) e baixa dispersão, um padrão de maior afinidade com depósitos de rios entrelaçados.

Os resultados das análises paleontológicas levaram ao reconhecimento de duas icnocategorias – **paleotocas e rizólitos**, ambas identificadas a partir de critérios morfológicos de amplo emprego na literatura especializada sobre o tema.

Por constituírem caracteres diagnósticos de estruturas de escavações produzidas para habitação temporária ou permanente, os principais elementos considerados na caracterização das **paleotocas** foram arquitetura simples com formato cilíndrico a subcilíndrico dos tubos, orientação sub vertical em relação ao acamamento, entrada indistinta, terminação arredondada, variação do diâmetro ao longo da estrutura, comprimento e diâmetro médios.

A análise comparativa destes caracteres com os de paleotocas de diferentes produtores (e. g., crustáceos, peixes dipnoicos e tetrápodes) levaram ainda a determinação do organismo produtor destas estruturas, a saber, **peixes dipnoicos**, popularmente chamados de peixes pulmonados (*lungfishes*).

De acordo com a literatura, são aspectos diagnósticos de paleotocas de dipnoicos: arquitetura simples e cilíndrica, orientação geralmente vertical a sub vertical, variação de diâmetro da base (mais larga) para o topo (mais estreita) em seção transversal, porção terminal arredondada com forma similar à de um tubo de ensaio, com base ligeiramente mais larga, presença de segmentos transversais ao

eixo principal e entrada ou abertura comumente indistinta. Além disso, as dimensões médias das tocas de dipnoicos mesozoicos variam entre 6 a 60 cm de comprimento e entre 2 e 15,7 cm de diâmetro.

Consequentemente, como foram observadas estreitas semelhanças das paleotocas da Formação Alter do Chão em Ponta das Lajes com este padrão geral da morfologia diagnóstica das paleotocas de dipnóicos, como também entre as dimensões médias de comprimento e diâmetro (comprimento de ~40 cm e diâmetro entre 2,7 e 15,6 cm no material estudado), a conclusão mais provável foi a de que estes icnofósseis tratavam-se de **paleotocas de peixes dipnoicos** (Superordem **DIPNOI**, Classe **OSTEICHTHYES**, Superclasse **GNATHOSTOMATA**, Filo **CHORDATA**).

Nesse sentido, vale também ressaltar que, embora estes icnofósseis tenham sido registrados previamente em um trabalho anterior desenvolvido no afloramento estudado, esta é a primeira classificação formal tanto da icnocategoria, quanto do táxon que a produziu, constituindo, assim, o **primeiro registro de paleotocas de peixes dipnoicos na Formação Alter do Chão**.

Com relação ao significado paleoambiental das paleotocas de Ponta das Lajes para a Formação Alter do Chão, apesar de não ter sido possível chegar a espécie ou mesmo ao gênero de dipnoico produtor, que é um critério determinante para o reconhecimento de parâmetros bióticos e abióticos de paleoecossistemas, o vasto conhecimento da ecologia dos peixes dipnoicos modernos tem mostrado que padrões comportamentais e *habitats* preferenciais, aparentemente, não variaram de forma significativa ao longo do tempo geológico.

Por isso, sabe-se que **no Mesozoico a ocorrência de paleotocas de dipnoicos restringe-se a ambientes aquáticos continentais, interpretados, em geral, como de baixa oxigenação e/ou submetidos a fases de ressecamento** (sazonal ou episódico), nos quais a construção das tocas resultaria da estivação do animal em resposta as condições ambientais adversas do meio durante, tais como variações sazonais ou climáticas extremas (e. g., frio extremo ou aridez, seca, etc.).

Também de acordo com a literatura, as tocas de dipnoicos são comumente escavadas em substratos finos (preferencialmente pelitos), **associados a ambientes lacustres e/ou fluviais, particularmente depósitos de lagos de planície de inundação**, o que consequentemente, atribui às variações do nível d'água no sistema, uma condição determinante para a formação destas estruturas.

Assim, somando-se estes aspectos à interpretação faciológica do nível em que as paleotocas ocorrem no afloramento estudado (fácies Pm), os quais indicam uma sedimentação representativa de depósitos de lagos de planície de inundação em um sistema fluvial, a conclusão é que a presença destas estruturas corrobora esta interpretação, como também, de inferências semelhantes sugeridas para outras localidades e intervalos de tempo, apresentadas na literatura, o que levou a conclusão de que **o estudo realizado também reafirmou o potencial destes icnofósseis como indicadores paleoambientais.**

Quanto aos **rizólitos**, os principais aspectos diagnósticos empregados na sua caracterização foram a presença de um eixo principal com orientação vertical e ramificações laterais com orientação horizontalizada, ramificações dicotômicas em forma de Y com junções que não se ampliavam e diminuição do diâmetro em direção à terminação de cada ramificação. A partir da análise do modo de preservação foram identificados 3 (três) tipos de rizólitos – **rizoconcreções** (RT1), **túbulos** (RT2) e **contramoldes de raiz** (RT3).

Por corresponderem a acumulações minerais pedodiagenéticas em torno da raiz da planta, as **rizoconcreções** foram justamente identificadas pela presença de uma crosta mineral constituída por um aglomerado mal selecionado composto por grãos de quartzo e uma matriz fina, que forma uma superfície irregular a nodular em torno de estruturas tubulares subcirculares ramificadas, parcial ou totalmente preenchidas. Os **túbulos de raiz**, por constituírem cilindros formados por cimento ou sedimentos cimentados em volta dos moldes de raiz, foram identificados pela ausência de preenchimento, seção transversal circular e revestimento de textura fina e espessa. Por sua vez, os **contramoldes de raiz** foram caracterizados por constituírem preenchimento de vazios (moldes) por grãos cimentados oriundos da rocha que os abriga, os quais possivelmente ocuparam o espaço deixado pela raiz quando da sua decomposição.

A presença destes rizólitos, por si só, é considerada por numerosos autores como um importante elemento para a identificação e caracterização de paleossolos, pois podem evidenciar exposição subaérea do leito por tempo suficiente para o desenvolvimento de vegetação e, conseqüentemente, da formação de solo.

Nesse sentido, **a identificação e caracterização destes rizólitos corrobora as interpretações sedimentológicas deste e de outros trabalhos, que apontam para a ocorrência de níveis de paleossolos na Formação Alter do Chão.**

Além disso, alguns aspectos relacionados ao modo de ocorrência destes icnofósseis (e. g., orientação e coloração predominantes), **também sugerem um solo bem drenado com significativa participação pluviométrica e com altos teores de ferro.**

Assim, considerando o que foi apresentado e discutido, pode-se considerar que os objetivos propostos por este estudo foram alcançados, destacando-se entre as principais contribuições aqui apresentadas, a ampliação do registro paleontológico da Formação Alter do Chão a partir do primeiro registro de DIPNOI e o reconhecimento do potencial dos icnofósseis como uma ferramenta alternativa de interpretação paleoambiental bastante promissora tanto para a paleontologia quanto para a sedimentologia.

## REFERÊNCIAS

- ABINADER, Humberto Dias. **Depósitos cenozóicos da porção oeste da bacia do Amazonas**. 2008. 83f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Manaus.
- AGNOLIN, Federico. A new species of the genus *Atlantoceratodus* (Dipnoiformes: Ceratodontoidei) from the Uppermost Cretaceous of Patagonia and a brief overview of fossil dipnoans from the Cretaceous and Paleogene of South America. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities Research Medium**, v. 1, n. 2, p. 162-210, 2010.
- ALEKSEEVA, T.V. Rhizoliths in Devonian and Early Carboniferous Paleosols and Their Paleoecological Interpretation. **Eurasian Soil Science**, v. 53, p. 405-419, 2020.
- ALEXANDER, Jan; FIELDING, Christopher R.; JENKINS, Gareth. Plant-material deposition in the tropical Burdekin River, Australia: implications for ancient fluvial sediments. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 153, n. 1-4, p. 105-125, 1999.
- ALHONEN, Pentti *et al.* Ferruginous concretions around root channels in clay and fine sand deposits. **Bulletin Of The Geological Society Of Finland**, v. 47, p. 175-178, 1975.
- ALLEN, John R.L. A review of the origin and characteristics of recent alluvial sediments. **Sedimentology**, v. 5, n. 2, p. 89-191, 1965.
- ALMEIDA-VAL, Vera Maria F.; FÉ, Luciana Mara L.; CAMPOS, Derek Felipe. Evolutionary Aspects on the Comparative Biology of Lungfishes: Emphasis on South-American Lungfish, *Lepidosiren paradoxa*. *In: Phylogeny, Anatomy and Physiology of Ancient Fishes*, 2016, p. 38-56.
- ALONSO-ZARZA, Ana María *et al.* Megarhizoliths in Pleistocene aeolian deposits from Gran Canaria (Spain): ichnological and palaeoenvironmental significance. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 265, n. 1-2, p. 39-51, 2008.
- ALVES, Yuri M. *et al.* Redescription of two lungfish (Sarcopterygii: Dipnoi) tooth plates from the late Cretaceous Bauru group, Brazil. **Cretaceous Research**, v. 40, p. 243-250, 2013.
- APESTEGUÍA, Sebastián; AGNOLIN, Federico; CLAESON, Kerin. Review of Cretaceous dipnoans from Argentina (Sarcopterygii: Dipnoi) with descriptions of new species. **Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales nueva serie**, v. 9, n. 1, p. 27-40, 2007.

- BALIN, Donna F. Calcrete morphology and karst development in the upper Old Red Sandstone at Milton Ness, Scotland. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 180, n. 1, p. 485-501, 2000.
- BAO, Yun *et al.* Plant roots use a patterning mechanism to position lateral root branches toward available water. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 25, p. 9319-9324, 2014.
- BARBOUR, Irwin H. Notice of new gigantic fossils. **Science**, n. 472, p. 99-100, 1892.
- BARRETO JUNIOR, Aerson M.; CAMPELO, Sara C.M.; FAMBRINI, Gelson. Possível escavação de peixes dipnoicos na formação Missão Velha, Bacia do Araripe. *In: Congresso Regional de Paleontologia do Nordeste*, Recife, 2018.
- BASILICI, Giorgio. Floodplain lake deposits on an early Pleistocene alluvial plain (Tiberino Basin, Central Italy). Lake basins through space and time. **AAPG Studies in Geology**, v. 46, p. 535-542, 2000.
- BAUCON, Andrea *et al.* Evolution of crustaceans at the edge of the end-Permian crisis: ichnonetwork analysis of the fluvial succession of Nurra (Permian–Triassic, Sardinia, Italy). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 410, p. 74-103, 2014.
- BEDATOU, Emilio *et al.* Crayfish burrows from Late Jurassic–Late Cretaceous continental deposits of Patagonia: Argentina. Their palaeoecological, palaeoclimatic and palaeobiogeographical significance. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 257, n. 1-2, p. 169-184, 2008.
- BENTON, Michael J. **Vertebrate Palaeontology**. John Wiley & Sons, 2005.
- BORDY, Emese M.; KRUMMECK, William D. Enigmatic continental burrows from the early Triassic transition of the Katberg and Burgersdorp Formations in the main Karoo Basin, South Africa. **Palaos**, v. 31, n. 8, p. 389-403, 2016.
- BORDY, Emese M. *et al.* First Lower Jurassic vertebrate burrow from southern Africa (upper Elliot Formation, Karoo Basin, South Africa). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 468, p. 362-372, 2017.
- BOWN, Thomas M. Ichnofossils and rhizoliths of the nearshore fluvial Jebel Qatrani Formation (Oligocene), Fayum Province, Egypt. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 40, n. 4, p. 255-309, 1982.
- BUCHMANN, Francisco S.; LOPES, Renato P.; CARON, Felipe. Icnofósseis (paleotocas e crotovinas) atribuídos a mamíferos extintos no sudeste e sul do Brasil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 12, n. 3, p. 247-256, 2009.



BURGGREN, Warren W.; JOHANSEN, Kjell. Circulation and respiration in lungfishes (Dipnoi). **Journal of Morphology**, v. 190, n. S1, p. 217-236, 1986.

BURNS, Catherine E. *et al.* Anatomy and dimensions of fluvial crevasse-splay deposits: Examples from the Cretaceous Castlegate Sandstone and Neslen Formation, Utah, USA. **Sedimentary Geology**, v. 351, p. 21-35, 2017.

CAPUTO, Mário Vicente; RODRIGUES, Renê; VASCONCELOS, Djalma N.N. Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas: histórico e atualização. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*. 1972, p. 35-46.

CAPUTO, Mario Vicente. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil**. 1984. 583f. Tese (Doutorado), University Of California, Santa Bárbara.

CAPUTO, Mario Vicente *et al.* Late Devonian and early Carboniferous glacial records of South America. **Geological Society of America Special Papers**, v. 441, p. 161-173, 2008.

CAPUTO, Mario Vicente. Discussão sobre a Formação Alter do Chão e o Alto de Monte Alegre. **Contribuição à Geologia da Amazônia**, Manaus, SBG/Núcleo Norte, v. 7, p. 7-23, 2011.

CARLSON, Keith J. The skull morphology and estivation burrows of the Permian lungfish, *Gnathorhiza serrata*. **The Journal of Geology**, v. 76, n. 6, p. 641-663, 1968.

CARROLL, Robert L. Lungfish burrows from the Michigan coal basin. **Science**, v. 148, n. 3672, p. 963-964, 1965.

CATARINO, Fernando; DUARTE, Cristina; ALVES, João. Rizoconcreções nos solos da Reserva Natural do Estuário do Tejo. Possível contribuição destas estruturas para a caracterização de taxa de sedimentação e do dinamismo do cobereto vegetal nos sapais. **Centro de Engenharia Biológica, Universidade de Lisboa**, 1983.

CAVIN, Lionel *et al.* A new Thai Mesozoic lungfish (Sarcopterygii, Dipnoi) with an insight into post-Palaeozoic dipnoan evolution. **Zoological Journal of the Linnean Society**, v. 149, n. 2, p. 141-177, 2007.

CASTRO, Darciléa F. *et al.* Nova ocorrência de *Asiatoceratodus* (Osteichthyes, Dipnoiformes) na Formação Alcântara, Eocenomiano da bacia de São Luís, MA, Brasil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 7, n. 2, p. 245-248, 2004.

CIONE, Alberto Luis *et al.* *Atlantoceratodus* a new genus of lungfish from the upper Cretaceous of South America and Africa. **Revista del Museo de La Plata| Sección Paleontología**, v. 10, 2007.

CLEMENT, Alice M.; LONG, John A. Air-breathing adaptation in a marine Devonian lungfish. **Biology Letters**, v. 6, n. 4, p. 509-512, 2010.

CLOUTIER, Richard; AHLBERG, Per Erik. Morphology, Characters, and the Interrelationships of Basal Sarcopterygians. *In: Interrelationships of Fishes*. Academic Press, 1996. p. 445-479.

COLOMBI, Carina E. *et al.* Large-diameter burrows of the Triassic Ischigualasto Basin, NW Argentina: Paleocological and paleoenvironmental implications. **PloS one**, v. 7, n. 12, 2012.

CORDANI, Umberto G. *et al.* The position of the Amazonian Craton in supercontinents. **Gondwana Research**, v. 15, n. 3-4, p. 396-407, 2009.

CRISWELL, Katharine E. The comparative osteology and phylogenetic relationships of African and South American lungfishes (Sarcopterygii: Dipnoi). **Zoological Journal of the Linnean Society**, v. 174, n. 4, p. 801-858, 2015.

CUNHA, Paulo Roberto C.; MELO, José Henrique G.; SILVA, Osvaldo B. Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 15, p. 227-251, 2007.

DAEMON, Roberto F. Contribuição à datação da Formação Alter do Chão, bacia do Amazonas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 5, n. 2, p. 78-84, 1975.

DAEMON, Roberto F.; CONTREIRAS, C.J.A. Zoneamento palinológico da Bacia do Amazonas. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*. 1971p., 79-88.

DENTZIEN-DIAS, Paula C.; FIGUEIREDO, Ana Emilia Q.; SCHULTZ, Cesar L. Sobre a gênese das tocas de tetrápodes do Paleozóico e Mesozóico. **Pesquisas em Geociências**, v. 39, n. 2, p. 99-107, 2012.

DENTZIEN-DIAS, Paula C. *et al.* Lungfish aestivation burrow from Upper Permian of the Paraná Basin, Brazil. **Arabian Journal of Earth Science. special issue**, p.17-18, 2015.

DEY, Subhasish. Fluvial Processes: Meandering and Braiding. *In: Fluvial Hydrodynamics*. GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014, p. 529-562.

DINO, Rodolfo; SILVA, O.B.; ABRAHÃO, D. Caracterização palinológica e estratigráfica de estratos cretáceos da Formação Alter do Chão, Bacia do Amazonas. *In: Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil*, Rio Claro, UNESP, p.557-565, 1999.

DOEGLAS, D.J. The structure of sedimentary deposits of braided rivers. **Sedimentology**, v. 1, n. 3, p. 167-190, 1962.

DUBIEL, Russell F.; BLODGETT, Robert H.; BOWN, Thomas M. Lungfish burrows in the Upper Triassic Chinle and Dolores Formations, Colorado Plateau. **Journal of Sedimentary Research**, v. 57, n. 3, p. 512-521, 1987.

EKDALE, Alan A.; BROMLEY, Richard G.; PEMBERTON, George. Ichnology: The use of trace fossils. *In: Sedimentology and Stratigraphy*: SEPM Publication, Tulsa, OK, p. 144-156. 1984.

ELICK, Jennifer M.; DRIESE, Steven G.; MORA, Claudia I. Very large plant and root traces from the Early to Middle Devonian: Implications for early terrestrial ecosystems and atmospheric p (CO<sub>2</sub>). **Geology**, v. 26, n. 2, p. 143-146, 1998.

FERNANDES, Antonio Carlos S.; CARVALHO, Ismar S. Uma provável escavação de dipnóico na Formação Ponta Grossa, Devoniano da Bacia do Paraná. **Arquivos do Museu Nacional**, v. 60; n. 3, p. 207-211, 2002.

FERNANDES, Antonio Carlos S.; CARVALHO, Ismar S.; AGOSTINHO, Sonia. Icnofósseis: conceitos gerais. **Knologia. Sociedade Brasileira de Geologia**, p. 8-23, 2007.

FIGUEIREDO SOUTO, Paulo Roberto; FERNANDES, Marcelo A.; MARTINS, Claudia Maria M.R. **Knologia de Paleovertebrados**. Letra Capital Editora LTDA, 2017.

FIELDING, Christopher R. Fluvial channel and overbank deposits from the Westphalian of the Durham coalfield, NE England. **Sedimentology**, v. 33, n. 1, p. 119-140, 1986.

FIELDING, Christopher R.; ALEXANDER, Jan; NEWMAN-SUTHERLAND, Elissa. Preservation of in situ, arborescent vegetation and fluvial bar construction in the Burdekin River of north Queensland, Australia. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 135, n. 1-4, p. 123-144, 1997.

FISHER, W.L.; MCGOWEN, J.H. Depositional systems in Wilcox Group (Eocene) of Texas and their relation to occurrence of oil and gas. **AAPG Bulletin**, v. 53, n. 1, p. 30-54, 1967.

FRANCISCHINI, Heitor *et al.* A middle Permian (Roadian) lungfish aestivation burrow from the Rio do Rasto Formation (Paraná Basin, Brazil) and associated U-Pb dating. **Palaios**, v. 33, n. 2, p. 69-84, 2018.

FRANZINELLI, Elena; IGREJA, Hailton. Ponta das Lajes e o Encontro das Águas, AM - A Formação Alter do Chão como moldura geológica do espetacular Encontro das Águas Manauara. *In: Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*, 2011.

FREY, Robert W. **The study of trace fossils**. Springer-Verlag, 1975.

GAILLARD, Christian; OLIVERO, Davide; CHEBANCE, Marie. Probable aestivation burrows from the Eocene/Oligocene transition in South-Eastern France and their palaeoenvironmental implications. **Palaeoworld**, v. 22, n. 1-2, p. 52-67, 2013.

GALLOIS, Ramues W. Possible tetrapod burrows in the Mid Triassic Otter Sandstone Formation at Sidmouth, Devon, UK. **Geoscience in South-West England**, v.13, p. 208-215, 2013.

GALLOWAY, William E.; HOBDDAY, David K. Fluvial Systems. *In: Terrigenous Clastic Depositional Systems: Applications to Petroleum, Coal and Uranium Exploration*. Springer Science & Business Media, 1983, p. 51-80.

GENISE, Jorge Fernando. Soil Neighbors II. Traces of Other Organisms in Paleosols. Vertebrates and Roots. *In: Ichnoentomology*. Springer, Cham, 2017. p. 417-445.

GENISE, Jorge Fernando; BELLOSI, Eduardo S.; GONZALEZ, Mirta G. An approach to the description and interpretation of ichnofabrics in palaeosols. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 228, n. 1, p. 355-382, 2004.

GENISE, Jorge Fernando *et al.* Large ferruginized palaeorhizospheres from a Paleogene lateritic profile of Uruguay. **Sedimentary Geology**, v. 240, n. 3-4, p. 85-96, 2011.

GENISE, Jorge Fernando *et al.* The Phanerozoic four revolutions and evolution of paleosol ichnofacies. *In: The trace-fossil record of major evolutionary events*. Springer, Dordrecht, 2016. p. 301-370.

GHAZI, Shahid; MOUNTNEY, Nigel P. Facies and architectural element analysis of a meandering fluvial succession: The Permian Warchha Sandstone, Salt Range, Pakistan. **Sedimentary Geology**, v. 221, n. 1-4, p. 99-126, 2009.

GOBETZ, Katrinae E.; LUCAS, Spencer G.; LERNER, Allan J. Lungfish burrows of varying morphology from the Upper Triassic. **The Triassic-Jurassic Terrestrial Transition: 37**, v. 37, p. 140, 2006.

GOTTFRIED, Michael D. *et al.* A new Cretaceous lungfish (Dipnoi: Ceratodontidae) from the Rukwa Rift Basin, Tanzania. **African Natural History**, v. 5, p. 31-36, 2009.

GRAY, Duncan Peter; HARDING, Jon S. **Braided river ecology: a literature review of physical habitats and aquatic invertebrate communities**. Science & Technical Pub., Department of Conservation, 2007.

GRAY, Mary Beth; NICKELSEN, Richard P. Pedogenic slickensides, indicators of strain and deformation processes in redbed sequences of the Appalachian foreland. **Geology**, v. 17, n. 1, p. 72-75, 1989.

GREGORY, Murray R.; MARTIN, Anthony J.; CAMPBELL, Kathleen A. Compound trace fossils formed by plant and animal interactions: Quaternary of northern New Zealand and Sapelo Island, Georgia (USA). **Fossils and Strata**, v. 51, p. 88-105, 2004.

GROENEWALD, Gideon H. Burrow casts from the Lystrosaurus-Procolophon Assemblage-zone, Karoo Sequence, South Africa. **Koedoe**, v. 34, n. 1, p. 13-22, 1991.

GROENEWALD, Gideon H.; WELMAN, Johann; MAcEACHERN, James A. Vertebrate burrow complexes from the Early Triassic Cynognathus Zone (Driekoppen Formation, Beaufort Group) of the Karoo Basin, South Africa. **Palaios**, v. 16, n. 2, p. 148-160, 2001.

GULLIFORD, Alice R.; FLINT, Stephen S.; HODGSON, David M. Crevasse splay processes and deposits in an ancient distributive fluvial system: The lower Beaufort Group, South Africa. **Sedimentary Geology**, v. 358, p. 1-18, 2017.

HARRELL, T. Lynn; EHRET, Dana J. Lungfish tooth plates (Sarcopterygii, Dipnoi) from the Late Cretaceous (Santonian) Eutaw Formation of Alabama and Mississippi, USA. **Journal Of Paleontology**, v. 93, n. 3, p. 531-542, 2018.

HASIOTIS, Stephen T. Reconnaissance of Upper Jurassic Morrison Formation ichnofossils, Rocky Mountain Region, USA: paleoenvironmental, stratigraphic, and paleoclimatic significance of terrestrial and freshwater ichnocoenoses. **Sedimentary Geology**, v. 167, n. 3-4, p. 177-268, 2004.

HASIOTIS, Stephen T.; BOWN, Thomas M. Invertebrate trace fossils: the backbone of continental ichnology. **Short Courses in Paleontology**, v. 5, p. 64-104, 1992.

HASIOTIS, Stephen T.; MITCHELL, Charles E. A comparison of crayfish burrow morphologies: Triassic and Holocene fossil, paleo- and neo-ichnological evidence, and the identification of their burrowing signatures **International. Ichnos: An Journal of Plant & Animal**, Ichnos, v. 2, n. 4, p. 291-314, 1993.

HASIOTIS, Stephen T.; MITCHELL, Charles E.; DUBIEL, Russell F. Application of morphologic burrow interpretations to discern continental burrow architects: lungfish or crayfish?. **Ichnos: An International Journal of Plant & Animal**, v. 2, n. 4, p. 315-333, 1993.

HASIOTIS, Stephen T. *et al.* Vertebrate Burrows from Triassic and Jurassic Continental Deposits of North America and Antarctica: Their Paleoenvironmental and Paleocological Significance. **Ichnos**, v. 11, n. 1-2, p. 103-124, 2004

HASIOTIS, Stephen T. *et al.* The trace-fossil record of vertebrates. *In: Trace Fossils.* Elsevier, 2007. p. 196-218.

HASUI, Yociteru *et al.* **Geologia do Brasil**. São Paulo: Beca, 2012.

HEMBREE, Daniel I. Aestivation in the fossil record: evidence from ichnology. *In: Aestivation*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. p. 245-262.

HEMBREE, Daniel I.; MARTIN, Larry D.; HASIOTIS, Stephen T. Amphibian burrows and ephemeral ponds of the Lower Permian Speiser Shale, Kansas: evidence for seasonality in the midcontinent. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 203, n. 1-2, p. 127-152, 2004.

HERNÁNDEZ, José María *et al.* Los rizolitos de la Fm. Aguilar (Kimmeridgiense-Berriasiense, Palencia, Burgos y Cantabria): caracterización, génesis y significado. **Geogaceta**, v. 22, p. 93-96, 1997.

HETHERINGTON, Alexander J.; BERRY, Christopher M.; DOLAN, Liam. Multiple origins of dichotomous and lateral branching during root evolution. **Nature Plants**, v. 6, n. 5, p. 454-459, 2020.

HOLZ, Michael. **Estratigrafia de Sequências–Histórico, Princípios e Aplicações**. Rio de Janeiro, Editora Interciência, 272p., 2012.

HOORN, Carina *et al.* The Amazonian Craton and its influence on past fluvial systems (Mesozoic-Cenozoic, Amazonia). *In: Amazonia: landscape and species evolution: a look into the past*, Oxford: Wiley, p. 103-122, 2010.

HORBE, Adriana Maria C.; VIEIRA, Lucieth C.; NOGUEIRA, Afonso César R. Geoquímica de camadas vermelhas bioturbadas da Formação Alter do Chão, Cretáceo da Bacia do Amazonas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, n. 3, p. 396-402, 2006.

JONES, Brian *et al.* Primary siliceous rhizoliths from Loop Road hot springs, North Island, New Zealand. **Journal of Sedimentary Research**, v. 68, n. 1, p. 115-123, 1998.

KEMP, Anne. The biology of the Australian lungfish, *Neoceratodus forsteri* (Krefft 1870). **Journal of Morphology**, v. 190, n. S1, p. 181-198, 1986.

KEMP, Anne; CAVIN, Lionel; GUINOT, Guillaume. Evolutionary history of lungfishes with a new phylogeny of post-Devonian genera. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 471, p. 209-219, 2017.

KLAPPA, Colin F. Rhizoliths in terrestrial carbonates: classification, recognition, genesis and significance. **Sedimentology**, v. 27, n. 6, p. 613-629, 1980.

KRAPOVICKAS, Veronica *et al.* Large tetrapod burrows from the Middle Triassic of Argentina: a behavioural adaptation to seasonal semi-arid climate?. **Lethaia**, v. 46, n. 2, p. 154-169, 2013.

KRAUS, Mary J.; HASIOTIS, Stephen T. Significance of different modes of rhizolith preservation to interpreting paleoenvironmental and paleohydrologic settings: examples from Paleogene paleosols, Bighorn Basin, Wyoming, USA. **Journal of Sedimentary Research**, v. 76, n. 4, p. 633-646, 2006.

KUNIFOSHITA, André M.U. *et al.* Fácies e Minerais Pesados de Depósitos Cretáceos na Região Dômica de Monte Alegre, Estado do Pará. *In*: Congresso Brasileiro de Geoquímica, 2017, Búzios, **Anais [...]**, Búzios, 2017.

LADEIRA, Francisco Sergio B. Solos do passado: origem e identificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 6, p. 1773-1786, 2010.

LEOPOLD, Luna B.; WOLMAN, Markley G. **River channel patterns: braided, meandering, and straight**. US Government Printing Office, 1957.

LI, Zhuolun *et al.* Formation and environmental significance of late Quaternary calcareous root tubes in the deserts of the Alashan Plateau, northwest China. **Quaternary International**, v. 372, p. 167-174, 2015.

LIEM, Karel F. The biology of lungfishes: An epilogue. **Journal of Morphology**, v. 190, n. S1, p. 299-303, 1986.

LIUTKUS, Cynthia M. Using petrography and geochemistry to determine the origin and formation mechanism of calcitic plant molds; rhizolith or tufa?. **Journal of Sedimentary Research**, v. 79, n. 12, p. 906-917, 2009.

LOOPE, David B. Burrows dug by large vertebrates into rain-moistened Middle Jurassic sand dunes. **The Journal of Geology**, v. 114, n. 6, p. 753-762, 2006.

LUCAS, Spencer G. *et al.* Tetrapod burrows from the lower Jurassic Navajo Sandstone, southeastern Utah. **New Mexico Museum of Natural History Bulletin**, v. 37, p. 147-154, 2006.

MacNAUGHTON, Robert B. *et al.* Encyclopedia of Sediments and Sedimentary Rocks. **Geoscience Canada**, 2005.

MARSHALL, Madeline. S.; ROGERS, Raymond R. Lungfish burrows from the upper cretaceous Maevarano Formation, Mahajanga basin, northwestern Madagascar. **Palaios**, v. 27, n. 12, p. 857-866, 2012.

MARTIN, Anthony J. Dinosaur burrows in the Otway Group (Albian) of Victoria, Australia, and their relation to Cretaceous polar environments. **Cretaceous Research**, v. 30, n. 5, p. 1223-1237, 2009.

MARTIN, Anthony J. *et al.* Fossil evidence in Australia for oldest known freshwater crayfish of Gondwana. **Gondwana Research**, v. 14, n. 3, p. 287-296, 2008.

MARTIN, Charlotte A.L.; TURNER, Brian R. Origins of massive-type sandstones in braided river systems. **Earth-Science Reviews**, v. 44, n. 1-2, p. 15-38, 1998.

MATSUDA, Nilo S. *et al.* O Paleozoico da borda sul da Bacia do Amazonas, Rio Tapajós-Estado do Pará. **Boletim Geociências da Petrobras**, v. 18, n. 1, p. 123-152, 2010.

MCCAHERON, Thomas J.; MILLER, Keith B. Environmental significance of lungfish burrows (Gnathorhiza) within Lower Permian (Wolfcampian) paleosols of the US midcontinent. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 435, p. 1-12, 2015.

McALLISTER, James A. *et al.* Lungfish burrows in the Upper Triassic Chinle and Dolores formations, Colorado Plateau; comments on the recognition criteria of fossil lungfish burrows; discussion and reply. *Journal of Sedimentary Research*, v. 58, n. 2, p. 365-369, 1988.

MELO, V. F. *et al.* Características dos óxidos de ferro e de alumínio de diferentes classes de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 19-32, 2001.

MENDES, Anderson Conceição. **Fácies e Proveniência de Depósitos Siliciclásticos Cretáceos e Neógenos da Bacia do Amazonas: Implicações para a História Evolutiva do Proto-Amazonas**. 2015. 113f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará, Belém.

MENDES, Anderson C.; TRUCKENBROD, Werner; NOGUEIRA, Afonso César R. Análise faciológica da Formação Alter do Chão (Cretáceo, Bacia do Amazonas), próximo à cidade de Óbidos, Pará, Brasil. **Revista Brasileira de geociências**, v. 42, n. 1, p. 39-57, 2012.

MIALL, Andrew D. A review of the braided-river depositional environment. **Earth-Science Reviews**, v. 13, n. 1, p. 1-62, 1977a.

MIALL, Andrew D. Lithofacies Types and Vertical Profile Models in Braided River Deposits: A Summary. *In: Fluvial Sedimentology*. Geological Survey of Canada, Calgary, 1977b, 597-604.

MIALL, Andrew D. **Analysis of fluvial depositional systems**. AAPG, 1981.



MIALL, Andrew D. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. **Earth-Science Reviews**, v. 22, n. 4, p. 261-308, 1985.

MIALL, Andrew D. **Principles of Sedimentary Basin Analysis**. Springer Science Business, 1990.

MIALL, Andrew D. Alluvial deposits. *In: Facies models, response to sea level change*. Geological Association of Canada, St. John's, Newfoundland, 1992, 119-142.

MIALL, Andrew D. **The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology**. Springer-Verlag, 2006.

MIELKI, Guilherme Furlan. **Disponibilidade de ferro em solos tropicais e sua absorção pela planta**. 2014. 35f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MILES, Roger S. Dipnoan (lungfish) skulls and the relationships of the group: a study based on new species from the Devonian of Australia. **Zoological Journal of the Linnean Society**, v. 61, n. 1-3, p. 1-328, 1977.

MILLER, Molly F. *et al.* Tetrapod and large burrows of uncertain origin in Triassic high paleolatitude floodplain deposits, Antarctica. **Palaios**, v. 16, n. 3, p. 218-232, 2001.

MODESTO, Sean P.; BOTHA-BRINK, Jennifer. A burrow cast with *Lystrosaurus* skeletal remains from the Lower Triassic of South Africa. **Palaios**, v. 25, n. 4, p. 274-281, 2010.

MORAIS, Eduardo S.; ROCHA, Paulo Cesar. Formas e processos fluviais associados ao padrão de canal meandrante: o baixo rio do peixe, SP. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 3, 2016.

NASCIMENTO, Diego Luciano; LADEIRA, Francisco Sérgio B.; BATEZELLI, Alessandro. Feições biológicas em paleossolos da formação Marília em Minas Gerais. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 4371-4381, 2017a.

NASCIMENTO, Diego Luciano; BATEZELLI, Alessandro; LADEIRA, Francisco Sérgio B. Freshwater Decapoda trace fossils in floodplain paleosols of Marília Formation in Minas Gerais state (SE Brazil). **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 20, n. 3, p. 287-298, 2017b.

NASCIMENTO, Diego Luciano; BATEZELLI, Alessandro; LADEIRA, Francisco Sérgio B. The paleoecological and paleoenvironmental importance of root traces: plant distribution and topographic significance of root patterns in Upper Cretaceous paleosols. **Catena**, v. 172, p. 789-806, 2019.

NELSON, Joseph S.; GRANDE, Terry C.; WILSON, Mark V.H. **Fishes of the World**. John Wiley & Sons, 2016.

NOGUEIRA, Afonso C.R. *et al.* Paleossolos da Formação Alter do Chão, Cretáceo-Terciário da Bacia do Amazonas, regiões de Presidente Figueiredo e Manaus. **Boletim**, 1999.

NOGUEIRA, Afonso C.R. *et al.* A gênese dos níveis silicificados da Formação Alter do Chão, Cretáceo Superior da bacia do Amazonas. **SBG/NO, Simp. Geol. Amaz**, v. 8, 2003.

ORE, H. Thomas. Some criteria for recognition of braided stream deposits. **Rocky Mountain Geology**, v. 3, n. 1, p. 1-14, 1964.

OUAJA, Mohamed *et al.* Occurrence of an in situ fern grove in the Aptian Douiret Formation, Tataouine area, South-Tunisia. **Geobios**, v. 44, n. 5, p. 473-479, 2011.

PALMA, Katherine Andrea León. **Gênese e distribuição das silicificações aflorantes em Manaus**. 2014. 96f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Manaus.

PEREZ-GONZALEZ, M.D.; GRINKRAUT, C.N. Comportamento e metabolismo respiratório da *Lepidosiren paradoxa* durante a vida aquática e em estivação. **Bol. Zool. Biol. Marinha**, v. 28, n. 28, p. 137-164, 1971.

PIETSCH, Dana. Krotovinas – Soil Archives Of Steppe Landscape History. **Catena**, v. 104, p. 257-264, 2013.

PIETSCH, Dana *et al.* Krotovinas, Pedogenic Processes and Stratigraphic Ambiguities of the Upper Palaeolithic sites Kostenki and Borshchevo (Russia). **Quaternary International**, v. 324, p. 172-179, 2013.

PONOMARENKO, Dmitri; PONOMARENKO, Elena. Describing krotovinas: A contribution to methodology and interpretation. **Quaternary international**, v. 502, p. 238-245, 2019.

POTTER, Paul Erving. The Mesozoic and Cenozoic paleodrainage of South America: a natural history. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 10, n. 5-6, p. 331-344, 1997.

PRICE, Llewellyn I. Dentes de Theropoda num testemunho de sonda no estado do Amazonas. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 32, n. 1, p. 79-84, 1960.

PUSEY, Brad; KENNARD, Mark J.; ARTHINGTON, Angela H. **Freshwater fishes of north-eastern Australia**. CSIRO publishing, 2004.

REESINK, Arnold JH; BRIDGE, J. S. Influence of bedform superimposition and flow unsteadiness on the formation of cross strata in dunes and unit bars—Part 2, further experiments. **Sedimentary Geology**, v. 222, n. 3-4, p. 274-300, 2009.

REINFELDS, Ivars; NANSON, Gerald. Formation of braided river floodplains, Waimakariri River, New Zealand. **Sedimentology**, v. 40, n. 6, p. 1113-1127, 1993.

RETALLACK, Gregory J. **Soils of the past: an introduction to paleopedology**. John Wiley & Sons, 2001.

RETALLACK, Gregory J.; ALONSO-ZARZA, Ana María. Middle Triassic paleosols and paleoclimate of Antarctica. **Journal of Sedimentary Research**, v. 68, n. 1, p. 169-184, 1998.

RETALLACK, Gregory J. *et al.* Field recognition of paleosols. **Geological Society of America Special Paper**, v. 216, p. 1-20, 1988.

RIBEIRO, Helio Jorge P.S. Estratigrafia de seqüências, fundamentos e aplicações. **São Leopoldo: Editora Unisinos**, 2001.

RICCOMINI, Cláudio; COIMBRA, Armando Márcio. Sedimentação em rios entrelaçados e anastomosados. **Boletim IG-USP. Série Didática**, n. 6, p. 1-37, 1993.

RINDSBERG, Andrew K. Ichnotaxonomy: finding patterns in a welter of information. *In: Developments in sedimentology*. Elsevier, 2012. p. 45-78.

RICHTER, Martha; TOLEDO, Carlos Eduardo V. The first Triassic lungfish from South America (Santa Maria Formation, Paraná Basin) and its bearing on geological correlations within Pangaea. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 295, n. 1, p. 43-54, 2008.

RODRÍGUEZ-ARANDA, Juan Pablo; CALVO, José Pedro. Trace fossils and rhizoliths as a tool for sedimentological and palaeoenvironmental analysis of ancient continental evaporite successions. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 140, n. 1-4, p. 383-399, 1998.

ROMER, Alfred S.; OLSON, Everett C. Aestivation in a Permian lungfish. **Breviora**, v. 30, 1954.

ROSSETTI, Dilce F. Soft-sediment deformation structures in late Albian to Cenomanian deposits, São Luís Basin, northern Brazil: evidence for palaeoseismicity. **Sedimentology**, v. 46, n. 6, p. 1065-1081, 1999.

ROSSETTI, Dilce F.; NETTO, Renata G. First evidence of marine influence in the Cretaceous of the Amazonas Basin, Brazil. **Cretaceous Research**, v. 27, n. 4, p. 513-528, 2006.

ROZO, José Max G. **Evolução holocênica do Rio Amazonas entre a ilha do Careiro e a foz do Rio Madeira**. 2004. 93f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Manaus.

ROZO, José Max G. *et al.* Depósitos neógenos da Bacia do Amazonas. **Contribuições à geologia da Amazônia**, v. 4, p. 201-207, 2005.

RUCHKYS, Úrsula A. *et al.* A paleotoca da Serra do Gandarela e seu potencial como geossítio do Geoparque Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais/The paleoburrow of the Gandarela Mountains and its potential as a geosite of the QF Geopark, MG. **Caderno de Geografia**, v. 24, n. 42, p. 249-263, 2014.

SARGES, Roseane Ribeiro. **Relações entre as estruturas tectônicas, sedimentação coluvial e geomorfogênese da região de Manaus/ Amazonas**. 2007. 109f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Geoquímica e Geotectônica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SARJEANT, William Antony S. Plant trace fossils. *In: The study of trace fossils*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1975, p. 163-179.

SAWAYA, Paulo; SHINOMIYA, Naomi. Biologia da Tambaki-M'boya – Lepidosiren paradoxa (Fitz. 1836) peixe, dipnoico – metabolismo da glicose. **Boletim de Zoologia e Biologia Marinha**, v. 29, p. 1-44, 1972.

SCHNEIDER, Jörg W.; RÖßLER, Ronny. A Permian calcic paleosol containing rhizoliths and microvertebrate remains from the Erzgebirge Basin, Germany-environment and taphonomy. **Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen**, p. 243-258, 1996.

SCHUMM, Stanley A. Patterns of alluvial rivers. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 13, n. 1, p. 5-27, 1985.

SEILACHER, Adolf. Biogenic Sedimentary Structures. *In: Approaches to Paleocology*. Wiley, p. 296-316, 1964.

SEMERARO, Anthony *et al.* Paleocurrent variability in meandering and braided river systems: Modern calibration and stratigraphic case studies spanning the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *In: Geophysical Research Abstracts*, v. 21, 2019.

SENNIKOV, Andrey G. Lungfish (Dipnoi) Burrows from the Triassic of the Southern Cis-Urals. **Paleontological Journal**, v. 52, n. 12, p. 1408-1411, 2018.

- SIDOR, Christian A.; MILLER, Molly F.; ISBELL, John L. Tetrapod burrows from the Triassic of Antarctica. **Journal of Vertebrate Paleontology**, v. 28, n. 2, p. 277-284, 2008.
- SILVA, Adriano A.; DELATORRE, Carla Andréa. Alterações na arquitetura de raiz em resposta à disponibilidade de fósforo e nitrogênio. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 8, n. 2, p. 152-163, 2009.
- SILVA, Viviane M.; MENDES, Anderson C. Reconstrução Paleoambiental de Depósitos Cretáceos e Cenozóicas da Bacia do Amazonas, Região do Oeste do Pará, com Base em Petrografias de Arenitos. *In: Congresso Brasileiro de Geoquímica*, 2017, Búzios, **Anais [...]**, Búzios, 2017.
- SILVA, Glauber S.F. *et al.* Aestivation in the South American lungfish, *Lepidosiren paradoxa*: effects on cardiovascular function, blood gases, osmolality and leptin levels. **Respiratory physiology & neurobiology**, v. 164, n. 3, p. 380-385, 2008.
- SILVA, Eduardo Francisco *et al.* Descrições Faciológicas da Formação Alter do Chão na Margem Direita do Rio Tapajós, Santarém-PA. *In: Simpósio de Geologia da Amazônia*, 2015, Marabá, **Anais [...]**, Marabá, 2015, p. 48-51.
- SILVA, Márcio Luiz da; BATEZELLI, Alessandro; LADEIRA, Francisco Sérgio Bernardes. The mineralogy of paleosols in the Marília Formation and their importance in the environmental evolution of the Maastrichtian of the Bauru Basin in southeastern Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 47, n. 3, p. 403-426, 2017.
- SILVA, João H. *et al.* Raman and infrared spectroscopy investigation of the root fossil (rhizoliths) from the Carboniferous period, Piauí Formation, Parnaíba Sedimentary Basin, Northeast Brazil. **Vibrational Spectroscopy**, v. 100, p. 117-122, 2019.
- SILVA SANTOS, R. *Lepidosiren megalos* n. sp. do Terciário do Estado do Acre—Brasil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 59, n. 4, p. 375-384, 1987.
- SIMPSON, Scott. Classification of trace fossils. *In: The study of trace fossils*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1975, p. 39-54.
- SKRZYCKI, Piotr; NIEDŹWIEDZKI, Grzegorz; TAŁANDA, Mateusz. Dipnoan remains from the Lower-Middle Triassic of the Holy Cross Mountains and northeastern Poland, with remarks on dipnoan palaeobiogeography. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 496, p. 332-345, 2018.
- SMITH, Geoffrey. **Primitive animals**. Cambridge University Press, 1911.
- SMITH, Roger M.H. Helical burrow casts of therapsid origin from the Beaufort Group (Permian) of South Africa. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 60, p. 155-169, 1987.

SOARES, Emílio Alberto A. **Depósitos pleistocenos da região de confluência dos rios Negro e Solimões, porção oeste da Bacia do Amazonas**. 2007. 205f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SOARES, Emílio Alberto A.; WAHNFRIED, Ingo; DINO, Rodolfo. Estratigrafia de subsuperfície da sequência sedimentar cretáceaneógena das regiões de Manaus e Itacoatiara, Amazônia Central. **Geologia USP. Série Científica**, v. 16, n. 1, p. 23-41, 2016.

SOTO, Matías; PEREA, Daniel. Late Jurassic lungfishes (Dipnoi) from Uruguay, with comments on the systematics of Gondwanan ceratodontiforms. **Journal of Vertebrate Paleontology**, v. 30, n. 4, p. 1049-1058, 2010.

SOUZA, Valmir S.; NOGUEIRA, Afonso César R. Manaus-Presidente Figueiredo (AM), borda norte da Bacia do Amazonas: um guia para excursão de campo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39, n. 1, p. 16-29, 2009.

SUN, Qingfeng *et al.* Formation and paleoenvironment of rhizoliths of Shiyang river basin, Tengger Desert, NW China. **Quaternary international**, v. 502, p. 246-257, 2019.

SURLYK, Finn; MILÀN, Jesper; NOE-NYGAARD, Nanna. Dinosaur tracks and possible lungfish aestivation burrows in a shallow coastal lake; lowermost Cretaceous, Bornholm, Denmark. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 267, n. 3-4, p. 292-304, 2008.

TANNER, P. W. G. Desiccation structures (mud cracks, etc.). *In: Encyclopedia of sediments and sedimentary rocks*. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Dordrecht, Springer, 1978.

TAVARES, Amauri C. *et al.* Reconstrução Paleoambiental da Formação Alter do Chão na Área Urbana de Santarém-PA. *In: Congresso Brasileiro de Geoquímica*, 2017, Búzios, **Anais [...]**, Búzios, 2017.

TAYLOR, Thomas N. *et al.* How Fungal Fossils Are Formed And Studied. *In: Fossil fungi*. Academic Press, 2015, p. 13-26.

TOLEDO, Carlos Eduardo V.; BERTINI, Reinaldo J. Occurrences of the fossil Dipnoiformes in Brazil and its stratigraphic and chronological distributions. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 8, n. 1, p. 47-56, 2005.

TOLEDO, Carlos Eduardo V. *et al.* A new genus of Dipnoiformes from the Cretaceous of Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 83, n. 4, p. 1181-1192, 2011.

TUCKER, Maurice E. **Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks**. John Wiley & Sons, 1991.

TUCKER, Maurice E. **Sedimentary rocks in the field**. John Wiley & Sons, 2003.

VAN DONSELAAR-TEN BOKKEL HUIJINK, W.A.E. Structure, root systems and periodicity of savanna plants and vegetations in northern Surinam. **Wentia**, v. 17, n. 1, p. 1-162, 1966.

VARRICCHIO, David J.; MARTIN, Anthony J.; KATSURA, Yoshihiro. First trace and body fossil evidence of a burrowing, denning dinosaur. **Proceedings of the Royal Society B: biological sciences**, v. 274, n. 1616, p. 1361-1368, 2007.

VAUGHN, Peter Paul. Evidence of Aestivation Lungfish from the Sangre de Cristo Formation Lower Permian of Northern New Mexico. **Los Angeles County Museum**, 1964.

VIEIRA, Lucieth Cruz. **Paleossolos de depósitos cretáceos da Formação Alter do Chão, Nordeste do Amazonas**. 2002. 74f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Manaus.

VOIGT, Sebastian *et al.* Complex tetrapod burrows from Middle Triassic red beds of the Argana basin (western High Atlas, Morocco). **Palaios**, v. 26, n. 9, p. 555-566, 2011.

WALKER, Roger G. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. *In*: **Facies Models: Response to sea Level Change**. St. John's, Geological Association of Canada, 1992, p. 1-14.

WANDERLEY FILHO, Joaquim R *et al.* Bacias sedimentares brasileiras: bacia do Amazonas. **Fundação Paleontológica Phoenix**, v. 82, p. 1-6, 2005.

WANG, Qiu-Bing *et al.* Digital soil morphometrics of krotovinas in a deep Alfisol derived from loess in Shenyang, China. **Geoderma**, v. 301, p. 11-18, 2017.

WOODROW, Donald L.; FLETCHER, Frank W. Devonian dipnoan aestivation cylinders. **Geological Society of America, Special Paper**, v. 121, p. 383-384, 1969.

WRIGHT, Victor Paul. Paleosol recognition: a guide to early diagenesis in terrestrial settings. *In*: **Developments in Sedimentology**. Elsevier, 1992, p. 591-619.

## APÊNDICE

**Apêndice A:** Manuscrito submetido ao periódico Anuário em Geociências – UFRJ em 03/03/2020.

### **Paleotocas de Dipnoicos da Formação Alter do Chão (Cretáceo, Bacia do Amazonas) em Ponta das Lajes, Manaus – AM: Classificação e Significado Paleoambiental**

Dipnoic Burrows of the Alter do Chão Formation (Cretaceous, Amazon Basin) in Ponta das Lajes, Manaus – AM: Classification and Environmental Significance

Tamna Gadelha da Silva<sup>1</sup>; Valquíria Porfírio Barbosa<sup>1</sup>; Davi Paulo Silva<sup>1</sup> & Roberto Cesar de Mendonça Barbosa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Av. General Rodrigo Octávio, 6200, 69080-900, Manaus, AM, Brasil

E-mails: [tamnagadelhasilva@gmail.com](mailto:tamnagadelhasilva@gmail.com); [valquiriasdpb@ufam.edu.br](mailto:valquiriasdpb@ufam.edu.br); [davipauloit@gmail.com](mailto:davipauloit@gmail.com); [rbarbosa@ufam.edu.br](mailto:rbarbosa@ufam.edu.br)

### **Resumo**

Este trabalho registra a ocorrência de paleotocas no afloramento Ponta das Lajes, Manaus-AM (Formação Alter do Chão, Cretáceo da Bacia do Amazonas) e teve como principais propostas classificar e corroborar a natureza das estruturas identificadas na categoria paleotocas e identificar o animal produtor. As análises envolveram, essencialmente, descrição e interpretação faciológica das rochas, caracterização morfológica das paleotocas e comparação com icnofósseis afins descritos e ilustrados na literatura, seguindo os padrões icnotaxonômicos convencionais. Os resultados obtidos indicam tratarem-se realmente de paleotocas e que estas foram produzidas por peixes dipnoicos durante fases de estivação. Além do registro paleontológico das paleotocas de peixes dipnoicos, a caracterização da gênese destas estruturas em conjunto com as interpretações faciológicas da rocha hospedeira, também forneceram informações a respeito do ambiente deposicional da Formação Alter do Chão na área de estudo, interpretado como lagos sazonais de planície de inundação, tendo as paleotocas se formado durante os períodos de seca de um sistema fluvial entrelaçado.

**Palavras-chave:** Icnofósseis; Formação Alter do Chão; Bacia do Amazonas



## Abstract

This paper documents the occurrence of burrows of an outcrop in Ponta das Lajes, Manaus-AM (Alter do Chão Formation, Amazonas Basin Cretaceous) and it had as a main purpose to classify and reassess the nature of the structures recognized as burrows and as well as identify the animal which produced it. The analysis essentially included the faciological description and the interpretation of the rocks, morphological characterization of the burrows and the comparison between the recognized ichnofossils and the ones previously registered in the literature following the conventional ichnotaxonomic pattern. The acquired results authenticate that the structures are burrows produced by lungfishes (Dipnoi) during aestivation phases. Besides the paleontological record on the burrows of the lungfishes, the association of the genesis characterization of those structures and the faciological interpretation of the host rock also provide information about the depositional environment of the Alter do Chão Formation in the studied area, which was interpreted as a floodplain seasonal lake in which burrows were formed during drier periods in a braided river system.

**Keywords:** Ichnofossils, Alter do Chão Formation, Amazon Basin

## 1 Introdução

A Formação Alter do Chão (Grupo Javari, Cretáceo da Bacia do Amazonas) é reconhecida como uma unidade litoestratigráfica com conteúdo paleontológico pobre, particularmente em relação a fósseis corpóreos. Apesar disso, estudos paleontológicos e sedimentológicos nesta unidade citam, com certa frequência, a ocorrência de icnofósseis, nos quais dentre as principais categorias de icnofósseis registradas distinguem-se moldes (Palma, 2014), marcas de raiz (Vieira, 2002; Horbe *et al.*, 2006; Franzinelli & Igreja, 2011; Mendes *et al.*, 2012), paleotocas (Franzinelli & Igreja, 2011) e traços-fósseis como *Scoyenia*, *Skolithos* e *Muensteria* (Nogueira *et al.*, 1999), *Thalassinoides* (Rossetti & Neto, 2006; Abinader, 2008), *Planolites* e *Diplocraterion* (Rossetti & Neto, 2006) e *Taenidium* (Abinader, 2008).

No que se refere às paleotocas, o único registro na Formação Alter do Chão é o de Franzinelli & Igreja (2011), que identificaram paleotocas de natureza indeterminada justamente na área de estudo deste trabalho. Embora pontual, esta ocorrência possui significativa importância para o registro paleontológico da Formação Alter do Chão, tanto pelo seu caráter inédito quanto pela quantidade representativa destes icnofósseis na área de estudo.

Além disso, como demonstrado pela literatura (*e. g.*, Hasiotis *et al.*, 2007; Dentzien-Dias *et al.*, 2012; Rindsberg, 2012), paleotocas são ferramentas muito úteis na inferência de parâmetros bióticos e abióticos de paleoecossistemas, principalmente se identificado o

organismo gerador, por isso, neste estudo também foram elementos importantes para a caracterização de fácies e ambientes sedimentares na área de estudo.

Considerando estes aspectos, foram desenvolvidas análises paleontológicas e faciológicas em uma sequência sedimentar siliciclástica correlacionada à Formação Alter do Chão (Grupo Javari, Cretáceo da Bacia do Amazonas) que aflora na localidade Ponta das Lajes, zona Leste da cidade de Manaus, AM ( $03^{\circ}06'42''\text{S} - 03^{\circ}07'02''\text{W} / 59^{\circ}54'11''\text{W} - 59^{\circ}54'26''\text{W}$ ) (Figura 1). As análises paleontológicas destinaram-se à classificação e ao levantamento do significado paleoecológico das paleotocas e, as sedimentológicas, ao reconhecimento de fácies sedimentares, tendo a integração entre os dados obtidos nestas análises levado a inferência de um ambiente de sedimentação fluvial entrelaçado.

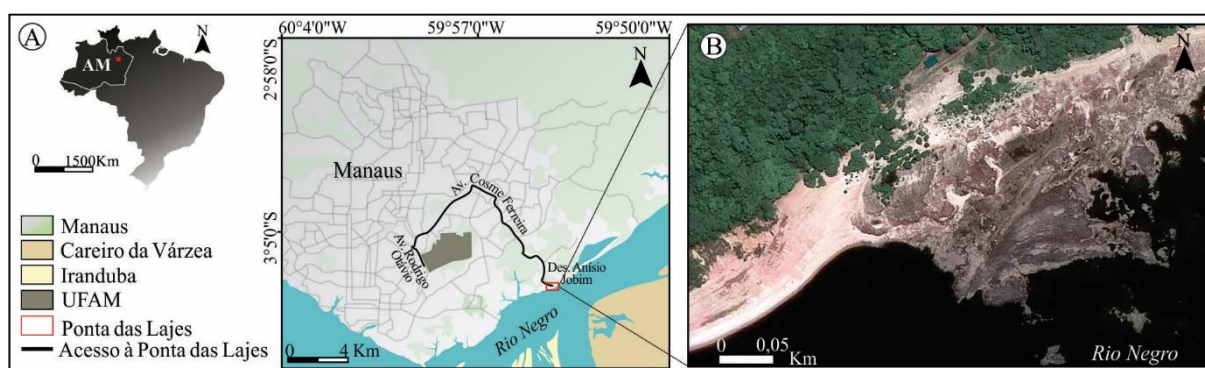


Figura 1 Área de estudo. A) Mapa de localização com acesso à Ponta das Lajes a partir da UFAM; B) Imagem de satélite correspondente à área de estudo (Google Earth).

## 2 Contexto Geológico da Área de Estudo

Segundo Cunha *et al.* (2007), a Bacia do Amazonas é uma bacia intracratônica com aproximadamente 515.000 km<sup>2</sup> de extensão limitada a norte e sul pelos escudos da Guiana e do Brasil Central e a leste e oeste pelos arcos de Gurupá e Purus, respectivamente (Figura 2A). O preenchimento sedimentar e ígneo da bacia é estimado em até 5000 m de espessura na área de depocentro e foi subdividido por Cunha *et al.* (2007), em duas megassequências deposicionais de primeira ordem, uma Paleozoica (Ordoviciano – Permiano) e outra Mesozoica (Cretáceo – Recente) (Figura 2B).

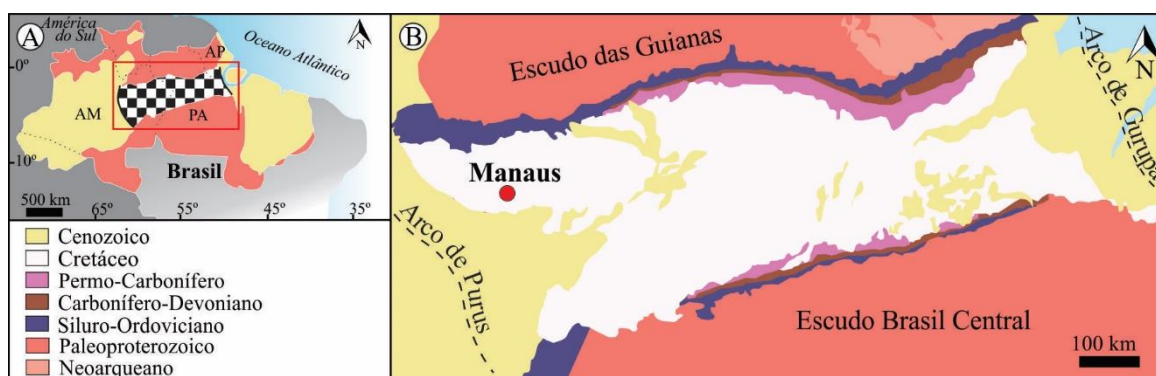


Figura 2 Contexto geológico; A. Localização geográfica da Bacia do Amazonas; B.

Sequências sedimentares das Bacia Sedimentar do Amazonas, no qual o Cretáceo está representado pela Formação Alter do Chão (Modificado de Wanderley Filho *et al.*, 2005).

A partir do estabelecimento de correlações litoestratigráficas com dados da literatura corrente (*e. g.*, Vieira, 2002; Horbe *et al.* 2006, Franzinelli & Igreja, 2011; Palma, 2014; Soares *et al.*, 2016), a sucessão sedimentar que compõe a área de estudo foi relacionada à Formação Alter do Chão (Grupo Javari, Bacia do Amazonas). De acordo com a literatura (*vide* Souza & Nogueira, 2009; Dino *et al.*, 2012; Soares *et al.*, 2016), esta unidade é composta essencialmente por arenitos intercalados com siltitos e argilitos e, subordinadamente, conglomerados, distinguindo-se entre as principais fácies sedimentares identificadas Conglomerado maciço (Vieira, 1999; Mendes, 2012), Arenito com estratificação cruzada acanalada (Vieira, 1999; Mendes, 2012), Arenito com estratificação cruzada tabular (Vieira, 1999; Mendes, 2012) e Pelito bioturbado (Mendes, 2012).

Em relação à idade da Formação Alter do Chão, diferentes estudos indicam idades cretáceas. A partir de estudos palinológicos Daemon (1975) propôs uma idade entre o Meso-Albiano e o Turoniano, enquanto Dino *et al.* (1999) atribuíram idades entre o Aptiano e o Cenomanino. Quanto ao ambiente deposicional, distintos estudos (*e. g.*, Dino *et al.*, 1999; Nogueira *et al.*, 1999, 2003; Horbe *et al.*, 2006; Cunha *et al.*, 2007; Souza & Nogueira, 2009; Hoorn *et al.*, 2010; Mendes *et al.*, 2012) consideram a Formação Alter do Chão representativa de sistemas fluvial e lacustre, com base na caracterização de diferentes fácies associadas a estes sistemas (*e. g.*, depósitos de preenchimento de canal e planície de inundação). Rossetti & Netto (2006), entretanto, sugerem um sistema deltaico, com influência marinha e dominado por onda, cuja interpretação parte da predominância de estruturas sedimentares geradas por ondas e em uma suíte de *Thalassinoides*, icnofósseis comumente, identificados em ambientes marinhos.

### 3 Material e Métodos

A caracterização sedimentológica do afloramento Ponta das Lajes, seguiu as propostas de Miall (2013) para a elaboração do perfil colunar e de Miall (1977, 2006) para individualização e nomenclatura de litofácies, que se baseou no reconhecimento da litologia, geometria, textura, estruturas sedimentares, padrão de paleocorrentes e conteúdo fossilífero.

O estudo icnológico envolveu descrição e elaboração de desenhos *in situ* das paleotocas, coleta de fragmentos transversais, aquisição de fotografias e georreferenciamento dos pontos de ocorrência. O material coletado foi analisado e depositado no Laboratório de Paleontologia do Departamento de Geociências, Universidade Federal do Amazonas – UFAM.

A descrição morfológica dos icnofósseis compreendeu o reconhecimento de caracteres diagnósticos comumente utilizados na literatura para a identificação de paleotocas, (*vide* Lucas *et al.*, 2006; Hasiotis *et al.*, 2007; Marshall & Rodgers, 2012; Bordy & Krummeck, 2016), entre os quais usualmente distinguem-se: complexidade da arquitetura, orientação no substrato, dimensões e formato (longitudinal e transversal), presença/ausência de câmaras e marcas superficiais (*e. g.*, estrias e arranhões). A descrição da morfologia arquitetural e superficial, em particular, seguiu os critérios empregados para paleotocas mesozoicas de crustáceos (*vide* Hasiotis *et al.*, 1993; Martin *et al.*, 2008), tetrápodes (*vide* Lucas *et al.*, 2006; Varricchio *et al.*, 2007) e peixes dipnoicos (*vide* Marshall & Rodgers, 2012; McCahon & Miller, 2015), considerados principais produtores de paleotocas de dimensões compatíveis com os exemplares estudados em ambientes continentais, durante o Mesozoico.

### 4 Resultados e Discussões

#### 4.1 Síntese da Caracterização Sedimentológica em Ponta da Lajes

O afloramento Ponta das Lajes, objeto deste estudo, ocupa uma área de aproximadamente 113.000 m<sup>2</sup> de extensão, na qual afloram rochas sedimentares siliciclásticas que compõem uma sucessão de até 16 m de espessura, onde distinguem-se arenitos, siltitos, argilitos e lentes de conglomerados. Parte desta sucessão encontra-se silicificada e/ou moderadamente intemperizadas, porém é possível identificar icnofósseis (paleotocas e rizólitos), estruturas sedimentares (*e. g.*, estratificações e laminações) e pedogenéticas (*slickensides* e *peds*).

Como produto da análise sedimentológica dos afloramentos foram identificadas oito litofácies (Conglomerado maciço – Cm; Arenito com estratificação cruzada acanalada – Aa; Arenito com estratificação cruzada tabular – At; Arenito com laminação cruzada cavalgante – Al; Arenito maciço – Am; Silito com laminação cruzada cavalgante – Sl; Silito bioturbado – Sb; Pelito maciço – Pm) (Tabela 1), agrupados em duas associações de fácies – AF1 e AF2, interpretadas como representativas de um sistema deposicional fluvial entrelaçado, no qual

distingue-se depósitos de preenchimento do canal fluvial (AF1) e de planície de inundação (*crevasse splay* e lago) (AF2) (Figura 3).

Descrições, discussões e interpretações pormenorizadas das fácies sedimentares podem ser apreciadas em Silva (2020).

<b>Litofácies</b>	<b>Siglas</b>	<b>Processos deposicionais</b>
<b>Conglomerado maciço</b>	Cm	Fluxos de detritos viscosos.
<b>Arenito com estratificação cruzada acanalada</b>	Aa	Migração de dunas de cristas sinuosas por fluxo unidirecional em regime de fluxo inferior.
<b>Arenito com estratificação cruzada tabular</b>	At	Migração de dunas de cristas retas por fluxo unidirecional em regime de fluxo inferior.
<b>Arenito com laminação cruzada cavalgante</b>	Al	Migração de marcas de onda sob corrente trativa em regime de fluxo inferior.
<b>Arenito maciço</b>	Aa	Fluxo denso episódico.
<b>Siltito com laminação cruzada cavalgante</b>	Sl	Suspensão associado a tração.
<b>Siltito bioturbado</b>	Sb	Suspensão, com exposição subaérea e alterações pedogenéticas.
<b>Pelito maciço</b>	Pm	Suspensão.

Tabela 1 Litofácies da Formação Alter do Chão em Ponta das Lajes e processos deposicionais, interpretados segundo Miall (1977, 2006).

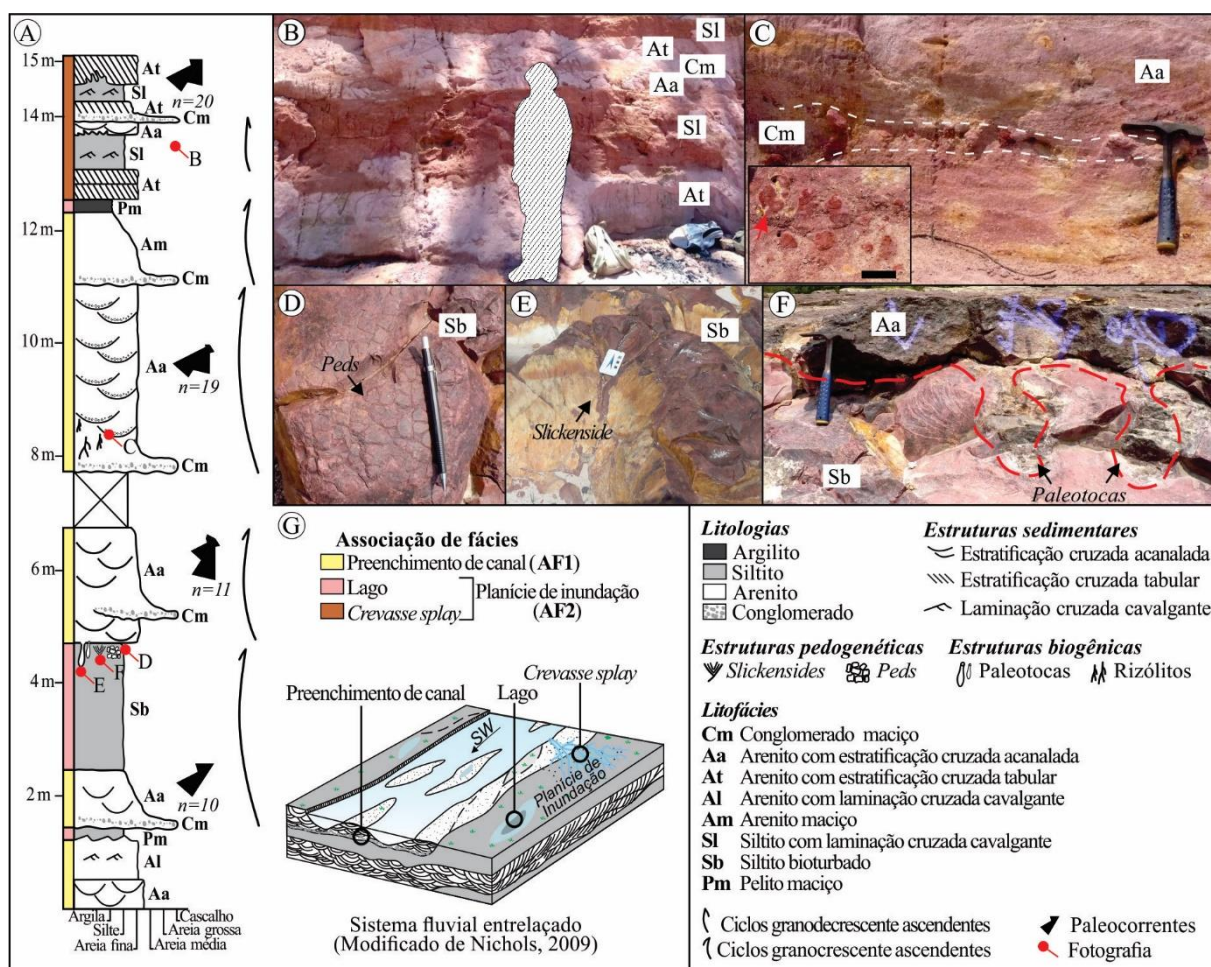


Figura 3 Análise faciológica da Formação Alter do Chão em Ponta das Lajes, Manaus-AM; A. Perfil estratigráfico; B. Depósitos de *crevasse splay*; C. Depósitos de preenchimento de canal, com destaque para os clastos de argila (seta vermelha); D. *Peds*; E. *Slickensides* pedogenéticos; F. Paleotocas; G. Associação de fácies em um sistema fluvial entrelaçado.

## 4.2 Paleotocas

Com base nos critérios de descrição de diferentes categorias de icnofósseis, são interpretadas como paleotocas as estruturas cilíndricas a subcilíndricas de arquitetura simples, pois a orientação sub vertical em relação ao acamamento, a entrada indistinta, a terminação arredondada e, principalmente, variação do diâmetro ao longo da estrutura, são consideradas características relacionadas a estruturas de escavações produzidas para habitação temporária ou permanente segundo a literatura (*e. g.*, Hasiotis *et al.*, 2007; Simpson, 1975).

As paleotocas, via de regra, apresentam preenchimento maciço por areia fina a média, orientação sub-vertical, superfície lisa a segmentada, terminações inferiores arredondadas e terminações superiores indistintas. Em vista longitudinal, possuem arquitetura simples e forma alongada com tendência cilíndrica (Figuras 4A, 4B e 4C). O comprimento vertical varia entre 20 e 40 cm (média de 34 cm) e o diâmetro, em seção transversal, varia entre 8,3 e 15,6

cm. Longitudinalmente, observa-se variações no diâmetro das tocas, formando zonas mais estreitas e mais expandidas, configurando uma morfologia marcada por uma porção inferior estreitada e arredondada, seguida de uma ampliação na porção intermediária e concluindo com uma porção superior com tendência mais estreita e cilíndrica (Figura 4A).

Além destes exemplares, na fácies Sb é possível observar em seção transversal numerosas estruturas circulares a semicirculares angulosas, as quais foram aqui interpretadas também como paleotocas (Figura 4D). O diâmetro destas estruturas varia entre 2,7 e 10 cm, porém, em função da disposição da camada, não é possível aferir seu comprimento. Exemplares semelhantes, dissociados da rocha também foram encontrados e coletados (Figura 4E).

Outra feição comum tanto em vista longitudinal quanto transversal é a presença de halos de descoloração contornando as paleotocas. Estes apresentam espessuras entre 1 e 3 cm e se destacam por forte contraste com a rocha hospedeira (Figura 4B).

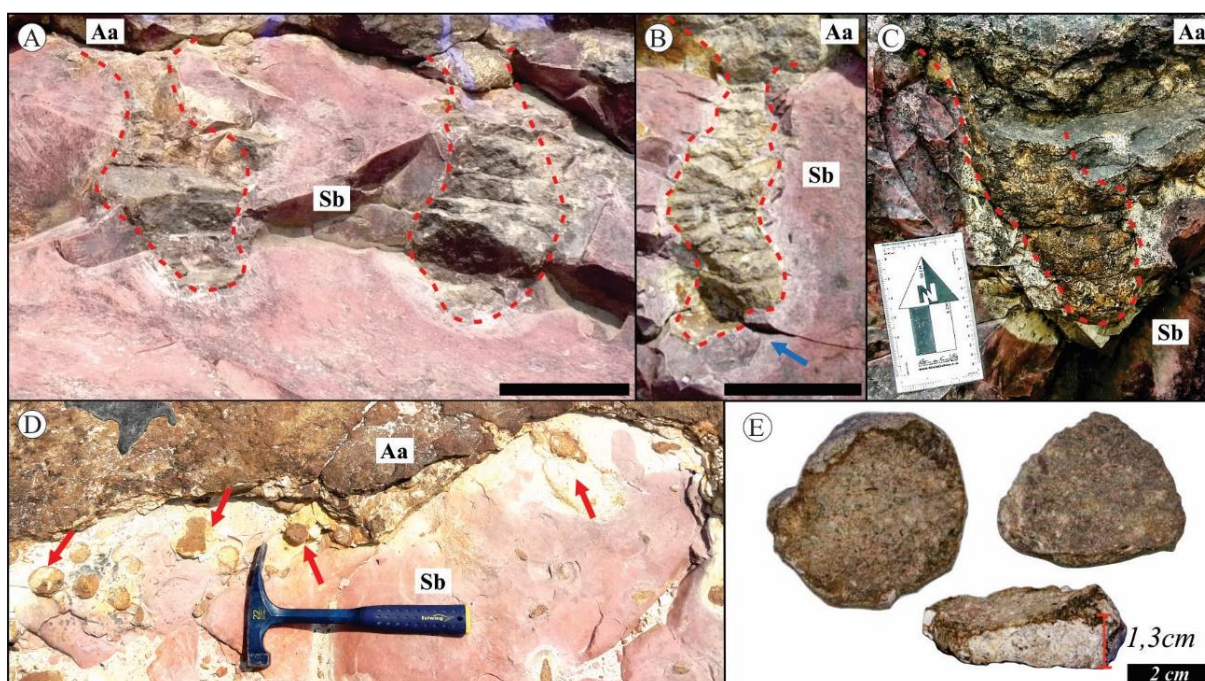


Figura 4 Paleotocas; A; B; C. A morfologia simples e sub vertical das paleotocas podem ser observadas em vista longitudinal em contornadas por um halo de dissolução (seta azul); D. Variedade de formatos observadas em vista transversal; E. Fragmentos achatados com formatos circulares a angulosos.

#### 4.2.1 Possível Animal Escavador das Paleotocas

Em geral, a ausência de registros fósseis corpóreos é muitas vezes um empecilho para a determinação do organismo gerador de um icnofóssil, entretanto, graças a consecutiva ampliação do registro paleoicnológico, já são conhecidos caracteres morfológicos diagnósticos para um número representativo de icnofósseis. No que se refere às paleotocas,

segundo Hasiotis *et al.* (2007) a interpretação do produtor de uma paleotoca baseia-se, primeiramente, no estabelecimento de comparações morfológicas com animais existentes e suas tocas. Neste sentido, considerando a interpretação do paleoambiente deposicional inferido, Miller *et al.* (2001) ressaltam que paleotocas descritas em depósitos associados a planícies de inundação modernas e antigas, são mais comumente produzidas por crustáceos, tetrápodes e peixes dipnoicos, cujas principais características podem ser observadas abaixo, na Tabela 2.

	<b>Neste estudo</b>	<b>Crustáceos</b>	<b>Tetrápodes (Terapsídeos)</b>	<b>Tetrápodes (Dinossauros)</b>	<b>Peixes dipnoicos</b>
Arquitetura	Simples, cilíndricas	Simples a complexas	Simples e a complexas	Simples, curvas a sinuosas	Simples, cilíndricas
Orientação	Sub vertical	Vertical e horizontal	Sub-horizontal e vertical (raro)	Sub-horizontal	Sub vertical
Seção transversal	Circular e em forma de 8 (raro)	Circular a elíptica (raro)	Arredondado a subcircular	Circular a elíptica	Circular, elíptica e em forma de 8
Diâmetro (cm)	2,7 – 15,6	0,5 – ~10	5 – 34	30 – 40	2 – 15
Comprimento (cm)	Até 40	24 – >200	~ 8 – ~50	100 a 200	6 – ~70
Câmara terminal	Ausente	Presente	Presente	Presente	Ausente

Tabela 2 Principais caracteres morfológicos comparáveis entre o material de estudo e exemplos de paleotocas produzidas por invertebrados e vertebrados durante o Mesozoico.

Nesse contexto, estudos voltados à caracterização da morfologia de paleotocas de crustáceos, a partir da comparação com tocas modernas (*e. g.*, Hasiotis & Mitchell, 1993; Hasiotis *et al.*, 1993; Martin *et al.*, 2008; Baucon *et al.*, 2014), indicam que estas se constituem estruturas verticalizadas a sub horizontalizadas de arquitetura variada (desde simples até galerias complexas com várias ramificações e câmaras), apresentam extensa variedade de comprimentos e diâmetros (comumente menores que 10 cm) e são preferencialmente circulares em seção transversal. Além disso, sua superfície é frequentemente marcada por arranhões ou revestimentos lamosos. Considerando estes e outros caracteres morfológicos de



paleotocas produzidas por crustáceos (*vide* Hasiotis *et al.*, 1993; Martin *et al.*, 2008), as paleotocas deste estudo se distinguem destas, principalmente, por apresentarem arquitetura simples, orientação sub vertical e terminação arredondada com diminuição do diâmetro. Quanto às paleotocas produzidas por tetrápodes, distintos estudos acerca da caracterização morfológica de paleotocas e da correlação com tetrápodes atuais (*e. g.*, Groenewald *et al.*, 2001; Lucas *et al.*, 2006; Varricchio *et al.*, 2007; Martin, 2009; Modesto & Botha-Brink, 2010; Miller *et al.*, 2011; Bordy *et al.*, 2017), descrevem-nas como estruturas de arquitetura simples sinuosas ou em galerias complexas, com orientação preferencialmente sub-horizontal e raramente sub vertical e dotadas de câmaras terminais. De acordo com estes caracteres morfológicos, as paleotocas deste estudo distinguem-se destas por apresentarem uma forma com tendência cilíndrica, orientação sub vertical, terminação arredondada e variação longitudinal do diâmetro configurando três porções.

No que diz respeito aos peixes dipnoicos, verifica-se que gêneros modernos produzem tocas para estivação (*vide* Hasiotis *et al.*, 1993; Hasiotis *et al.*, 2007; Gaillard *et al.*, 2013) e em comparação com paleotocas registradas durante o Mesozoico (*vide* Dubiel *et al.*, 1987; Marshall & Rogers, 2012) destacam-se pela arquitetura simples e cilíndrica, por geralmente apresentarem orientação vertical a sub vertical e, segundo Hasiotis *et al.* (1993), por poderem apresentar uma terminação ampliada ou arredondada.

Em comparação às paleotocas produzidas por peixes dipnoicos, os espécimes descritos neste trabalho assemelham-se pela arquitetura simples, ou seja, sem ramificações e ser formar galerias; pela orientação sub-vertical em relação ao acamamento; pela forma cilíndrica a subcilíndrica e base arredondada; e pela variação de diâmetro ao longo da estrutura, marcado por uma sutil ampliação na porção mediana e estreitamento em direção à terminação inferior, enquanto a terminação superior é indistinta.

Além disso, as dimensões médias inferidas (comprimento em torno de 40 cm e diâmetro entre 2,7 e 15,6 cm) são compatíveis com aquelas descritas na literatura (*e. g.*, Dubiel *et al.*, 1987; Gobetz *et al.*, 2006; Marshall & Rogers, 2012), comumente com comprimento variado entre 10 a 70 cm e diâmetros com eixos variando entre 2 e 15 cm.

As semelhanças entre as paleotocas estudadas com registros conhecidos de paleotocas de peixes dipnoicos, tanto no Paleozoico (*vide* Romer & Olson, 1954; Vaughn, 1964; Carroll, 1965; Carlson, 1968; Fernandes & Carvalho, 2002; Dentzien-Dias *et al.*, 2015; McCahon & Miller, 2015) quanto no Mesozoico (*vide* Dubiel *et al.*, 1987; Gobetz *et al.*, 2006; Surlyk *et al.*, 2008; Marshall & Rodgers, 2012; Sennikov, 2018) e no Cenozoico (*vide* Gaillard *et al.*, 2013) podem ser melhor observadas na Figura 5.

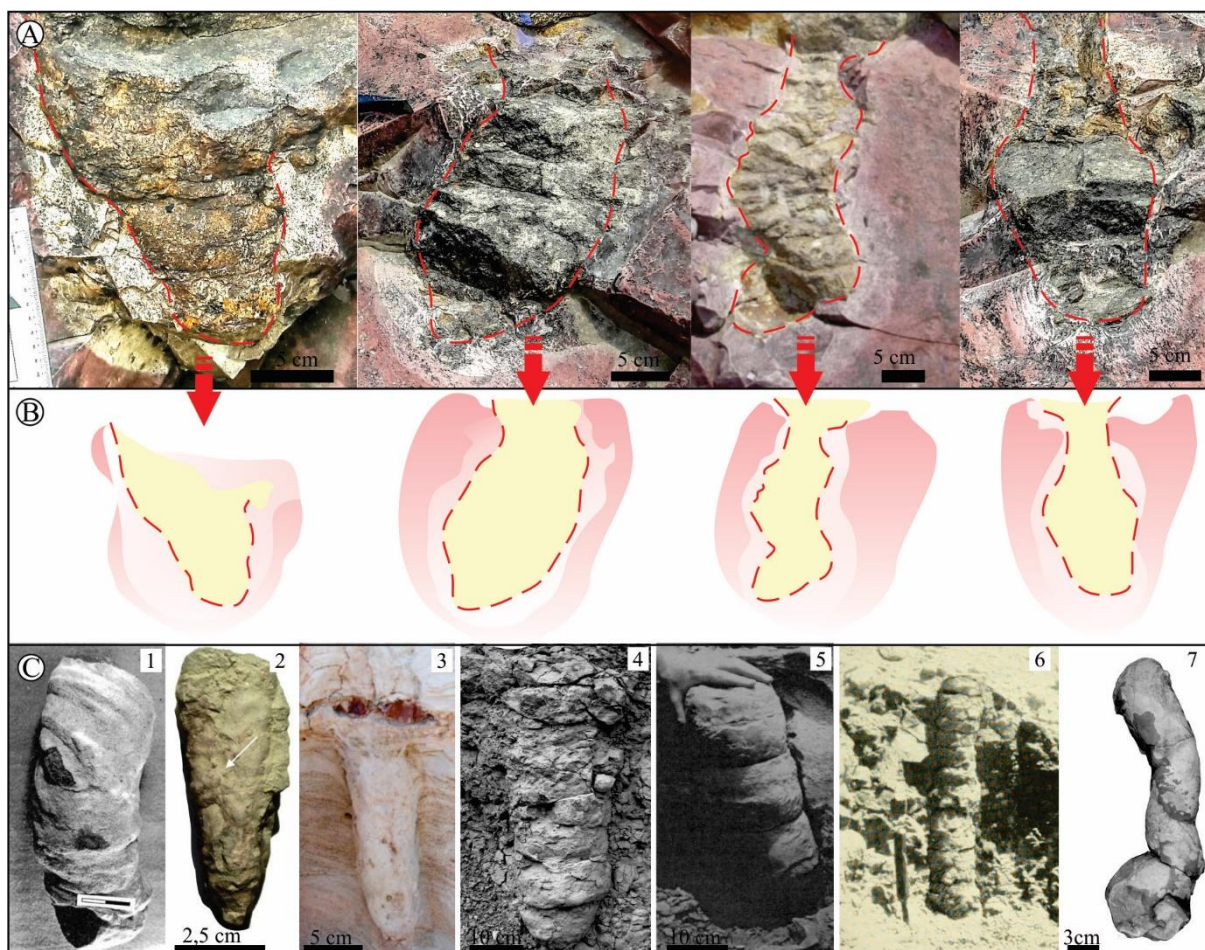


Figura 5 Comparação morfológica entre paleotocas de peixes dipnoicos; A. Fotografias das paleotocas registradas em Ponta das Lajes, Manaus-AM; B. Esboços esquemáticos das paleotocas de A.; e C. Paleotocas de dipnoicos ilustradas na literatura – C1= Fernandes & Carvalho (2002), C2= McCahon & Miller (2015), C3= Marshall & Rodgers (2012), C4= Romer & Olson (1954), C5= Carroll (1965), C6= Romer & Olson (1954), C7= Gobetz *et al.*, 2006.

#### 4.2.2 Gênese das Paleotocas

Peixes dipnoicos modernos são capazes de respirar tanto o ar atmosférico quanto o presente na água, e por isso podem experimentar uma fase terrestre e uma aquática de acordo com a disponibilidade de água (*vide*, Sawaya & Shinomiya, 1972). Estes peixes comumente habitam ambientes lacustres, o que também é observado nos depósitos de planície de inundação aos quais paleotocas de dipnoicos estão associadas (*vide*, Carlson, 1968; Dubiel *et al.*, 1987; McCahon & Miller, 2015; Francischini *et al.*, 2018). Assim, as interpretações acerca da gênese das paleotocas de dipnoicos podem ser correlacionadas com hábitos de gêneros estivadores atuais, como *Lepidosiren* e *Protopterus*.

De acordo com Smith (1911), peixes dipnoicos habitam lagos e geralmente alimentam-se de moluscos. Porém, quando o reabastecimento do lago cessa os níveis de água diminuem, o que

consequentemente causa escassez de alimento. Como forma de proteger-se destas condições, o peixe escava no substrato lamoso uma toca em forma de casulo com uma pequena abertura. O peixe acomoda-se no interior da toca e produz um muco que evitará sua dissecação durante o período de seca, iniciando a estivação, fase no qual o peixe usará os pulmões para respiração até que o lago se reabasteça e ele flutue para fora de sua toca (Figura 6A). Quanto à preservação das paleotocas, segundo Miller *et al.* (2001), ocorre, em geral, quando há rápido preenchimento das tocas por sedimentos provenientes do canal principal durante a ingressão de água na planície de inundação (Figura 6A e 6B).

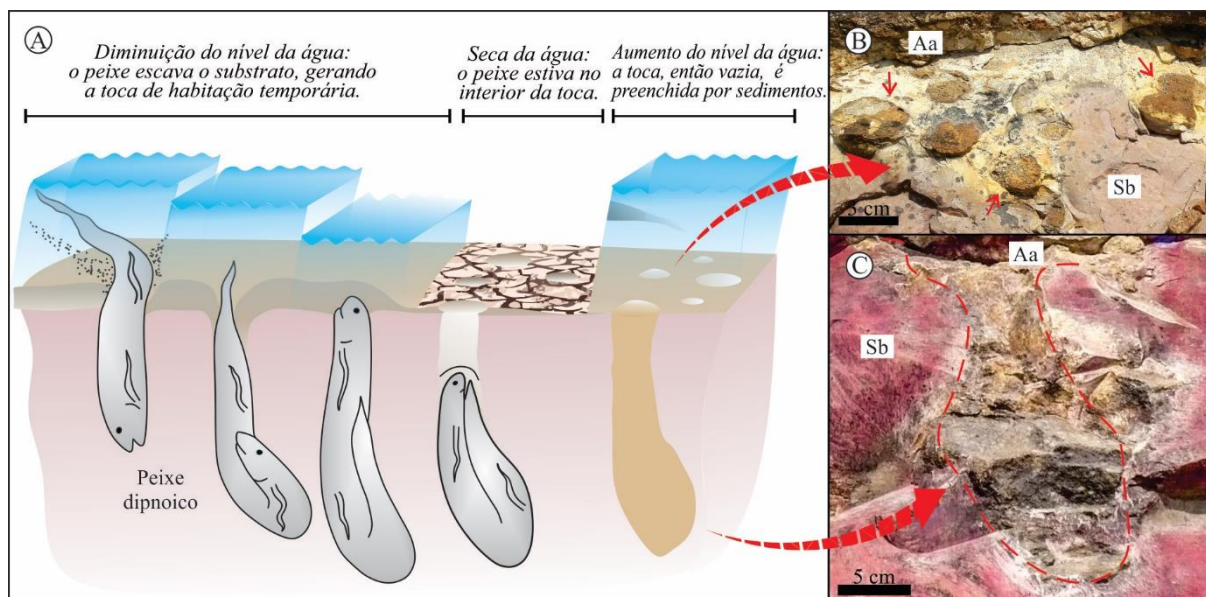


Figura 6 Reconstituição da construção de tocas por peixes dipnoicos; A. A escavação da toca pelo peixe dipnoico e posterior preenchimento desta estrutura; Registros das paleotocas na área de estudo podem ser observados em B. Vista transversal; e C. Vista longitudinal.

## 5 Conclusões

Incófosséis tubulares sub verticais com arquitetura simples, cilíndrica, segmentada, com dimensões variando entre 8,3 a 15,6 cm de diâmetro e entre 20 a 40 cm de comprimento, que ocorrem em rochas cretáceas da Formação Alter do Chão (Grupo Javari, Bacia do Amazonas), no afloramento Ponta das Lajes (Manaus-AM), foram interpretados neste estudo como paleotocas de peixes dipnoicos. Sua identificação na categoria paleotocas deve-se a arquitetura simples e cilíndrica, com variação de diâmetro ao longo da estrutura e uma base arredondada, o que é condizente com escavações para habitação temporária.

A comparação deste material com paleotocas produzidas por peixes dipnoicos em depósitos de planície de inundação resultou no levantamento de caracteres diagnósticos para a identificação do organismo que produziu a paleotoca, dentre os quais destacam-se a arquitetura simples cilíndrica a subcilíndrica, orientação sub-vertical das em relação ao

acumulação, base arredondada e variação de diâmetro ao longo da estrutura, marcado por uma sutil ampliação na porção mediana e estreitamento em direção à terminação inferior, enquanto a terminação superior é indistinta.

No que se refere ao significado paleoambiental, a presença de paleotocas de peixes dipnoicos em depósitos lacustres de planície de inundação da Formação Alter do Chão em Ponta das Lajes, Manaus-AM, pode ser considerada indicativa de períodos de seca no canal fluvial, o que também pode ser corroborado pela presença de feições pedogenéticas no topo da fácies onde ocorrem as paleotocas de dipnoicos (*e. g., peds e slickensides*).

## 6 Agradecimentos

Ao Instituto Soka e Centro de Pesquisas e Estudos Ambientais do Amazonas – CEPEAM pelo acesso ao afloramento Ponta das Lajes, Manaus-AM. Este estudo contou com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

## 7 Referências

- Abinader, H.D. 2008. *Depósitos cenozoicos da porção oeste da bacia do Amazonas*. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Dissertação de Mestrado, 98p.
- Baucon, A.; Ronchi, A.; Felletti, F. & de Carvalho, C.N. 2014. Evolution of crustaceans at the edge of the end-Permian crisis: ichnonetwork analysis of the fluvial succession of Nurra (Permian–Triassic, Sardinia, Italy). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 410: 74-103.
- Bordy, E.M. & Krummeck, W.D. 2016. Enigmatic continental burrows from the Early Triassic transition of the Katberg and Burgersdorp formations in the main Karoo Basin, South Africa. *Palaios*, 31(8): 389-403.
- Bordy, E.M.; Sciscio, L.; Abdala, F.; McPhee, B.W. & Choiniere, J.N. 2017. First Lower Jurassic vertebrate burrow from southern Africa (upper Elliot Formation, Karoo Basin, South Africa). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 468: 362-372.
- Carlson, K.J. 1968. The skull morphology and estivation burrows of the Permian lungfish, *Gnathorhiza serrata*. *The Journal of Geology*, 76(6): 641-663.
- Carroll, R.L. 1965. Lungfish burrows from the Michigan Coal Basin. *Science*, 148(3672): 963-964.
- Cunha, P.R.C.; Melo, J.H.G. & Silva, O.B. 2007. Bacia do Amazonas. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 15(2): 227-251.

- Daemon, R.F. 1975. Contribuição à datação da Formação Alter do Chão, bacia do Amazonas. *Revista Brasileira de Geociências*, 5(2): 58-84.
- Dentzien-Dias, P.C.; Figueiredo, A.E.Q. & Schultz, C.L. 2012. Sobre a gênese das tocas de tetrápodes do Paleozoico e Mesozoico. *Pesquisas em Geociências*, 39(2): 99-107.
- Dentzien-Dias, P.; Francischini, H.; Guerra-Sommer, M.; Manfroid, J. & Menegat, R. 2015. Lungfish aestivation burrow from Upper Permian of the Paraná Basin, Brazil. *Arabian Journal of Earth Science. special issue*, 17-18.
- Dino, R.; Silva, O.B. & Abrahão, D. 1999. Caracterização palinológica e estratigráfica dos estratos cretáceos da Fm. Alter do Chão, Bacia do Amazonas. *In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL. Boletim de Resumos Expandidos*. Rio Claro: Sociedade Brasileira de Geociências, 557-565.
- Dino, R.; Soares, E.A.A.; Antonioli, L., Riccomini, C. & Nogueira, A.C.R. 2012. Palynostratigraphy and sedimentary facies of Middle Miocene fluvial deposits of the Amazonas Basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 34: 61-80.
- Dubiel, R.F.; Blodgett, R.H. & Bown, T.M. 1987. Lungfish burrows in the Upper Triassic Chinle and Dolores Formations, Colorado Plateau. *Journal of Sedimentary Research*, 57(3): 512-521.
- Fernandes, A.C.S. & Carvalho, I.S. 2002. Uma provável escavação de dipnóico na Formação Ponta Grossa, Devoniano da Bacia do Paraná. *Arquivos do Museu Nacional*, 60(3): 207-211.
- Francischini, H.; Dentzien-Dias, P.; Guerra-Sommer, M.; Menegat, R.; Santos, J.O.S.; Manfroi, J. & Schultz, C.L. 2018. A middle Permian (Roadian) lungfish aestivation burrow from the Rio do Rasto Formation (Paraná Basin, Brazil) and associated U-Pb dating. *Palaios*, 33(2): 69-84.
- Franzinelli, E. & Igreja, H. 2011. Ponta das Lajes e o Encontro das Águas, AM – A Formação Alter do Chão como moldura geológica do espetacular Encontro das Águas Manauara *In: SÍTIOS GEOLÓGICOS E PALEONTOLÓGICOS DO BRASIL*.
- Gaillard, C.; Olivero, D. & Chebance, M. 2013. Probable aestivation burrows from the Eocene/Oligocene transition in south-eastern France and their palaeoenvironmental implications. *Palaeoworld*, 22(1-2): 52-67.
- Gobetz, K.E.; Lucas, S.G. & Lerner, A.J. 2006. Lungfish burrows of varying morphology from the Upper Triassic. *The Triassic-Jurassic Terrestrial Transition*, 37: 140.
- Groenewald, G.H.; Welman, J. & MacEachern, J.A. 2001. Vertebrate burrow complexes from the Early Triassic Cynognathus Zone (Driekoppen Formation, Beaufort Group) of the Karoo Basin, South Africa. *Palaios*, 16(2): 148-160.

- Hasiotis, S.T. & Mitchell, C.E. 1993. A comparison of crayfish burrow morphologies: Triassic and Holocene fossil, paleo-and neo-ichnological evidence, and the identification of their burrowing signatures. *Ichnos: An International Journal of Plant & Animal*, 2(4): 291-314.
- Hasiotis, S.T.; Mitchell, C.E. & Dubiel, R.F. 1993. Application of morphologic burrow interpretations to discern continental burrow architects: lungfish or crayfish?. *Ichnos: An International Journal of Plant & Animal*, 2(4): 315-333.
- Hasiotis, S.T.; Platt, B.F.; Hembree, D.I. & Everhart, M.J. 2007. The trace-fossil record of vertebrates. In: TRACE FOSSILS, 196-218.
- Horbe, A.M.C.; Vieira, L.C. & Nogueira, A.C.R. 2006. Geoquímica de camadas vermelhas bioturbadas da Formação Alter do Chão, Cretáceo da Bacia do Amazonas. *Revista Brasileira de Geociências*, 36(3): 396-402.
- Hoorn, C.; Roddaz, M.; Dino, R.; Soares, S.; Uba, C.; Ochoalozano, D. & Mapes, R. 2010. The Amazonian Craton and its influence on past fluvial systems (Mesozoic-Cenozoic, Amazonia). In: HOORN, C., WESSELINGH, F.P. (EDS.), AMAZONIA, LANDSCAPE AND SPECIES EVOLUTION: A LOOK INTO THE PAST. Oxford: Wiley.
- Lucas, S.G.; Gobetz, K.E.; Odier, G.P.; McCormick, T. & Egan, C. 2006. Tetrapod burrows from the lower Jurassic Navajo Sandstone, southeastern Utah. *New Mexico Museum of Natural History Bulletin*, 37: 147-154.
- Marshall, M.S. & Rodgers, R.R. 2012. Lungfish burrows from the upper cretaceous Maevarano Formation, Mahajanga basin, northwestern Madagascar. *Palaios*, 27(12): 857-866.
- Martin, A.J. 2009. Dinosaur burrows in the Otway Group (Albian) of Victoria, Australia, and their relation to Cretaceous polar environments. *Cretaceous Research*, 30(5): 1223-1237.
- Martin, A.J.; Rich, T.H.; Poore, G.C.; Schultz, M.B.; Austin, C.M.; Kool, L. & Vickers-Rich, P. 2008. Fossil evidence in Australia for oldest known freshwater crayfish of Gondwana. *Gondwana Research*, 14(3): 287-296.
- McCahon, T.J. & Miller, K.B. 2015. Environmental significance of lungfish burrows (Gnathorhiza) within Lower Permian (Wolfcampian) paleosols of the US midcontinent. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 435: 1-12.
- Mendes, A.C.; Truckenbrod, W. & Nogueira, A.C.R. 2012. Análise faciológica da Formação Alter do Chão (Cretáceo, Bacia do Amazonas), próximo à cidade de Óbidos, Pará, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 42(1): 39-57.
- Miall, A.D. 1977. A review of the braided-river depositional environment. *Earth-Science Reviews*, 13(1): 1-62.

- Miall, A.D. 2006. The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology. Berlin, *Springer-Verlag*, 582 p.
- Miall, A.D. 2013. Principles of sedimentary basin analysis. *Springer Science & Business Media*, 668 p.
- Miller, M.F.; Hasiotis, S.T.; Babcock, L.E.; Isbell, J.L. & Collinson, J.W. 2001. Tetrapod and large burrows of uncertain origin in Triassic high paleolatitude floodplain deposits, Antarctica. *Palaios*, 16(3): 218-232.
- Modesto, S.P. & Botha-Brink, J. 2010. A burrow cast with *Lystrosaurus* skeletal remains from the lower triassic of South Africa. *Palaios*, 25(4): 274-281.
- Nichols, G. *Sedimentology and stratigraphy*. 2009. John Wiley & Sons, 432p.
- Nogueira, A.C.R.; Vieira, L.C. & Suguio, K. 1999. Paleossolos da Formação Alter do Chão, Cretáceo-Terciário da Bacia do Amazonas, Regiões de Presidente Figueiredo e Manaus. *In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO NO BRASIL*, 5: 261-266.
- Nogueira, A.C.R.; Silva Júnior, J.D.; Horbe, A.M.C.; Soares, J.L. & Monteiro, A.D. 2003. A gênese dos níveis silicificados da Formação Alter do Chão, Cretáceo Superior da bacia do Amazonas. SBG/NO, *in: SIMP. GEOL. AMAZ*, 8.
- Palma, K.A.L. 2014. *Gênese e distribuição das silicificações aflorantes em Manaus*. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Amazonas. Dissertação de Mestrado, 116p.
- Rindsberg, A.K. 2012. Ichnotaxonomy: finding patterns in a welter of information. *In: DEVELOPMENTS IN SEDIMENTOLOGY*. Elsevier, 45-78.
- Romer, A.S. & Olson, E.C. 1954. Aestivation in a Permian lungfish. *Breviora*, 30.
- Rossetti, D.F. & Netto, R. G. 2006. First evidence of marine influence in the Cretaceous of the Amazonas Basin, Brazil. *Cretaceous Research*, 27(4): 513-528.
- Sawaya, P. & Shinomiya, N. 1972. Biologia da Tambaki-M'boya — *Lepidosiren paradoxa* (Fitz. 1836) peixe, dipnoico — metabolismo da glicose. *Boletim de Zoologia e Biologia Marinha*, 29: 1-44.
- Sennikov, A.G. 2018. Lungfish (Dipnoi) Burrows from the Triassic of the Southern Cis-Urals. *Paleontological Journal*, 52(12): 1408-1411.
- Silva, T.G. 2020. *Iconofósseis da Formação Alter do Chão (Grupo Javari, Bacia do Amazonas) em Ponta das Lajes, Manaus (AM): Classificação e Inferências Paleoambientais*. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Amazonas. Dissertação de Mestrado, 102p.
- Simpson, S. 1975. Classification of trace fossils. *in: FREY, R.W. The study of trace fossils*. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 39-54.

- Smith, G. 1911. *Primitive animals*. Cambridge University Press. 168p.
- Soares, E.A.A.; Wahnfried, I. & Dino, R. 2016. Estratigrafia de subsuperfície da sequência sedimentar cretácea-neógena das regiões de Manaus e Itacoatiara, Amazônia Central. *Geologia USP. Série Científica*, 16(1): 23-41.
- Souza, V.S. & Nogueira, A.C.R. 2009. Manaus-Presidente Figueiredo (AM), borda norte da Bacia do Amazonas: um guia para excursão de campo. *Revista Brasileira de Geociências*, 39(1): 16-29.
- Surlyk, F.; Milàn, J. & Noe-Nygaard, N. 2008. Dinosaur tracks and possible lungfish aestivation burrows in a shallow coastal lake; lowermost Cretaceous, Bornholm, Denmark. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 267(3-4): 292-304.
- Varricchio, D.J.; Martin, A.J. & Katsura, Y. 2007. First trace and body fossil evidence of a burrowing, denning dinosaur. *Proceedings of the royal society b: biological sciences*, 274(1616): 1361-1368.
- Vieira, L.C. 2002. *Paleossolos de depósitos cretáceos da Formação Alter do Chão, Nordeste do Amazonas*. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Amazonas. Manaus, Dissertação de Mestrado, 83p.
- Vaughn, P.P. 1964. Evidence of Aestivation Lungfish from the Sangre de Cristo Formation Lower Permian of Northern New Mexico. *Los Angeles County Museum*, 80.
- Wanderley Filho, J.R.; Melo, J.H.G.; Fonseca, V.M.M. & Machado, D.M.C. 2005. Bacias sedimentares brasileiras: Bacia do Amazonas. *Phoenix*, 7(82).