



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)  
INSTITUTO DE ESTUDOS SOCIOAMBIENTAIS (IESA)  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA (PPGEO)

RAYLON DA FROTA LOPES

**Geoconservação e proposta de uso sustentável do patrimônio  
paleontológico do Norte do Estado do Tocantins e Sudoeste do  
Estado do Maranhão**

GOIÂNIA  
2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

### E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

#### 1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação     Tese     Outro\*: \_\_\_\_\_

\*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

#### 1. Nome completo do autor

Raylon da Frota Lopes

#### 2. Título do trabalho

Geoconservação e proposta de uso sustentável do patrimônio paleontológico do Norte do Estado do Tocantins e Sudoeste do Estado do Maranhão

#### 3. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento  SIM     NÃO<sup>1</sup>

**[1]** Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

**a)** consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

**b)** novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

**Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Claudia Valeria De Lima, Professor do Magistério Superior**, em 21/11/2024, às 15:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de](#)

[novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Raylon Da Frota Lopes, Discente**, em 21/11/2024, às 16:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4983674** eo código CRC **A21D41D4**.

---

Referência: Processo nº 23070.046183/2024-67

SEI nº 4983674

RAYLON DA FROTA LOPES

**Geoconservação e proposta de uso sustentável do patrimônio paleontológico do Norte do Estado do Tocantins e Sudoeste do Estado do Maranhão**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, do Instituto de Estudos Socioambientais, da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito parcial para a obtenção do título de doutor em Geografia.

Área de concentração: Natureza e produção do espaço.

Linha de Pesquisa: Análise Ambiental e Tratamento da Informação Geográfica.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. DSc. Cláudia Valéria de Lima.

Coorientador: Prof. DSc. Carlos Roberto dos Anjos Candeiro.

GOIÂNIA  
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Lopes, Raylon da Frota

Geoconservação e proposta de uso sustentável do patrimônio paleontológico do Norte do Estado do Tocantins e Sudoeste do Estado do Maranhão [manuscrito] / Raylon da Frota Lopes. - 2024.

CIX, 109 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Cláudia Valéria de Lima; coorientador prof. Dr. Carlos Roberto dos Anjos Candeiro.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Instituto de Estudos Socioambientais (IESA), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Goiânia, 2024.

Bibliografia.

Inclui siglas, mapas, fotografias, abreviaturas, símbolos, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Geodiversidade. 2. Geoconservação. 3. Patrimônio Paleontológico. 4. Norte do Tocantins. 5. Sudoeste do Maranhão. I. Lima, Cláudia Valéria de, orient. II. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE ESTUDOS SÓCIO-AMBIENTAIS

**ATA DE DEFESA DE TESE**

Ata Nº **32/2024** da sessão de Defesa de Tese de **Raylon da Frota Lopes**, que confere o título de Doutor(a) em Geografia na área de concentração em **Natureza e produção do espaço**.

Aos **vinte três de outubro de dois mil e vinte e quatro, a partir das 08:30 horas**, por videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada **“ESTUDO DO PATRIMÔNIO PALEONTOLÓGICO DO NORTE DO ESTADO DO TOCANTINS E SUDOESTE DO ESTADO DO MARANHÃO: GEOCONSERVAÇÃO E PROPOSTAS DE USO SUSTENTÁVEL”**. Os trabalhos foram instalados pelo(a) Orientadora, Professora Doutora **Claudia Valeria de Lima** (IESA/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professora Doutora **Roseane Ribeiro Sarges** (UFMA), membro titular externo; Professor Doutor **Carlos Augusto Machado** (UFNT), membro titular externo, Professor Doutor **Bruno Miguel Claro Pereira** (Geoparque Oeste Portugal), membro titular externo; Professora Doutora **Ana Cláudia Dantas da Costa** - (UFMT), membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca **fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho, conforme explicitado abaixo. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pela Professora Doutora **Cláudia Valéria de Lima** (IESA/UFG), Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, **aos vinte de três de outubro de dois mil vinte e quatro**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

Geoconservação e proposta de uso sustentável do patrimônio paleontológico do Norte do Estado do Tocantins e Sudoeste do Estado do Maranhão



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Miguel Claro Pereira**, **Usuário Externo**, em 22/11/2024, às 12:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Cláudia Dantas da Costa**, **Usuário Externo**, em 22/11/2024, às 13:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos registrado(a) civilmente como Carlos Augusto Machado**, **Usuário Externo**, em 22/11/2024, às 16:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Claudia Valeria De Lima**, **Professor do Magistério Superior**, em 22/11/2024, às 16:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Roseane Ribeiro Sarges**, **Usuário Externo**, em 27/11/2024, às 09:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4986048** e o código CRC **3CEF8AC8**.

---

**Referência:** Processo nº 23070.046183/2024-67

SEI nº 4986048

Dedico esse trabalho à minha esposa Anna Keren Noronha Viana Sousa, por ser uma mulher companheira que acredita nos nossos sonhos. À minha filha Ana Liz Noronha Frota, por ser fonte de inspiração e razão de grande parte do meu desejo de crescimento. Aos meus pais Raimundo Nonato Rodrigues Lopes e Maria Istervanda da Frota Lopes, por me ensinarem o valor do estudo, do conhecimento e do trabalho, além de terem investido no meu crescimento estudantil e acadêmico. Aos meus orientadores Cláudia Valéria de Lima e Carlos Roberto dos Anjos Candeiro, esse trabalho é nosso.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a quem tornou possível a realização deste grande passo na minha vida profissional e pessoal.

Primeiramente ao Eterno porque Ele é bom.

À minha esposa Anna Keren e filha Liz, cujo apoio e compreensão ao longo dos últimos anos foram fundamentais para mim. As palavras de incentivo e os gestos de amor me impulsionaram nos momentos desafiadores desta jornada acadêmica.

À minha família - meus pais (Raimundo e Istervanda) e meu irmão (Rayan) - por serem fontes inesgotáveis de apoio, encorajamento e inspiração. Não há dúvidas, sem vocês eu não teria chegado até aqui.

Agradeço também aos meus sogros Clodoan e Marilene, pelo suporte ao me emprestarem seu escritório, onde pude me concentrar e me dedicar à escrita deste trabalho.

Não poderia deixar de expressar minha profunda gratidão aos meus orientadores, doutora Cláudia Valéria de Lima e doutor Carlos Roberto dos Anjos Candeiro. Sua orientação competente, inteligente, humana e amiga foi crucial para o desenvolvimento deste estudo e para o meu amadurecimento acadêmico.

Meu amigo Carlos Roberto dos Anjos Candeiro, você me apresentou o modelo de professor e pesquisador que eu gostaria de tornar. Por favor, jamais esqueça, você possibilitou o sonho de toda uma família, nós seremos eternamente gratos a você, um afetuoso abraço.

Minha gratidão também à professora doutora Silvina de Valais, da Universidad Nacional de Río Negro, Argentina. Professora, você foi de grande importância em uma etapa crucial desse trabalho. Obrigado por seu auxílio e contribuição.

À Universidade Federal de Goiás e ao Programa de Pós-graduação em Geografia do Instituto de Estudos Socioambientais, sou imensamente grato pela oportunidade de estudar em uma instituição de excelência.

Por fim, gostaria de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro durante grande parte dessa trajetória.

A todos vocês, meu mais profundo e sincero agradecimento. Este trabalho não teria sido possível sem o apoio e contribuições de cada um.

Obrigado por fazerem parte da minha história.

*“Um passo a frente e você já não está mais no mesmo lugar”.*  
**- Chico Science.**

## RESUMO

Na região centro-norte do Brasil, norte do estado do Tocantins e sudoeste do estado do Maranhão, são conhecidos afloramentos fossilíferos com notável importância científica. Essas ocorrências datam do Permiano ao Cretáceo da Bacia Sedimentar Intracratônica do Parnaíba e necessitam de estratégias de geoconservação para seu devido uso e manejo sustentável. Apesar de já existir conhecimento científico produzido acerca do patrimônio paleontológico presente na área em estudo, pesquisas de abordagem geoconservadora com inventário, quantificação de valores e potenciais de uso e vulnerabilidade para os geossítios não haviam sido conduzidas na região até o momento. Esta pesquisa objetivou caracterizar o patrimônio paleontológico originário do Paleozoico e Mesozoico da região norte do Tocantins e sudoeste do Maranhão em seus aspectos físicos e de relevância social. Para alcançar o objetivo proposto foi realizado levantamento bibliográfico e trabalhos de campo para a elaboração do inventário dos afloramentos com ocorrência fóssil na área estudada. Para a quantificação dos valores e potenciais de uso dos afloramentos utilizou-se a plataforma Geossit, desenvolvida pelo Serviço Geológico do Brasil. Os fósseis inventariados consistem em somatofósseis de tubarões, troncos de gimnospermas, e samambaias; icnofósseis de saurópodes, terópodes, e moldes de folhas indeterminados. Para a avaliação quantitativa foram considerados apenas geossítios sendo estes: os geossítios que compõem o Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins, em Filadélfia (Permiano); o geossítio localizado em Fortaleza dos Nogueiras, Maranhão (Triássico), contendo pegadas de dinossauros terópodes; e o geossítio situado no município de Itaguatins, estado do Tocantins (Eocretáceo), com trilhas de dinossauros saurópodes. De maneira geral, os geossítios investigados obtiveram valor científico e potenciais de uso educacional e turístico de moderado a alto, e risco de degradação baixo para os afloramentos do Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins, médio para as pegadas de Theropoda e alto para as pegadas de Sauropoda. Os locais estudados possuem potencial para a realização de atividades geoeducativas e geoturísticas, podendo contribuir com o desenvolvimento social e econômico da região. Porém cada geossítio deve ser utilizado levando-se em consideração estratégias específicas que respeitem seus potenciais e limitações.

**Palavras-chave:** Geodiversidade, Geoconservação, Patrimônio Paleontológico, Norte do Tocantins, Sudoeste do Maranhão.

## ABSTRACT

In the central-northern region of Brazil, in the northern state of Tocantins and the southwestern state of Maranhão, there are known fossiliferous outcrops with notable scientific importance. These occurrences date from the Permian to the Cretaceous of the Intracratonic Sedimentary Basin of Parnaíba and require geoconservation strategies for their proper sustainable use and management. Although scientific knowledge has already been produced about the paleontological heritage present in the study area, until now no research had been conducted with a geoconservation approach including inventory, quantification of values and potentials for use, and vulnerability for the geosites in this region. The general objective of this work is to characterize the paleontological heritage originating from the Paleozoic and Mesozoic of the northern region of Tocantins and southwestern Maranhão in its physical aspects and social relevance. To achieve the proposed objective, a bibliographic survey and fieldwork were carried out to prepare the inventory of the fossiliferous outcrops in the studied area. In the quantification of the values and potentials for use of the outcrops, the Geosit platform, developed by the Geological Survey of Brazil, was used. The inventoried fossils consist of shark somatofossils, gymnosperm trunks, and mineralized ferns, sauropod and theropod ichnofossils, and indeterminate leaf molds. For the quantitative assessment, only geosites were considered, namely: the geosites comprising the Natural Monument of Fossilized Trees of Tocantins in Filadélfia (Permian); the geosite containing theropod dinosaur footprints in Fortaleza dos Nogueiras, Maranhão (Triassic); and the geosite containing sauropod dinosaur footprints in Itaguatins, Tocantins (Early Cretaceous). Overall, the geosites obtained scientific value and potentials for educational and tourist use ranging from moderate to high, and a low risk of degradation for the outcrops of the Natural Monument of Fossilized Trees of Tocantins, medium for the theropod footprints, and high for the sauropod footprints. The studied locations have the potential for geoelectoral and geotouristic activities, which can contribute to the social and economic development of the region. However, each geosite must be utilized considering specific strategies that respect their potentials and limitations.

**Keywords:** Geodiversity, Geoconservation, Paleontological Heritage, Northern of Tocantins, Southwestern of Maranhão.

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IUCN	União Internacional para a Conservação da Natureza
LABPALEOEVO	Laboratório de Paleontologia e Evolução
LBPBIOL	Laboratório de Paleobiologia
MA	Maranhão
MISS	<i>Microbially Induced Sedimentary Structures</i>
MONAFT	Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins
NATURATINS	Instituto Natureza do Tocantins
TO	Tocantins
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
SGB	Serviço Geológico do Brasil
USA	<i>United States of América</i>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localização da área em estudo .....	23
<b>Figura 2.</b> Mapa geomorfológico da área em estudo .....	24
<b>Figura 3.</b> Localização da Bacia Sedimentar do Parnaíba.....	25
<b>Figura 4.</b> Limites geológicos da Bacia do Parnaíba.....	26
<b>Figura 5.</b> Carta estratigráfica geral da Bacia Sedimentar do Parnaíba com com ênfase nas formações abordadas na presente pesquisa.....	27
<b>Figura 6.</b> Mapa geológico simplificado das unidades litológicas em estudo e sua distribuição na bacia do Parnaíba.....	28
<b>Figura 7.</b> Localização do Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins (MONAFTO) e entorno .....	69
<b>Figura 8.</b> Localização do geossítio Fazenda Malhada Vermelha .....	70
<b>Figura 9.</b> Localização do distrito de São Domingos, em Itaguatins, Tocantins .....	71
<b>Figura 10.</b> Vista aérea do distrito rural de São Domingos e do geossítio homônimo.....	72

### CAPÍTULO 4 (Manuscrito 1)

<b>Figura 1.</b> <i>Parnaíba Sedimentary Basin and the study area</i> .....	40
<b>Figura 2.</b> <i>Paleontological Heritage of the Northern Tocantins and Southwestern Maranhão</i> .....	44
<b>Figura 3.</b> <i>Permian phytofossils from Filadélfia, TO</i> .....	45
<b>Figura 4.</b> <i>The distal portion of fin spine of Ctenacanthus sp., Pedra de Fogo Formation</i> .....	46
<b>Figura 5.</b> <i>Footprint of an indeterminate Theropoda in Fortaleza dos Nogueiras (MA)</i> .....	47
<b>Figura 6.</b> <i>Sauropoda footprints from the Cretaceous of Itaguatins (TO)</i> .....	47

### CAPÍTULO 5 (Manuscrito 2)

<b>Figura 1.</b> <i>Locality maps of the ichnofossil outcrop</i> .....	56
<b>Figura 2.</b> <i>Generalized stratigraphic column of the Balsas Group (Parnaíba Basin)</i> .....	57
<b>Figura 3.</b> <i>Panoramic view of the stream with the location of blocks FN3, FN4 and FN5 (moved surface)</i> .....	58
<b>Figura 4.</b> <i>Sandstone slabs and theropod dinosaur footprints located at Malhada Vermelha farm, Fortaleza dos Nogueiras, Maranhão, Brazil</i> .....	58
<b>Figura 5.</b> <i>Evidence of MISS in the tracks bearing-blocks. In general, all slabs have wrinkle structures</i> .....	59
<b>Figura 6.</b> <i>Different colors of the laminations of the Sambaíba Sandstone that outcrops in the study area</i> .....	60

**CAPÍTULO 7 (Manuscrito 3)**

<b>Figura 1.</b> <i>Location of the study area</i> .....	77
<b>Figura 2.</b> <i>Location of the paleontological sites under study</i> .....	79
<b>Figura 3.</b> <i>Fossilized gymnosperm trunks found at MONAFT</i> .....	81
<b>Figura 4.</b> <i>Theropod dinosaur footprints from Fortaleza dos Nogueiras, Maranhão, Brazil</i> .....	81
<b>Figura 5.</b> <i>In situ tracks at the São Domingos geosite</i> .....	82
<b>Figura 6.</b> <i>Slabs containing dinosaur footprints and names scratched into the rock by visitors to the area</i> .....	87
<b>Figura 7.</b> <i>Proposed area for the Vale das Águas Geopark</i> .....	90

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

**Quadro 1.** Definições das tipologias de geossítios utilizada em Nascimento *et al.* (2021).....34

### **CAPÍTULO 4 (Manuscrito 1)**

**Tabela 1.** *Fossils of the studied area and their respective taxa, locations, and geological units*.....48

### **CAPÍTULO 5 (Manuscrito 2)**

**Tabela 1.** *Measurements of the specimens*..... 61

### **CAPÍTULO 7 (Manuscrito 3)**

**Tabela 1.** *Criteria, weights and scores for quantifying the scientific value (CV) of the geosites under study*..... 83

**Tabela 2.** *Criteria, weights and scores for quantifying the educational use (EU) and tourism use ( TU) values of the geosites under study*.....83

**Tabela 3.** *Criteria, weights and scores for quantifying the degradation risk (DR) of the geosites under study*..... 84

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
HIPÓTESE.....	16
JUSTIFICATIVA .....	16
OBJETIVOS .....	16
ESTRUTURA DA TESE.....	16
<b>1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
1.1 GEODIVERSIDADE .....	18
1.2 PATRIMÔNIO GEOLÓGICO E GEOCONSERVAÇÃO .....	19
1.3 PATRIMÔNIO PALEONTOLÓGICO .....	20
<b>2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO</b> .....	23
2.1. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	24
2.1.1 Bacia Sedimentar do Parnaíba.....	24
2.1.2 Formação Pedra de Fogo.....	28
2.1.3 Formação Motuca.....	29
2.1.4 Formação Sambaíba .....	29
2.1.5 Formação Corda .....	30
2.1.6 Formação Codó .....	30
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	32
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS.....	32
3.2 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO.....	32
3.3 GEOSSIT: MÉTODO DE AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DO SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM) .....	35
<b>4 O PATRIMÔNIO PALEONTOLÓGICO DO NORTE DO ESTADO DO TOCANTINS E SUDOESTE DO MARANHÃO, BRASIL: UMA SÍNTESE PRELIMINAR</b> .....	38
<b>5 PEGADAS TRIDÁCTILAS DE DINOSSAUROS DO TRIÁSSICO DA FORMAÇÃO SAMBAÍBA NO NORTE DO BRASIL</b> .....	53
<b>6 CARACTERIZAÇÃO DOS GEOSSÍTIOS ESTUDADOS</b> .....	68
6.1 MONUMENTO NATURAL DAS ÁRVORES FOSSILIZADAS DO TOCANTINS (MONAFT).....	68
6.2 GEOSSÍTIO FAZENDA MALHADA VERMELHA .....	69
6.3 GEOSSÍTIO SÃO DOMINGOS .....	71
<b>7 AVALIAÇÃO E GEOCONSERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO PALEONTOLÓGICO DO NORTE DO ESTADO DO TOCANTINS E SUDOESTE DO ESTADO DO MARANHÃO, BRASIL: SUBSÍDIOS PARA O DESENVOLVIMENTO SOCIOECONÔMICO SUSTENTÁVEL</b> .....	74
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	96
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	98

## INTRODUÇÃO

Desde os primórdios das civilizações, o ser humano faz uso dos elementos da geodiversidade, entretanto a consciência de que o meio físico do planeta possui limitações à sua utilização ainda é recente. Os temas relacionados à geodiversidade, geoconservação e patrimônio geológico surgiram como uma nova forma de pensar a natureza e estão relacionadas à conservação do ambiente abiótico da Terra e seu uso sustentável pela sociedade (Brilha, 2005).

Os conceitos, métodos e aplicações dessas temáticas vêm ganhando forma desde a década de 1990. Sua importância no processo de conservação da natureza e desenvolvimento sustentável foi reconhecida pela União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN), por meio das resoluções 4.040/2008 e 048/2012, que reconhecem a geodiversidade como parte da natureza e o patrimônio geológico como integrante do patrimônio natural, e pelo Programa Geociências e Geoparques da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), criado em meados de 2015 (Henriques *et al.*, 2011; Fassoulas *et al.*, 2012; Reynard; Brilha, 2018).

O patrimônio geológico é constituído por elementos notáveis da geodiversidade, que se destacam dos demais por seu alto valor (Brilha, 2005). O patrimônio paleontológico é uma das subdivisões do patrimônio geológico e está intimamente ligado ao valor científico, associado às evoluções geológica e biológica, possuindo também possui valores educacionais e culturais (Henriques; Pena do Reis, 2015). Esse conjunto de elementos revelam a história profunda dos intrincados vínculos da geodiversidade e da biodiversidade, seus valores constituem importante legado para a compreensão do passado, com potencial de inspirar as futuras gerações.

A região norte do estado do Tocantins e sudoeste do estado do Maranhão<sup>1</sup> possui um significativo conjunto de localidades fossilíferas do Paleozoico e Mesozoico constituintes do patrimônio paleontológico da área, com locais importantes do ponto de vista científico, educacional e socioeconômico. A pesquisa aqui apresentada foi direcionada pela seguinte questão problema: “em que consiste o patrimônio paleontológico originário do Paleozoico e Mesozoico da região norte do estado do Tocantins e sudoeste do estado do Maranhão, e quais seus valores e potencialidades de uso sustentável?”.

---

<sup>1</sup> Região norte do estado do Tocantins e sudoeste do Maranhão se refere à área em estudo, essa, formada pelas referidas porções das unidades federativas mencionadas, por isso é usado “a região” no singular.

## HIPÓTESE

Este estudo possuiu a hipótese de que a área pesquisada engloba significativos geossítios fossilíferos de importância científica, educacional e turística, mas que ainda são pouco conhecidos e, conseqüentemente, pouco explorados.

## JUSTIFICATIVA

A presente investigação se justificou pela necessidade de inventariar, quantificar e desenvolver ações de geoconservação e uso sustentável para o Patrimônio Paleontológico da região norte do estado do Tocantins e sudoeste do estado do Maranhão. Essa área foi escolhida devido à ocorrência de sítios paleontológicos relevantes que ainda não foram objeto de estudos sistemáticos voltados à geoconservação. A importância desses sítios torna imperativo o desenvolvimento de estratégias de preservação e gestão, não apenas para proteger os registros fósseis, mas também para promover a sustentabilidade e o uso educativo e científico deste patrimônio. Ademais, o trabalho se fundamenta na importância de conduzir abordagens teóricas e metodológicas sobre o tema, facilitando a elaboração futura de planos de conservação do geopatrimônio<sup>2</sup> da área estudada.

## OBJETIVOS

### Objetivo Geral

Caracterizar o Patrimônio Paleontológico originário do Paleozoico e Mesozoico da região norte do Tocantins e sudoeste do Maranhão em seus aspectos físicos e de relevância social.

### Objetivos específicos

- a)** identificar os locais de interesse paleontológico da região norte do estado do Tocantins e sudoeste do estado Maranhão;
- b)** descrever os afloramentos, bem como os achados contidos nos mesmos, diminuindo possíveis lacunas de conhecimento sobre os afloramentos;
- c)** avaliar quantitativamente o valor científico, risco de degradação e potencial de uso educativo e turístico dos sítios paleontológicos;
- d)** discutir sobre o uso sustentável do Patrimônio Paleontológico da área estudada para fins científicos, educacionais e turísticos.

---

<sup>2</sup> Aqui consideramos os termos Patrimônio Geológico e Geopatrimônio como sinônimas, conforme adotado em trabalhos anteriores (e.g. Lopes; Candeiro; De Valais, 2019; Lopes; Lima; Candeiro, 2020, 2022).

## ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho de doutoramento é composto por sete capítulos, os três iniciais expõem o esboço geral de toda a pesquisa. O primeiro traz a fundamentação teórica que embasa toda a investigação. O segundo capítulo apresenta uma caracterização das unidades geológicas da área em estudo. E o terceiro expõe sobre materiais e procedimentos metodológicos utilizados para o alcance dos resultados de pesquisa.

Os demais capítulos tratam dos resultados do estudo. Desses, os capítulos quatro, cinco e sete estão estruturados em formato de manuscrito. O quarto capítulo trata-se de um manuscrito que apresenta um inventário do patrimônio paleontológico da área estudada, por meio do qual se busca responder aos objetivos específicos “a” e “b”. O capítulo seguinte é um manuscrito descritivo acerca das pegadas de terópodes encontradas em Fortaleza dos Nogueiras, no estado do Maranhão. Esse é o geossítio com a maior lacuna de conhecimento dentre os versados nesta pesquisa. Através do manuscrito procura-se busca responder ao objetivo específico “b”.

No sexto capítulo é realizada uma descrição dos geossítios escolhidos para a realização da quantificação, avaliação e propostas de uso sustentável. No sétimo e último capítulo de tese busca-se responder aos objetivos específicos “c” e “d”, trazendo um manuscrito de avaliação quantitativa sobre os geossítios investigados. O documento aborda a respeito dos valores e potencialidades do patrimônio paleontológico da área em análise e como estes podem ser usados para o desenvolvimento socioeconômico regional.

De acordo com o acima exposto, o presente trabalho acadêmico apresenta seus principais resultados em formato de manuscritos científicos. A tese está estruturada conforme com a norma da ABNT NBR 14724:2011, as citações são padronizadas em concordância com ABNT NBR 6023:2018, e as referências organizadas segundo a norma da ABNT NBR 6023:2018.

# 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 1.1 GEODIVERSIDADE

A geodiversidade compreende a “variedade de ambientes geológicos, fenômenos e processos ativos que dão origem a paisagens, rochas, minerais, fósseis, solos, formas de relevo e outros depósitos superficiais que são suporte para a vida na Terra” (Gray, 2013). Esse termo adquiriu relevância em meio à comunidade científica, por trazer à tona a importância dos elementos não bióticos da natureza no funcionamento dos ecossistemas e ainda como testemunho da constante evolução que ocorre no planeta Terra (Brilha, 2005).

O vocábulo geodiversidade data da década de 1940, sendo utilizado pela primeira vez por Frederico Alberto Daus (1901-1988), geógrafo argentino, para designar os mosaicos de paisagens e diversidades culturais. No entanto o termo ganhou relevância somente no final do século XX e início do século XXI, impulsionado pelas discussões sobre preservação e conservação da natureza (Sharples, 2002; Serrano; Ruiz Flaño, 2007). Na virada para o século XXI o termo passou a se tornar menos cultural e mais físico, com diversos conceitos propostos na literatura científica voltados a evidenciar a variabilidade dos aspectos físicos do planeta Terra.

As discussões acerca da geodiversidade envolvem também a sua valoração. Segundo Gray (2004), os principais valores atribuídos são: intrínseco, estético, cultural, científico, econômico, funcional e educativo. Em Nascimento *et al.* (2008), a geodiversidade “é também o elo entre as pessoas, paisagens e sua cultura, por meio da interação com a biodiversidade”, sendo assim, os valores da geodiversidade indicam sua importância direta para a humanidade, bem como para toda a estrutura biológica no planeta. Nesse âmbito, reconhecê-la e legitimá-la é essencial para que a humanidade desenvolva ações sustentáveis.

O conceito de geodiversidade proposto por Gray (2004, 2013) é o mais aceito, aplicado e difundido no Brasil atualmente, embora existam várias outras proposições que também buscam definir o termo. Dentro dessa variedade epistemológica, podemos citar os estudos de Stanley (2001), Rojas Lopez (2001), e Nascimento *et al.* (2008).

Para Stanley (2001), a geodiversidade é constituída pelas “paisagens naturais, entendidas como a variedade de ambientes e processos geológicos os quais estão relacionados a seu povo e a sua cultura”. Em Rojas López (2005) o termo responde a “um conceito relacionado à distribuição espacial de complexos territoriais diferenciados por seus atributos espaciais e descritivos em diferentes escalas geográficas”. Por sua vez, Nascimento *et al.* (2008) apresentam um desdobramento do conceito de geodiversidade proposto em Gray (2004),

explicitando que “a geodiversidade, de forma simples, consiste em toda a variedade de minerais, rochas, fósseis e paisagens que ocorrem no Planeta Terra”.

## 1.2 PATRIMÔNIO GEOLÓGICO E GEOCONSERVAÇÃO

Dentre todos os elementos que constituem a geodiversidade e seus respectivos valores, alguns componentes possuem valores que se destacam em meio aos demais, a esses dá-se a classificação de patrimônio geológico ou geopatrimônio (Brilha 2005, 2016).

O patrimônio geológico faz parte do patrimônio natural e é constituído por elementos da geodiversidade de valor excepcional incluindo fósseis, afloramentos de rochas, minerais, formas de relevo e materiais depositados em museus e coleções (Wimbledon *et al.*, 1999; Gray, 2004; Brilha, 2005; Carcavilla *et al.*, 2007; Henriques *et al.*, 2011; Bruno *et al.*, 2014).

Brilha (2005) propôs um conceito consideravelmente aceito e utilizado entre os cientistas. Para o citado autor, o patrimônio geológico representa o conjunto de geossítios, ou locais de interesse geológico, inventariados e caracterizados de uma dada região, sendo os geossítios “locais bem delimitados geograficamente, onde ocorrem um ou mais elementos da geodiversidade com singular valor do ponto de vista científico, pedagógico, cultural, turístico ou outro”.

Brilha (2016) reformula seus conceitos em relação a patrimônio geológico e geossítio, propondo que a geodiversidade é dividida em dois grupos de elementos: os sítios com valor científico, e os sítios que possuem outros valores que não esse. Assim sendo, os locais onde a geodiversidade apresente valor científico são denominados geossítios, e as áreas que apresentem outros valores são chamados sítios da geodiversidade, quando encontrados *in situ*, e elementos da geodiversidade quando se localizam *ex situ*. Deste modo o autor defende que sejam considerados patrimônio geológico apenas os locais que apresentem elementos da geodiversidade que possuam valor científico.

Como é constituído apenas por locais com elementos da geodiversidade de valor excepcional, o patrimônio geológico representa apenas uma pequena porção da geodiversidade, a porção que necessita ser conservada. Essa fração especial é designada pelos cientistas como patrimônio por se sobressair em meio aos demais elementos da geodiversidade evidenciando eventos, fenômenos ou processos importantes da história da Terra, com significativa importância científica, educativa ou mesmo cultural (Carcavilla *et al.*, 2009; Henriques *et al.*, 2011; Gray, 2013; Prosser *et al.*, 2013; Nascimento *et al.*, 2015; Brilha, 2016; Reynard; Brilha, 2018; Gray, 2019).

A conservação desses elementos de destaque é denominada geoconservação. O objetivo da geoconservação foi definido por Sharples (2002) como sendo a proteção da diversidade abiótica natural de significativos aspectos e processos geológicos (substrato), geomorfológicos (formas de paisagem) e de solo, mantendo a evolução natural (velocidade e intensidade) desses aspectos e processos. Sendo assim a geoconservação busca conservar importantes componentes da geodiversidade com ações práticas que resultem em uma utilização sustentável desses atributos (Brilha, 2005).

A conservação do patrimônio geológico pressupõe a adoção de medidas como inventário, quantificação, proteção legal, valorização, divulgação e monitoramento de geossítios, para assim manter esse legado de forma a ser utilizado sustentavelmente (Sharples, 2002; Reynard; Brilha, 2018). Esse conjunto de ações reconhece que, no processo de proteção da natureza, o componente abiótico é tão importante quanto o biótico no funcionamento dos ambientes naturais. Essas ações, podem se dar por meio do estabelecimento de leis/programas específicos para o patrimônio geológico e/ou por meio da conscientização do público sobre a importância desses locais.

### 1.3 PATRIMÔNIO PALEONTOLÓGICO

Os fósseis são registros de formas de vida que ocorreram no passado geológico do nosso planeta e constituem resquícios de organismos em ambientes antigos (Noffke, 2005; Heriques; Pena Dos Reis, 2015). Sendo os registros fossilíferos ocorrências naturais que dependem de um contexto geológico complexo, os fósseis são elementos não renováveis e irrepetíveis e, desta forma, bens valiosos (Cachão; Silva, 2004).

Ao tratarmos os fósseis como objetos de grande valor podemos considerá-los como patrimônio, ou seja, elementos que possuem características que tornam necessárias ações para sua conservação e continuidade (Bruno *et al.*, 2014). O patrimônio paleontológico possui ligações genéticas com os passados geológico e biológico das áreas aflorantes, sendo um elemento finito que, por sua origem, possui múltiplas implicações científicas e, consequentemente, educacionais (Cachão; Silva, 2004).

Os estudos paleontológicos têm buscado sempre a elaboração de novas técnicas e descobertas. Com o advento do paradigma geoconservacionista nas geociências nas últimas décadas essa busca se expandiu para incluir o desenvolvimento de estratégias que conectam a sociedade aos resultados das pesquisas e façam com que esse elemento da geodiversidade seja um mecanismo de desenvolvimento socioeconômico e geoes educativo (Reynard; Brilha, 2018; Gray, 2019).

Essas ações permitiram o surgimento de um fato singular, os fósseis ganharam uma nova aplicação e valor para além da sua própria importância científica e educacional, passando a serem elementos de revitalização social, econômica e cultural através de práticas de popularização do conhecimento, dos elementos paleontológicos e do geoturismo (Ribeiro *et al.*, 2011).

Os primeiros sinais do relacionamento entre o ser humano e os fósseis dizem respeito a coleções encontradas em cavernas na França e que datam de 80.000 anos atrás. Outros registros sugerem a utilização destes recursos minerais como utensílios decorativos de túmulos e amuletos de boa sorte há cerca de 35.000 anos por povos que habitavam territórios correspondentes, hoje, à Itália e França. Por sua vez, povos antigos do norte da Europa consideravam os fósseis como a representação de algum mal, preso transformado em rocha (Page, 2018).

Com o avanço do pensamento científico e das descobertas geocientíficas, os registros paleontológicos deixaram de ser associados a crenças e misticismos, tornando-se fontes valiosas de informações sobre o passado do nosso planeta e recursos didáticos para a formação educacional. Além de sua importância científica, que permite investigar e interpretar a origem e evolução da vida e da Terra, o estudo dos fósseis tem uma relevante aplicação econômica. Por exemplo, na indústria, ele é fundamental para a sondagem e prospecção de recursos geológicos, como o petróleo, especialmente devido à importância dos microfósseis e palinóforos (Viana; Carvalho, 2019).

A importância econômica dos fósseis não está associada apenas à área industrial, outro destaque pecuniário está associado ao setor de serviços, com a utilização do patrimônio paleontológico e do interesse do público em geral de enxergar animais já extintos em paisagens não mais existentes. Não obstante, regiões com elementos paleontológicos possuem o potencial de atrair visitantes para vivenciarem a experiência de serem transportados para tempos pretéritos e conhecerem sobre o passado da biodiversidade e também da geodiversidade local (Carvalho, 2018).

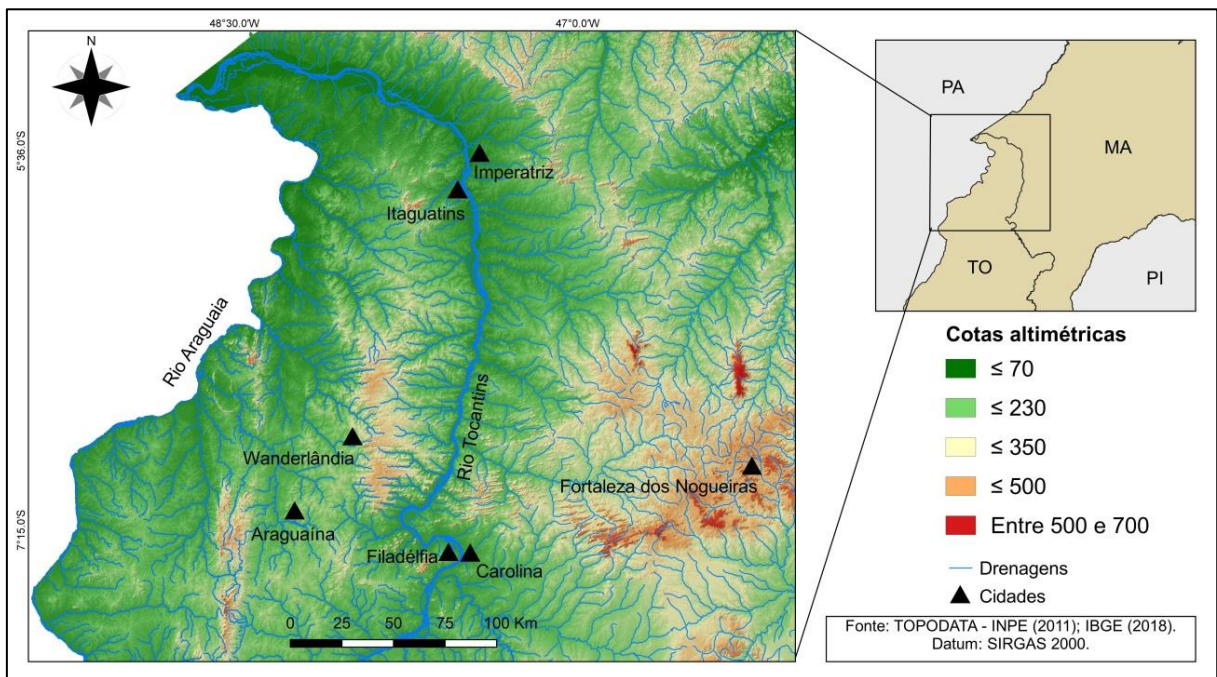
O patrimônio paleontológico se torna, então, um importante mecanismo de popularização do conhecimento geocientífico e, ao mesmo tempo, um elemento de identidade territorial com potencial para impulsionar a realidade socioeconômica das comunidades nas áreas de afloramento. Isso é especialmente relevante porque os fósseis são encontrados, em sua maioria, em pequenas cidades ou regiões rurais no interior do Brasil, onde há poucas oportunidades de trabalho e a população frequentemente desconhece o significado e a importância do material coletado ao lado de suas casas. Essa falta de conhecimento representa

uma ameaça à conservação desses achados de valor patrimonial (Ponciano, 2011).

## 2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO

A área em estudo (Fig. 1) foi delimitada entre as latitudes 07° 31' 48" S e 05° 02' 36" S, longitudes 49° 16' 31" W e 45° 55' 22" W, levando em consideração as regiões norte do estado do Tocantins e sudoeste do estado do Maranhão. A área se superpõe a rochas da porção ocidental da Bacia Sedimentar Intracratônica do Parnaíba, com formações geológicas depositadas do Permiano ao Cretáceo (CPRM, 2004).

**Figura 1** - Localização da área em estudo.



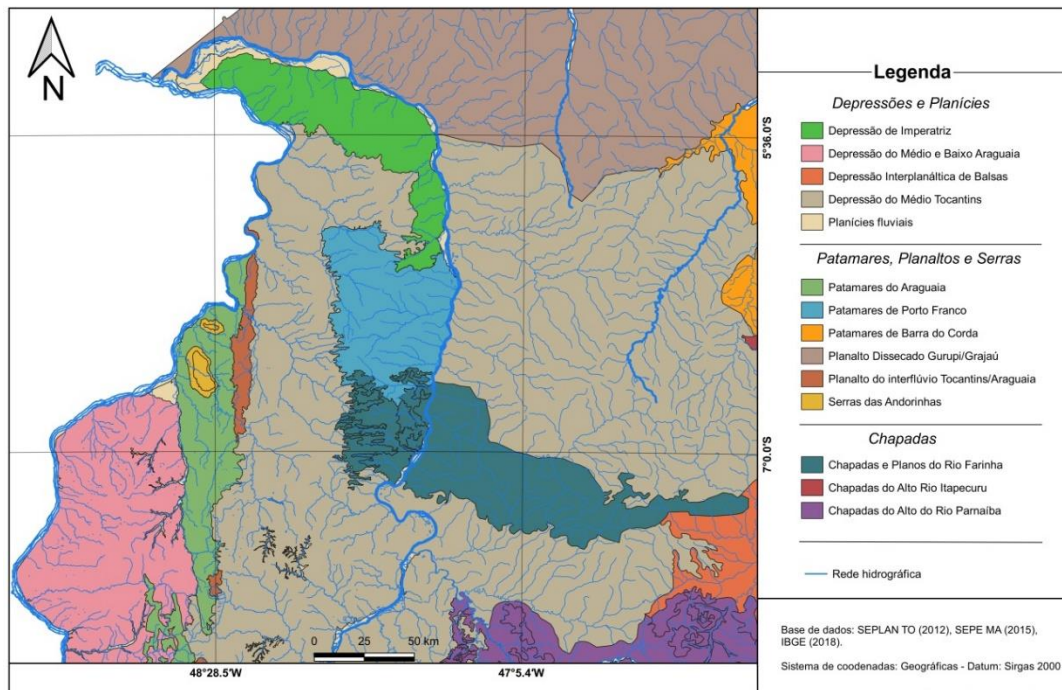
**Autor:** Raylon da Frota Lopes. **Fonte:** IBGE (2018), INPE (2011).

Com uma extensão de aproximadamente 82.000 km<sup>2</sup>, a área possui uma população de cerca de 1.200.000 habitantes distribuídos em 60 municípios em ambos os estados (IBGE, 2022). A economia da região é baseada majoritariamente na agropecuária e setor de serviços, mas há também uma representatividade do setor industrial, com destaque para o Distrito Industrial de Imperatriz, que é o segundo mais importante do estado do Maranhão, e o Distrito Agroindustrial de Araguaína, o qual representa a base industrial da segunda maior economia do estado do Tocantins.

Na área em destaque, as vegetações predominantes são o cerrado, com suas diversas fitofisionomias e porções de floresta amazônica. Há também grandes porções da região marcadas por zonas de transição vegetacional entre esses dois biomas (Tocantins, 2013 Maranhão, 2018).

Geomorfologicamente as principais características são as depressões do Araguaia e Tocantins (Fig. 2), com predominância de planícies e terraços fluviais; planaltos residuais do Interflúvio Araguaia-Tocantins, com formas tabulares e convexas; e as Chapadas e Planos do rio Farinha, unidade popularmente conhecida como Chapada das Mesas, cujas características genéticas estão ligadas à dissecação, e formas em sua maioria tabulares e ruíniformes (Tocantins, 2013; Maranhão, 2018).

**Figura 2** – Mapa geomorfológico da área em estudo.



**Autor:** Raylon da Frota Lopes. **Fonte:** Tocantins (2012), Maranhão (2015), IBGE (2018).

A hidrografia da região é marcada pela presença dos rios Tocantins e Araguaia, além de uma grande malha hidrográfica composta majoritariamente por drenagens de primeira e segunda ordem. Os solos possuem alta acidez, o que é comum em áreas de cerrado, sendo que as principais ocorrências de solos na região são o Argissolo Vermelho, Latossolo Amarelo, Vermelho-Amarelo e Vermelho, Nitossolo Vermelho e Plintossolo (IBGE, 2011).

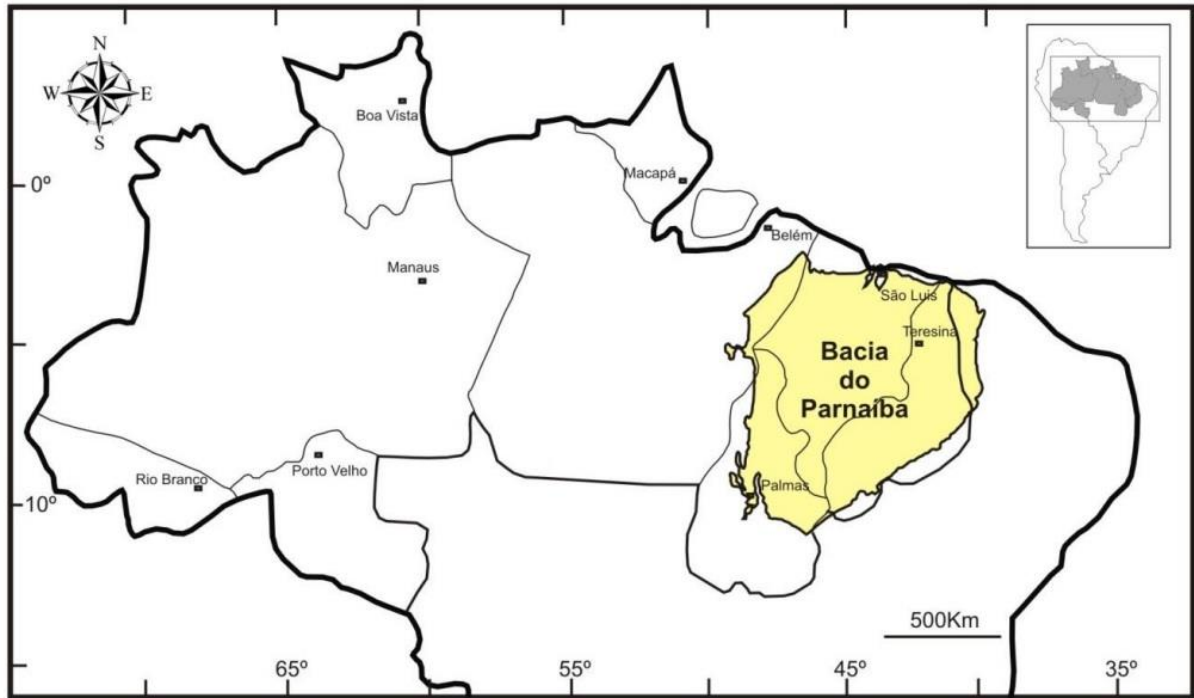
## 2.1. CONTEXTO GEOLÓGICO

### 2.1.1. Bacia Sedimentar do Parnaíba

A Bacia Sedimentar Intracratônica do Parnaíba, anteriormente denominada bacia do Maranhão, pertence à Província Sedimentar do Meio Norte e se situa entre as regiões norte e nordeste do Brasil, abrangendo áreas dos estados do Maranhão e Piauí, em maior parte, e

porções dos estados do Pará, Tocantins, Ceará e Bahia (Góes; Feijó, 1994) (fig. 3). A coluna sedimentar desta bacia é de aproximadamente 3.500 m em seu depocentro, com espessura média de cerca de 2.000 m (Arce *et al.*, 2006).

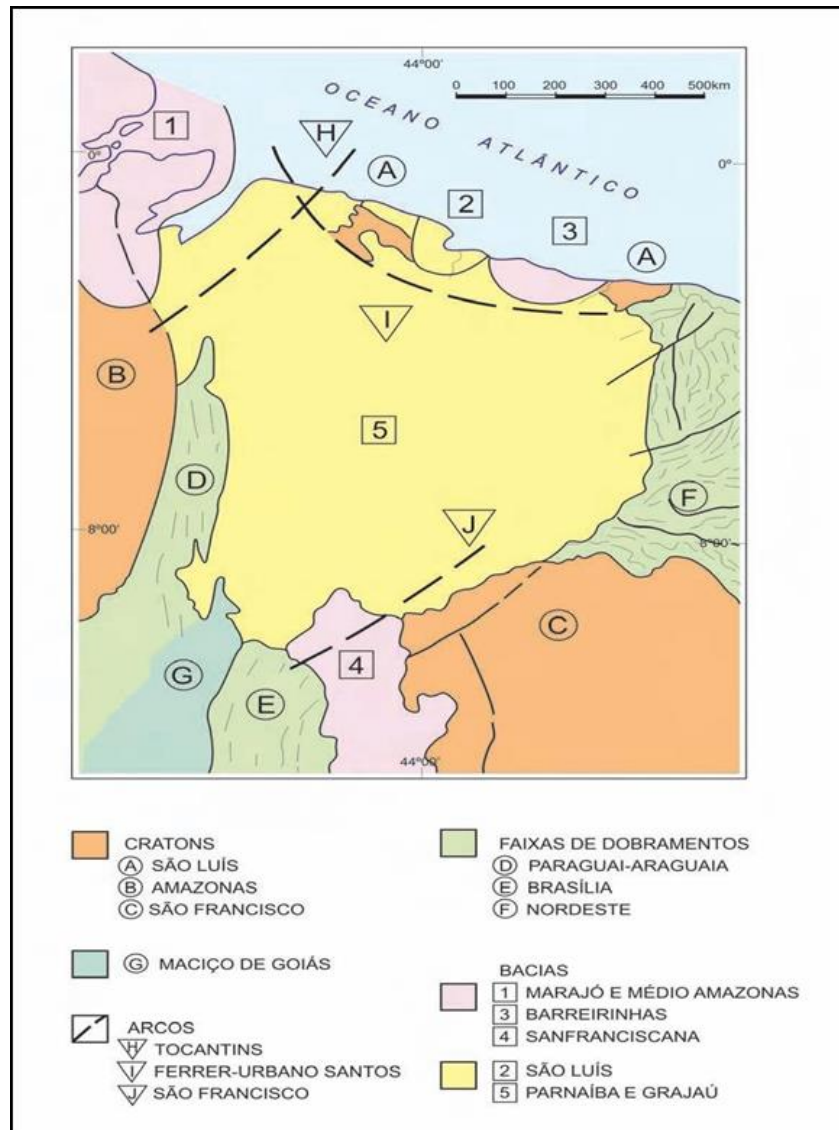
**Figura 3** – Localização da Bacia Sedimentar do Parnaíba.



**Fonte:** Modificado de Marques (2011).

O embasamento da bacia do Parnaíba é constituído por rochas ígneas, metamórficas e sedimentares com idades que abrangem do Arqueano até o Ordoviciano, geradas e retrabalhadas durante o Ciclo Brasileiro (Vaz *et al.*, 2007). Os sedimentos desta unidade geológica foram depositados entre faixas de dobramentos que rodeiam os crátons Amazonas, São Luís e São Francisco. Os limites estruturais correspondem a noroeste pelo Arco de Tocantins, a sul pelo Arco de São Francisco, e a norte pelo Arco Ferrer-Urbano Santos, que a separa das bacias costeiras (Santos; Carvalho, 2009) (fig. 4).

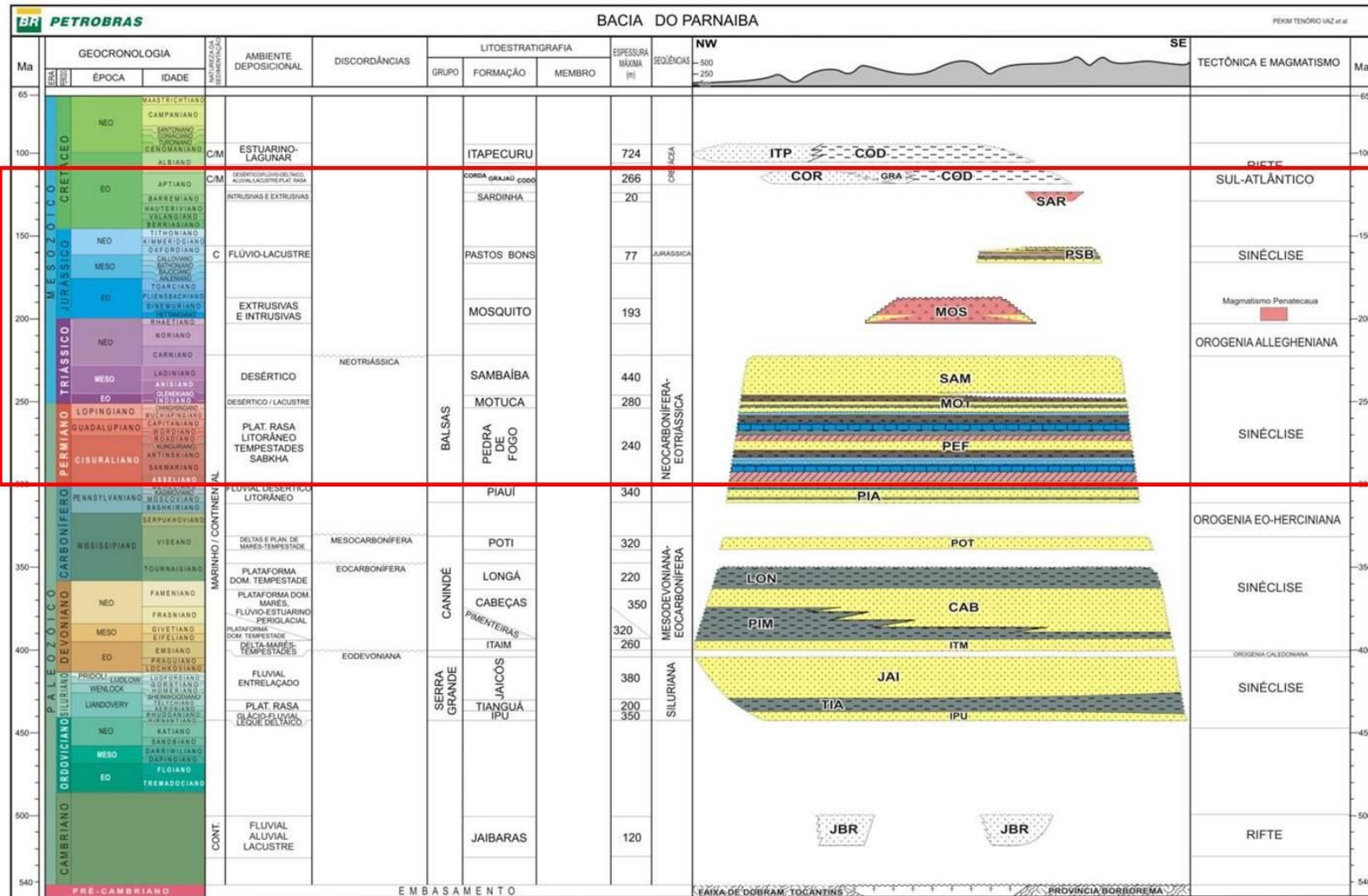
**Figura 4** - Limites geológicos da Bacia do Parnaíba.



**Fonte:** Santos; Carvalho (2009).

Estratigraficamente a bacia do Parnaíba é dividida em cinco supersequências deposicionais, sendo estas: a siluriana, correspondente ao Grupo Serra Grande (formações Ipu, Tianguá e Jaicós); a devoniano-carbonífera, é representada pelo Grupo Canidé (formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti); a carbonífera-triássica, referente ao Grupo Balsas (formações Pauí, Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba); a sequência jurássica, correspondente à Formação Pastos Bons; e sequência cretácea, equivalente às formações Codó, Corda, Grajaú e Itapecuru (fig. 5). A bacia também inclui derrames vulcânicos jurássicos da Formação Mosquito e extrusões magmáticas do Cretáceo da Formação Sardinha (Vaz *et al.*, 2007).

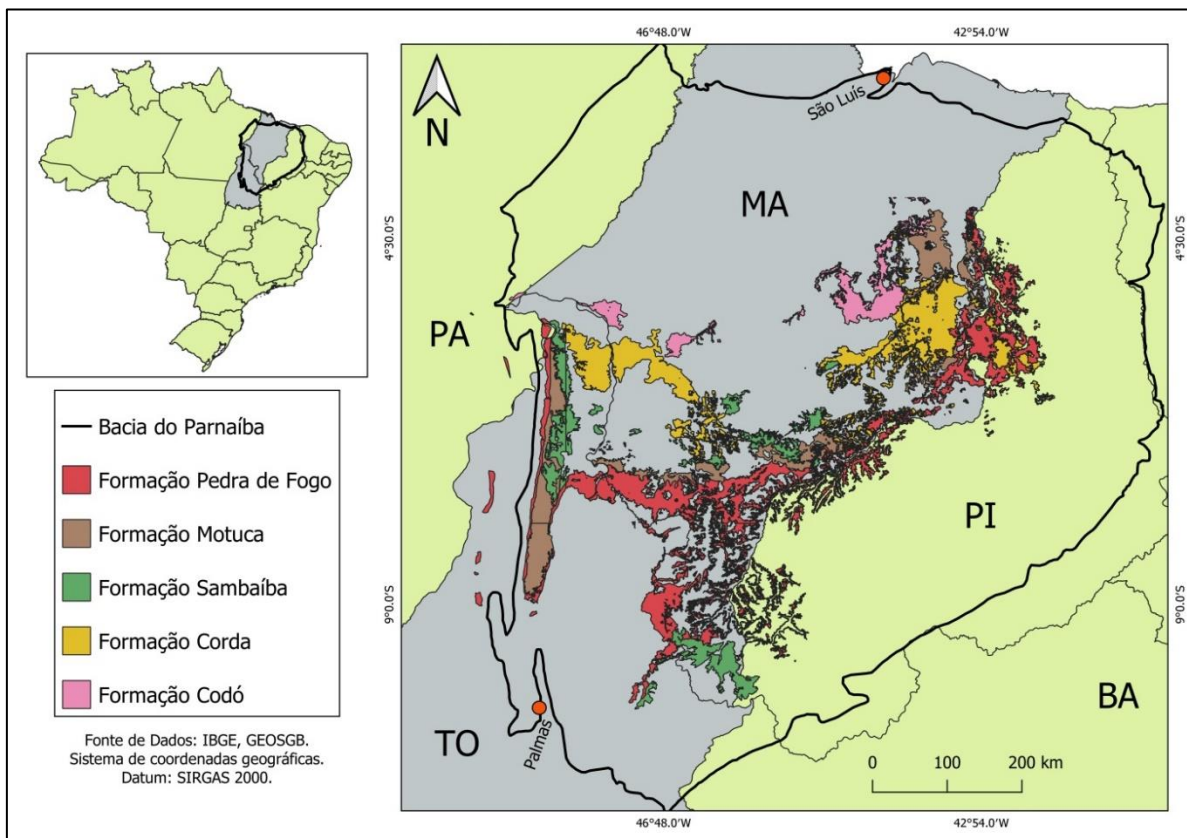
Figura 5 - Carta estratigráfica geral da Bacia Sedimentar do Parnaíba com com ênfase nas formações abordadas na presente pesquisa.



### 2.1.2. Formação Pedra de Fogo

A Formação Pedra de Fogo (Plummer, 1946 *apud* Góes; Feijó, 1994) (fig. 6) é caracterizada pela presença de sílex e calcário de coloração creme a branco intercalado com arenitos de grãos finos a médios e coloração amarelada, e ainda anidrita branca, depositados em um contexto marinho raso a litorâneo e em planícies de *sabkha*, durante o Eo-mesopermiano (Góes; Feijó, 1994). Essa unidade aflora na região central da bacia do Parnaíba, ao longo de uma faixa de aproximadamente 600 km na direção leste-oeste, com uma largura média de 80 km e espessura de sedimentos estimada em até 240 m (Caputo, 1984; Pinto; Sad, 1986; Caputo *et al.*, 2005).

**Figura 6** – Mapa geológico simplificado das unidades litológicas em estudo e sua distribuição na bacia do Parnaíba.



**Autor:** Raylon da Frota Lopes. **Fonte:** GEOSGB (2018), IBGE (2018).

Com base em aspectos litológicos, mineralógicos e texturais a Formação Pedra de Fogo foi subdividida por Faria Jr. (1979) em três membros denominados *Sílex* Basal, Membro Médio e Membro Superior, também chamado de “Trisidela”. O Membro Basal é constituído por siltitos e folhelhos intercalados por bancos dolomíticos e concreções silicosas. O Membro Médio é formado por arenitos e siltitos em sua base, que se estende até as intercalações de folhelhos com chert, sobrepostos a estes ocorrem bancos carbonáticos com presença de chert e calcita. O

Membro Superior é caracterizado por bancos dolomíticos, intercalados por siltitos e folhelhos (Faria Jr., 1979).

A deposição na Formação Pedra de Fogo é atribuída ao período Permiano, uma vez que Faria Jr. e Truckenbrodt (1980), Lima e Leite (1978), Góes e Feijó (1994) e Dias-Brito *et al.* (2009) a posicionam no intervalo eo-mosopermiano (Kunguriano). Sobre a sedimentação nessa unidade, Andrade *et al.* (2014) e Araújo *et al.* (2016) atribuem o ambiente deposicional da formação a um sistema lacustre de clima árido, com rios efêmeros e *sabkhas* continentais, sob circunstanciais ocorrências de tempestades. Entretanto, ela pode ser interpretada como de influência marinha, desde flúvio-deltaico a marinho raso e planície *sabkha*, com circunstanciais influências de tempestades (Dino *et al.*, 2002).

### **2.1.3. Formação Motuca**

A Formação Motuca (Plummer, 1946 *apud* Góes; Feijó, 1994) é constituída por arenitos brancos finos a médios, siltitos de coloração vermelho a marron, folhelhos avermelhados, anidrita branca e em alguns pontos calcários. Aguiar (1971) propôs a subdivisão dessa unidade em três membros, o Membro Inferior, constituído essencialmente por arenitos de finos a muito finos e coloração vermelha; o Membro Médio, formado por intercalações de siltitos com bancos carbonáticos, em geral sucedidos por camadas mais espessas de gipsita e ou anidrita; e o Membro Superior, constituído predominantemente por arenitos muito finos a siltitos vermelhos.

A respeito do paleoambiente da Formação Motuca, a literatura apresenta diferentes interpretações. Para Lima e Leite (1978), o ambiente de sedimentação desta unidade está entendido como lacustre raso e *sabkha* continental, sob variadas condições de sedimentação (fluvial, lacustre e eólica), com episódios de transgressões marinhas. Góes e Feijó (1994) interpretam o paleoambiente da Formação Motuca como continental desértico com sistemas lacustres. Por sua vez, Abrantes e Nogueira (2013) atribuem a sedimentação da unidade a ambientes com sistema lacustre raso, influenciado esporadicamente por influxos arenosos de rios efêmeros sob condições climáticas crescentemente áridas. Em último, Vaz *et al.* (2007) consideram a Formação Motuca de idade neopermiana (Lopingiano).

### **2.1.4. Formação Sambaíba**

A Formação Sambaíba é constituída por arenitos de colorações vermelha e rosa e granulação fina a média com estratificação planar e cruzada de grande porte. Atribuída ao Triássico a idade desta unidade geológica é estabelecida com base em seu posicionamento

estratigráfico em relação a outras formações, sendo estas a Formação Motuca (Neopermiano) e a Formação Mosquito (Jurássico) (Caputo, 1984; Góes; Feijó, 1994; Caputo *et al.*, 2005).

Com espessura de até 400 m, na porção central da bacia do Parnaíba, a sedimentação nesta unidade geológica é atribuída a um sistema eólico com contribuições fluviais depositados em um paleoambiente desértico (Góes; Feijó, 1994; Vaz *et al.*, 2007). Essa unidade foi historicamente considerada afossilífera por conta do seu ambiente de sedimentação característico de uma intensa desertificação no megacontinente Pangea durante o Triássico. Contudo, icnofósseis de vertebrados, dinossauros terópodes, foram reportados para essa formação, fato esse que contribui para um melhor entendimento futuro desta unidade (Santos; Carvalho, 2009; Assis *et al.*, 2010).

### **2.1.5. Formação Corda**

A Formação Corda aflora na porção central da bacia do Parnaíba. Essa unidade possui uma litologia composta por arenitos vermelhos, castanho-avermelhados, brancos, roxo a cinza, muito finos e também finos e médios ricos em óxidos de ferro e zeólitas. Os depósitos sedimentares desta formação são sobrepostos em acordo à Formação Pastos Bons e de modo discordante aos basaltos da Formação Mosquito (Aguiar, 1971).

O processo de sedimentação na Formação Corda foi atribuído a um ambiente desértico, de condições climáticas secas, quentes e fluviais de alta energia, o qual acarreta para a preservação de fósseis a condição de evento raro nesse contexto (Santos; Carvalho, 2009; De Valais *et al.*, 2015).

As estruturas sedimentares predominantes na Formação Corda são os pacotes com estratificação cruzada acanalada, de amplo porte e fluxo de grãos, intercalando camadas com estratificações plano-paralelas. Essas estruturas são interpretadas como depósitos de dunas eólicas e de regiões de interdunas (Aguiar, 1971).

### **2.1.6. Formação Codó**

A Formação Codó compreende uma sequência de folhelhos, calcários e evaporitos intercalados, que cobre uma área de cerca de 170.000 km<sup>2</sup> no estado do Maranhão. A unidade é composta em subsuperfície por três subunidades, descritas por Rezende e Pamplona (1970) como unidade Basal, subunidade Intermediária e subunidade Superior.

A unidade Basal é composta por conglomerado seguido por folhelhos betuminosos, intercalados com calcário. A subunidade Intermediária é composta por um conglomerado

polimítico recoberto por folhelhos fossilíferos. A subunidade superior compreende basicamente calcário, arenito e siltito, depositada em sistemas deltáicos e lacustres.

Os depósitos da Formação Codó são atribuídos a ambientes deposicionais predominantemente lacustres, tendo-se em vista as características faciológicas com domínio de litologias formadas por suspensão e a ausência de fósseis marinhos. Sua espessura de sedimentos é mensurada em 400 m (Ramos *et al.*, 2006).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram utilizados os seguintes materiais:

- Materiais básicos para trabalho de campo, como martelo, prancheta, câmera fotográfica, fita métrica e receptor de sinal GPS.
- Bases cartográficas e dados vetoriais e matriciais em escala 1:250.000, relacionados a solo, geologia e geomorfologia, gerados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e disponíveis no Banco de Dados e Informações Ambientais (IBGE BDIA - <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home>).
- Dados geológicos vetoriais e matriciais gerados pelo Serviço Geológico do Brasil - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), disponibilizados no site da instituição e na Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais - SIG Brasil (INDE - <https://inde.gov.br/>). As escalas dos dados cartográficos utilizados são de 1:250.000 e 1:1.000.000.
- Dados geomorfológicos e de solos em escala 1:250.000 obtidos nos sites da Secretaria de Planejamento do Tocantins (SEPLAN, 2013) e da Secretaria de Estado e Programas Estratégicos do Maranhão (SEPE, 2018).
- Software QGIS 3.14 para edição e análise de informações georreferenciadas.

#### 3.2 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

Para o desenvolvimento da pesquisa e o alcance dos objetivos propostos, foram considerados quatro estágios de procedimentos metodológicos, alguns deles realizados tautocronicamente. As etapas são descritas a seguir:

##### Etapa 1 - Levantamento Bibliográfico:

O levantamento bibliográfico consistiu na construção de um referencial teórico sobre os temas de geodiversidade, patrimônio geológico/paleontológico e geoconservação, além de dados sobre a área estudada. Nesta fase, foi realizada uma revisão minuciosa da literatura científica existente, incluindo uma vasta quantidade de artigos, livros e relatórios técnicos, para identificar os registros paleontológicos reportados para a região norte do estado do Tocantins e sudoeste do estado do Maranhão. Todas as ocorrências encontradas na literatura técnico-científica foram inseridas no inventário, que foi, portanto, elaborado como parte integral desta etapa.

Crítérios foram estabelecidos para a seleção dos locais a serem utilizados nas etapas seguintes da pesquisa, assegurando que todos os sítios paleontológicos identificados na literatura fossem considerados. Os critérios foram: as ocorrências devem estar no intervalo de tempo geológico correspondente aos períodos Paleozoico e Mesozoico; ocorrências *ex situ* são levados em considerao no inventário, pois fazem parte da riqueza paleontológica da área, mas não são alvos dos estudos de geoconservao nas fases posteriores do trabalho; foram considerados apenas locais com elementos *in situ*, pois se objetivou destacar os valores e a necessidade de proteo em sítios ainda pouco estudados, bem como demonstrar sua relevância para o uso sustentável.

#### Etapa 2 - Trabalhos de Campo:

Os trabalhos de campo envolveram a organizao de três saidas para coleta de dados, baseadas na revisão bibliográfica que identificou ocorrências fósseis previamente documentadas e que atenderam aos critérios preestabelecidos. Essas expedioes foram realizadas nos geossítios selecionados para os estudos de quantificao e proposioes de usos sustentáveis, visando o reconhecimento da área, a verificao das unidades geológicas, e a análise dos afloramentos e dos elementos paleontológicos de cada geossítio.

Durante o levantamento de campo, foram coletados dados detalhados sobre os geossítios, incluindo coordenadas geográficas, marcos geográficos próximos (cidades ou vilarejos), e dados sobre o nível de facilidade de acesso a cada local. Também foram documentadas as rochas presentes no geossítio, sua sequência, espessura e relaoes de contato para confirmar os dados da literatura geológica regional.

Além disso, foram observados e registrados os tipos de fósseis encontrados (e.x., invertebrados, vertebrados, plantas), verificando se correspondiam às descrioes da bibliografia, bem como dados sobre a distribuio e abundância dos fósseis no geossítio, integridade e qualidade das estruturas fossilizadas. Importante destacar que em nenhum dos trabalhos de campo foram coletadas amostras de espécimes. Também foram documentados impactos causados por atividades humanas que poderiam afetar os fósseis, como construoes, vandalismo, turismo descontrolado ou uso da área para outros fins.





A coleta de dados foi auxiliada por receptores de sinal GPS, para o georreferenciamento dos geossítios. Registros fotográficos das áreas visitadas e anotaoes relevantes foram produzidos para o prosseguimento da pesquisa. As tabelas de quantificao do valor científico,

dos potenciais de uso educacional e turístico, e do risco de degradação contidas em Brilha (2016) foram utilizadas para guiar as observações de campo.

### Etapa 3 - Análise e Interpretação dos Dados:

Nesta etapa, foram reunidos e interpretados os dados obtidos nos trabalhos de campo. Foi realizada a quantificação dos geossítios, utilizando-se o aplicativo *web* Geossit, baseado na metodologia de Brilha (2016) e García-Cortés e Carcavilla Urquí (2009). As análises abrangeram o valor científico, relevância, risco de degradação, potencial de uso didático e turístico de cada geossítio. Juntamente com a análise quantitativa se realizou a classificação dos geossítios estudados em tipologias, baseando-se na metodologia utilizada por Nascimento *et al.* (2021). De acordo com essa metodologia os geossítios podem ser classificados como ponto, seção, área e observatório (Quadro 1).

**Quadro 1.** Definições das tipologias de geossítios utilizada em Nascimento *et al.* (2021).

<b>Tipologia</b>	<b>Definição</b>	<b>Simbologia</b>
<b>Ponto</b>	Ocorrências isoladas com abrangência de uma área inferior a 0,5 ha	
<b>Seção</b>	Ocorrência espacialmente linear.	
<b>Área</b>	Ocorrência com abrangência de uma área superior a 0,5 ha.	
<b>Observatório</b>	Local natural de onde geossítios ou elementos especiais da paisagem podem ser visto.	

**Fonte:** Nascimento *et al.* (2021).

Nesta fase também foram descritos novos icnofósseis encontrados próximos ao ribeirão das Lajes, na Fazenda Malhada Vermelha, em Fortaleza dos Nogueiras, MA. Esses achados representam a área com maior carência de descrições sistemáticas e taxonômicas dos espécimes entre os geossítios investigados. Cada pegada foi documentada, fotografada e medida. As terminologias da paleoicnologia de vertebrados utilizadas na pesquisa seguiram Leonardi (1987). As medidas realizadas incluíram comprimento e largura das pegadas, profundidade das impressões e tamanho do aro de deslocamento.

#### Etapa 4 - Proposições de geoconservação:

Por fim, a etapa 4 contemplou as proposições de geoconservação do patrimônio paleontológico da região, realizadas a partir dos dados obtidos nas etapas anteriores e levando em consideração o contexto geográfico de cada geossítio paleontológico. As proposições de geoconservação incluíram medidas para minimizar os impactos negativos causados por atividades humanas e estratégias para promover o uso sustentável dos geossítios, visando a proteção, valorização e valoração do patrimônio paleontológico da área.

### 3.3 GEOSIT: MÉTODO DE AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DO SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM)

O Geossit é um aplicativo *Web* desenvolvido pela CPRM para cadastro e quantificação de geossítios e está baseado na metodologia de inventário e avaliação quantitativa proposta em Brilha (2016), com influências da abordagem de García-Cortés e Carcavilla Urquí (2009).

O aplicativo permite a integração dos dados de inventário e quantificação para caracterização do patrimônio geológico em território brasileiro, funcionando como uma ferramenta para a padronização do cadastramento de geossítios do Brasil. Trata-se de uma plataforma de livre acesso que possui um conjunto de planilhas eletrônicas que devem ser preenchidas para que se possa realizar a avaliação quantitativa e se obter a relevância e os valores dos potenciais de uso do geossítio em estudo. A plataforma também possibilita a visualização dos dados de geossítios já cadastrados.

Além do cadastramento e avaliação de novos locais de afloramentos, o Geossit também sugere algumas recomendações quanto à urgência e necessidade de proteção dos geossítios cadastrados na plataforma, independentemente da finalidade do local, se para objetivos turísticos ou didáticos, por exemplo.

A classificação de relevância dos geossítios pelo Geossit foi dada após o preenchimento de todos os parâmetros referentes ao valor científico do dado local. Esses valores são: representatividade, local-tipo, conhecimento científico, integridade, diversidade geológica, raridade, limitações ao uso do dado local (Brilha, 2016: Tabela 3). Após essa fase, o sistema calculou uma média final para os geossítios, atribuindo-lhes um grau de importância nos âmbitos internacional, nacional ou regional. Nesta metodologia em valores <200 é atribuída uma relevância local ou regional ao sítio, em valores de 200 a 300 é atribuída relevância nacional, e em geossítios com valores >300 a relevância é atribuída como internacional.

Para a avaliação dos potenciais de uso educacional e turístico (Brilha, 2016: Tabela 5) foram considerados os seguintes critérios: vulnerabilidade, acessibilidade, limitações de uso, segurança, logística, densidade populacional, associação com outros valores, beleza cênica, singularidade, condições de observação, potencial didático, diversidade geológica, potencial para divulgação, nível econômico e proximidade a zonas recreativas. Entretanto, desses critérios, os parâmetros potencial didático e diversidade geológica são usados apenas na quantificação do potencial de uso didático, enquanto os parâmetros potencial para divulgação, nível econômico e proximidade a zonas recreativas, somente na quantificação do potencial de uso turístico.

Cada um dos critérios citados recebeu uma pontuação de 1 a 4 quando aplicável ao geossítio em análise, os critérios não possuem pesos iguais (Brilha, 2016: Tabela. 6). Ao final do processo de pontuação houve uma ponderação, para obter-se então o resultado acerca do potencial de uso do geossítio, se este é baixo, moderado ou alto. Os valores de referência seguem os mesmos do valor científico, <200 (Baixo), entre 200 e 300 (médio) e >300 (alto).

Na avaliação do risco de degradação (Brilha, 2016: Tabela. 7) se aplicou cinco critérios: deterioração dos elementos geológicos, proximidade a áreas/atividades com potencial para causar degradação, proteção legal, acessibilidade e densidade populacional. Quando o critério é aplicável à área investigada, a pontuação possível é de 1 a 4 pontos, então é determinado se o risco de degradação é baixo, moderado ou alto (Brilha, 2016: Tabela. 9), sendo que em valores <200 o risco de degradação é baixo, valores entre 200 e 300 representam um risco de degradação médio, e valores >300 o caracterizam alto risco de destruição dos principais elementos do geossítio.

## RESULTADOS

Os resultados de pesquisa são apresentados a partir desta seção. São quatro capítulos, três sob a forma de manuscritos (capítulos quatro, cinco e sete). No primeiro manuscrito realiza-se um inventário do patrimônio paleontológico da região norte do estado do Tocantins e sudoeste do estado Maranhão, com fins de identificar os locais de interesse paleontológico da área e os achados neles contidos.

O segundo manuscrito versa sobre a descrição de pegadas de dinossauros terópodes encontradas no município de Fortaleza dos Nogueiras no Maranhão. Essas pegadas constituem os achados com menor grau de conhecimento entre os geossítios trabalhados. No capítulo seis é realizada uma descrição dos geossítios estudados na pesquisa, cujas avaliações quantitativas serviram de apoio para a proposição de medidas de proteção e uso sustentável.

O terceiro manuscrito, por sua vez, apresenta uma avaliação quantitativa dos geossítios da área em estudo. Nele avalia-se quantitativamente o valor científico, o risco de degradação e os potenciais de uso educativo e turístico dos sítios paleontológicos, abordando ainda sobre possibilidades de aproveitamento socioeconômico do patrimônio paleontológico dos geossítios estados.

#### **4 O PATRIMÔNIO PALEONTOLÓGICO DO NORTE DO ESTADO DO TOCANTINS E SUDOESTE DO MARANHÃO, BRASIL: UMA SÍNTESE PRELIMINAR**

O manuscrito a seguir “The Paleontological Heritage of Northern Tocantins State and Southwest Maranhão State, Brazil: a Preliminary Synthesis”, publicado na revista científica *Terr@ Plural*, Qualis A3, objetivou o levantamento, mapeamento e descrição preliminar do patrimônio paleontológico na região norte do estado do Tocantins e sudoeste do Maranhão.

Este artigo representa a primeira etapa dos resultados da presente tese de doutoramento e busca responder aos objetivos específicos “a” e “b” e à seguinte questão problema: “em que consiste o patrimônio paleontológico originário do Paleozoico e Mesozoico da região norte do estado do Tocantins e sudoeste do estado do Maranhão?”. Esta etapa é composta pelo inventário dos afloramentos fossilíferos distribuídos na área estudada. O cerne é, portanto, a procura por respostas acerca da diversidade dos registros paleontológicos presentes na região.

Ao realizar a inventariação de afloramentos e a descrição preliminar dos táxons identificados, o artigo em questão compila o conhecimento paleontológico da área. Destaca-se a importância de identificar e caracterizar esses fósseis, uma vez que grande parte dos registros na região carecem de trabalhos descritivos e análises sistemáticas, pois encontram-se de certa forma “desassistidos”, ou seja, sem nenhum tipo de estudo ou trabalho de proteção sendo realizado para os locais.

Na realização de estudos ligados à geoconservação é necessário primeiramente conhecer os elementos que se pretende conservar. Com isso o artigo a seguir é uma identificação de geossítios com possíveis valores relevantes a serem alvos de trabalhos mais profundos. O trabalho publicado pode ser acessado em: <https://revistas.uepg.br/index.php/tp/article/view/17157/209209214476>.

## THE PALEONTOLOGICAL HERITAGE OF NORTHERN TOCANTINS STATE AND SOUTHWEST MARANHÃO STATE, BRAZIL: A PRELIMINARY SYNTHESIS

**Abstract:** This paper aims to present a preliminary synthesis of the Paleontological Heritage of northern Tocantins State and southwest Maranhão State. It is a compound mainly from Paleozoic and Mesozoic rocks of the intracratonic Parnaíba Basin. Fossils from these regions include body fossils of sharks, gymnosperm trunks, mineralized ferns, ichnofossils of sauropods and theropods, and indeterminate leaf molds.

**Keywords:** Geodiversity, Parnaíba Basin, fossiliferous survey.

### INTRODUCTION

The Paleontological Heritage of northern Tocantins State and southwest Maranhão State, Brazil, is mostly comprised of paleobiological records preserved in rocks that originated in the intracratonic Parnaíba Sedimentary Basin during the Paleozoic and Mesozoic eras (Alves, 2010). The fossiliferous outcrops from this region are present in rocks from the geological formations Motuca (Permian), Pedra de Fogo (Permian), Sambaíba (Triassic), Corda (Cretaceous), and Codó (Cretaceous).

The fossils found in these geological units consist of body fossils of sharks, gymnosperm trunks, mineralized ferns, ichnofossils of sauropods and theropods, and indeterminate leaf molds (Santos; Carvalho, 2009; Assis *et al.*, 2010; Kauffmann *et al.*, 2013; De Valais *et al.*, 2015).

Recently, researchers of the Universidade Federal de Goiás have been conducting fieldworks at potential prospective areas to recover, inventory, map, and describe the paleobiological diversity of the region as, despite its importance, most of the previously known fossil records do not have, to date, descriptive nor systematic studies on them.

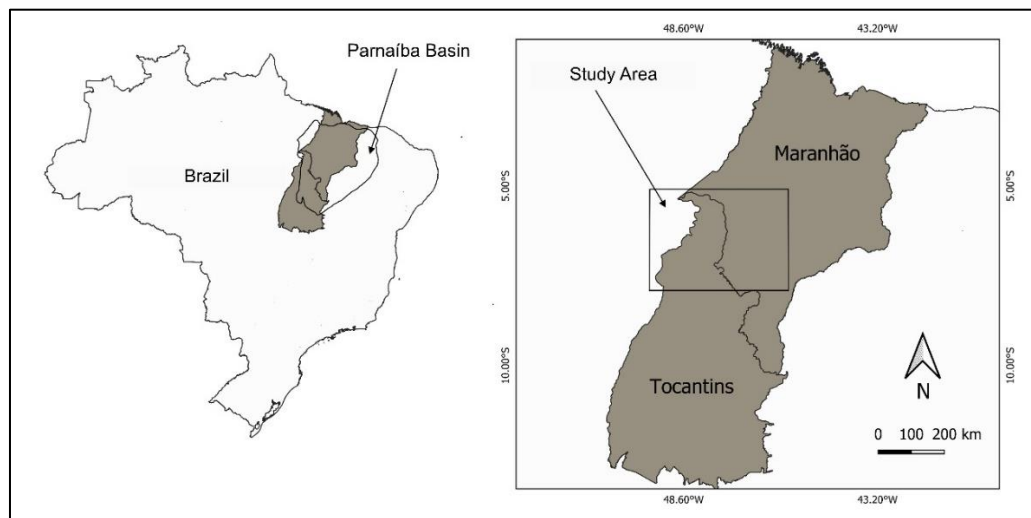
The region under study is located in the northwest region of the intracratonic Parnaíba Sedimentary Basin, in North Tocantins State and Southwest Maranhão State, covering an area of approximately 82,000 km<sup>2</sup>. The present work aims to inventory the paleontological heritage of this region based on data obtained from the geological and paleontological literature and fieldwork findings.

## GEOLOGICAL CONTEXT

### Parnaíba Basin

The intracratonic Parnaíba Basin comprises an area of 600,000 km<sup>2</sup> in the north and northeast regions of Brazil which comprises the states of Tocantins, Pará, Maranhão, Piauí, Ceará, and Bahia (Fig. 1). During the Paleozoic Era, the sedimentation process covered much of the Brazilian territory, including this geological unit, as well as a portion of the Taoudeni Basin, in Africa (Aguiar, 1971; Góes; Feijó, 1994).

**Figure 1** - Parnaíba Sedimentary Basin and the study area.



**Author:** Raylon da Frota Lopes. **Source:** IBGE (2018), GEOSGB (2018).

The outset of the depositional system of this basin and other Brazilian intracratonic basins – such as the Solimões, Amazonas, and Paraná basins – occurred by the end of the Ordovician, after the Brazilian-Pan-African thermo-tectonic cycle (Cunha, 1986, Caputo *et al.*, 2005). The stratigraphic understanding of the Parnaíba Basin was given by the studies performed on its outcrops and published mainly in the last decades, together with the technical works performed by the publicly-held company Petrobras (Aguiar, 1971; Góes; Feijó, 1994; Vaz *et al.*, 2007).

### Motuca Formation

This geological unit was described by Plummer *et al.* (1948) to assign the reddish shales with calcareous and anhydrite lenses that outcrops at Motuca Farm, between the

municipalities of São Domingos and Benedito Leite (MA). Melo and Prade (1968) suggested subdividing this formation into three members: the Lower Member is mainly consisted of fine to very fine reddish sandstones; the Middle Member is formed by intercalated siltstones with carbonate banks usually succeeded by thicker layers of gypsum and/or anhydrite, and the Upper Member is predominantly composed of very fine sandstones to red siltstones.

The paleoenvironment of the Motuca Formation is understood as shallow lake and continental sabkha, under several sedimentation conditions (fluvial, lacustrine, and aeolian) and episodes of marine transgression at the middle portion of the section with gypsum deposition (Lima; Leite, 1978).

### **Pedra de Fogo Formation**

The Pedra de Fogo Formation was formalized by Plummer *et al.* (1948) and outcrops especially at the central region of the Parnaíba Basin, along an extensive area of approximately 600 km in the east-west direction of the states of Piauí, Maranhão, and the north-center Tocantins.

This unit occurs on the surface with an average thickness of 100 m and is lithologically subdivided into three members: Basal Quartzite, Middle, and Upper or “Trisidela”. The Basal Quartzite member consists of fine sandstones, siltstones, and shales interspersed with dolomitic banks and siliceous concretions. The Middle member mostly presents sandstone sequences with cross-stratification overlapped by fine-grained sediments (siltstones and shales), with the upper layers composed of carbonate banks associated with silica concretions (Faria Jr; Truckendrodt, 1980).

The Upper member (or “Trisidela”) is mainly present at the central and west areas of the basin and is composed of carbonate laminates of shale, chert strata, sandstone and siltstone deposits, and fossil plants (Plummer *et al.*, 1948; Faria Jr, 1979; Faria Jr; Truckendrodt, 1980).

The paleoenvironment of this formation is interpreted as shallow marine and coastal with sabkha plains, under the occasional influence of storms (Góes; Feijó, 1994). Depositional cycles can be identified in the succession of layers of this unit (Aguiar, 1971).

## **Sambaíba Formation**

The Sambaíba Formation was first described by Plummer *et al.* (1948) to characterize the sandstones that form the plateaus observed in the municipality homonymous to this formation. This unit is represented by sandstones with large planar and cross-channel stratifications (Aguiar, 1971).

These large cross-stratification sandstones containing several typical features of aeolian sediments characterize a desert system with fluvial contribution (Vaz *et al.*, 2007). The upper contact of the Sambaíba Formation occurs with the Lower Jurassic basaltic spills of the Mosquito Formation (Góes; Feijó, 1994). This unit was historically considered as non-fossiliferous because its sedimentation environment shows the occurrence of intense desertification in the mega continent Pangea during the Triassic. Nevertheless, ichnofossils from theropod vertebrates were already reported in this locality (Santos; Carvalho, 2009; Assis *et al.*, 2010).

## **Corda Formation**

The Corda Formation outcrops in the central portion of the Parnaíba Basin. The lithology of this unit consists of very fine or fine to medium sandstones that are red, reddish-brown, white, or purple to gray in color and rich in iron oxide and zeolites (Aguiar, 1971). The predominant sedimentary structures in the Corda Formation are large-sized, grain-flow bundles with cross-channel stratification intercalated by layers with plane-parallel stratification. These structures are interpreted as aeolian dune and interdune deposits (Aguiar, 1971).

The sedimentation process of this unit was attributed to a desert environment with dry, hot, fluvial climatic conditions of high energy in its interior, deposited in the distal portion of a braided river system. In this context, it can be said that the preservation of fossils was a rare event (Santos; Carvalho, 2009).

## **Codó Formation**

The Codó Formation comprises a sequence of shales, limestones, and intercalated evaporates that cover an area of about 170,000 km<sup>2</sup> in the Maranhão State. Its sediments are

horizontally and sub-horizontally arranged with a maximum thickness of about 180m (Fernandes; Dela Piazza, 1978).

The unit is stratigraphically divided into two sedimentary sections. The lower one is composed of bituminous black shales progressing to limestones and evaporates, and the upper one, consists of intercalated pelites and sandstones of dark red and greenish color, and whitish to grayish limestones (Lindoso; Carvalho, 2014).

The deposits of the Codó Formation are attributed to depositional environments predominantly lacustrine, taking into account the physiological characteristics with mastery of lithologies formed by suspension and the absence of marine fossils (Ramos *et al.*, 2006).

## **MATERIAL AND METHODS**

### **Material**

Cartographic databases and vector and matrix data from the Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) and the Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) were used to map the region using the software Qgis 3.14 to edit and analyze the georeferenced data. The fossil content illustrated or cited here are housed *in situ* or in the following institutions: Laboratório de Paleontologia e Evolução (Labpaleoevo) of the Universidade Federal de Goiás, Aparecida de Goiânia *Campus*; Laboratório de Paleobiologia (LBPbiol) of the Universidade Federal do Tocantins, Porto Nacional *Campus*.

### **Methods**

This study used the following methodological steps: (1) bibliographic survey on the theme and area under study; (2) fieldwork in one of the study areas to describe the outcrops and evaluate the condition of the paleontological and geological occurrences; (3) gathering and interpretation of data based on the analysis of the information collected from both literature and fieldwork; (4) elaboration of maps based on the data obtained in the previous steps.

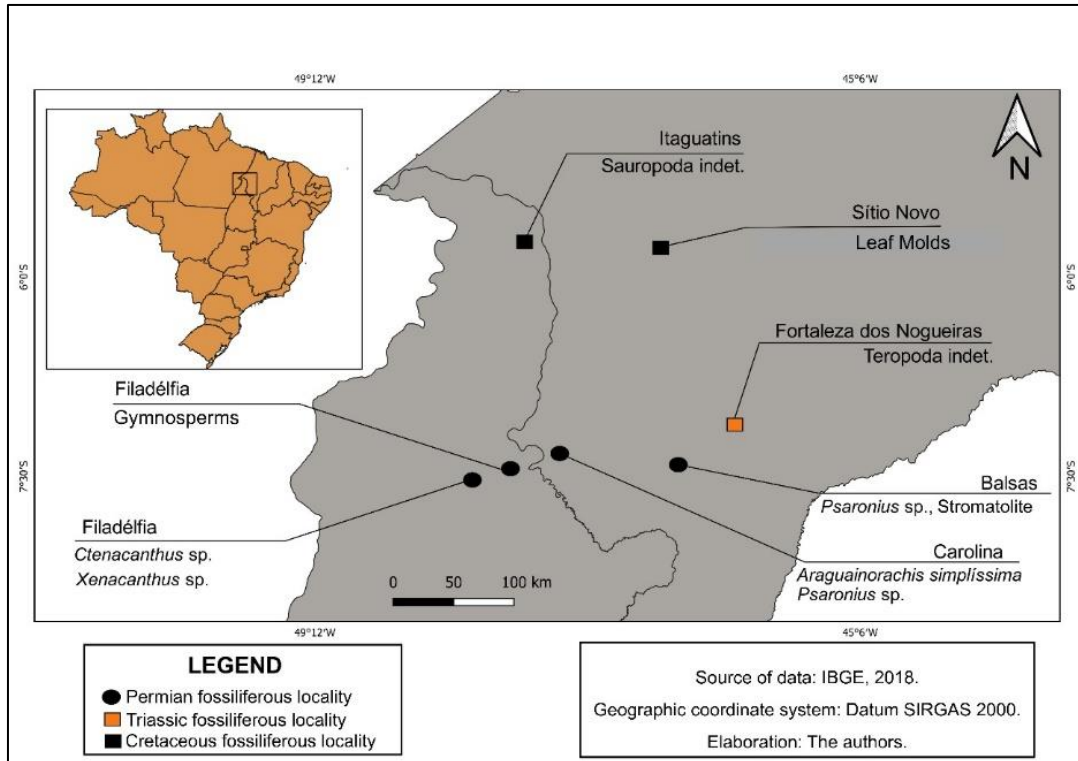
## **RESULTS AND DISCUSSION**

Overall, the Paleontological Heritage from the studied area comprises a set of seven outcrops of discontinuous ages, ranging from the Permian to the Cretaceous. Among these

outcrops, three are located in the Tocantins State and four are in the Maranhão State.

The fossils found in the rocks that outcrops in this region are records of sharks, gymnosperm trunks, and fossil ferns. There are also ichnofossils (footprint trails) of sauropod and theropod dinosaurs and indeterminate leaf molds (Fig. 2) (Santos; Carvalho, 2009; Assis *et al.*, 2010; Kauffmann *et al.*, 2013; De Valais *et al.*, 2015).

**Figure 2** - Paleontological Heritage of the Northern Tocantins and Southwestern Maranhão.



**Author:** Raylon da Frota Lopes.

## Localities

### 1- Filadélfia (Tocantins State).

**Locality 1:** Filadélfia municipality (TO), southwest of the town downtown. The geosites are part of the environmental conservation unit *Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins* (MONAFT).

**Coordinates:** 7°17'45'' and 7°38'34'' S; 47°35'17'' and 48°01'05'' W.

**Stratigraphic level:** Motuca Formation.

**Age:** Upper Permian (Lopingian).

**Fossil record:** Gymnosperms and fossilized ferns (Fig. 3).

**Reference:** Dias-Brito *et al.* (2009).

### 2- Filadélfia (Tocantins State)

**Locality 2:** Filadélfia municipality (TO), 67 km southeast of the town downtown, following

the road to the municipality of Araguaína.

**Coordinates:** 07°28'S, 47°56' W.

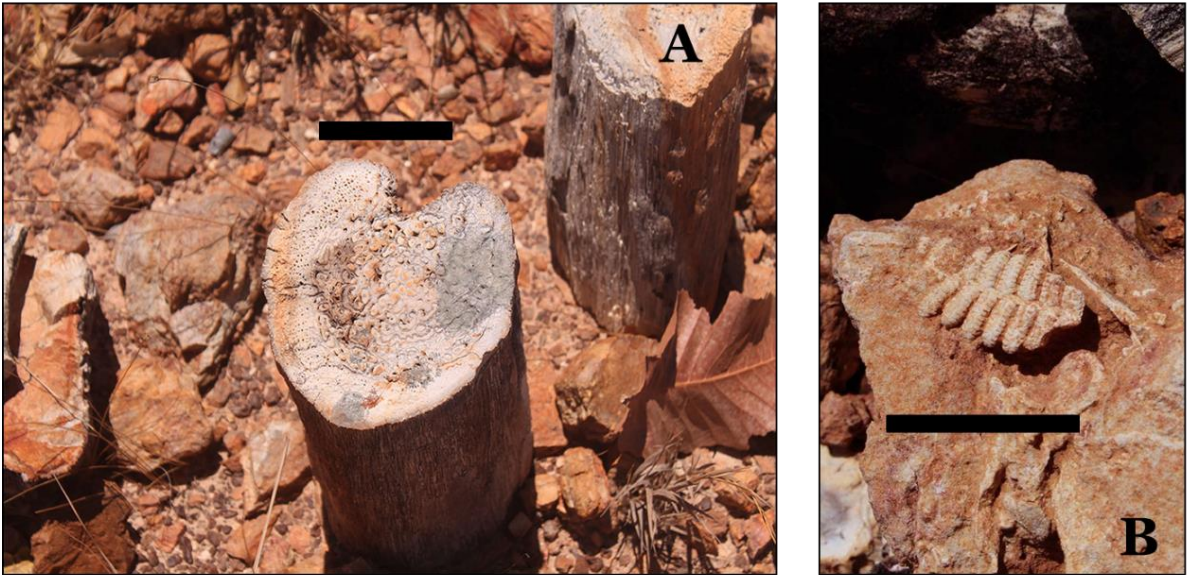
**Stratigraphic level:** Pedra de Fogo Formation, Trisidela Member.

**Age:** Middle Permian (Kungurian).

**Fossil record:** fin spines of *Ctenacanthus* (Fig. 4); *Xenacanthus* teeth.

**Reference:** Alves (2010).

Figure 3 - Permian phytofossils from Filadélfia, TO. A: fossilized gymnosperm trunk (scale= 12cm); B: fossilized fern leaf (scale= 10 cm).



**Photo:** Carlos Eller.

### 3- Carolina (Maranhão State)

**Locality 3:** Morro do Corró, 3 km south of the municipality of Carolina (MA), Carolina-Riachão highway.

**Coordinates:** 7°19.800' S, 47°27.600' W.

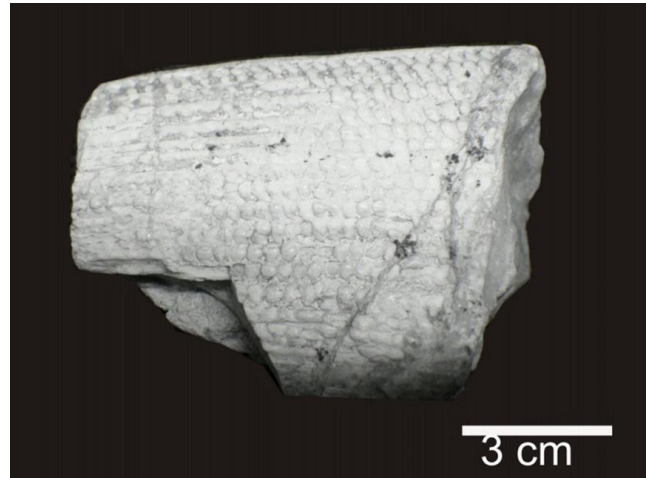
**Stratigraphic level:** Motuca Formation.

**Age:** Upper Permian (Lopingian).

**Fossil record:** *Araguainorachis simplissima*, *Psaronius* sp.

**Reference:** Santos & Carvalho (2009).

**Figure 4** - The distal portion of fin spine of *Ctenacanthus* sp., Pedra de Fogo Formation.



Source: Alves (2010).

#### 4- Balsas (Maranhão State)

**Locality 4:** Testa Branca farm, 15 km east of the Balsas (MA) municipality downtown.

**Coordinates:** 07°23' S, 46°31' W.

**Stratigraphic level:** Motuca Formation.

**Age:** Upper Permian (Lopingian).

**Fossil record:** *Psaronius* sp., stromatolites.

**Reference:** Santos e Carvalho (2009).

#### 5- Fortaleza dos Nogueiras (Maranhão State)

**Localidade 5:** banks of the Lajes stream, Fortaleza dos Nogueiras municipality(MA).

**Coordinates:** 7°05'24" S, 46°05'22" W.

**Stratigraphic level:** Sambaíba Formation.

**Age:** Triassic.

**Fossil record:** indeterminate Theropoda footprint trails (Fig. 5).

**Reference:** Assis *et al.* (2010).

#### 6- Itaguatins (Tocantins State)

**Locality 7:** São Domingos village (TO), 5 km north of the municipality downtown.

**Coordinates:** 5°42'58" S, 47°29'48" W.

**Stratigraphic level:** Corda Formation.

**Age:** Cretaceous (Barremian).

**Fossil record:** footprints of indeterminate Sauropoda (Fig. 6).

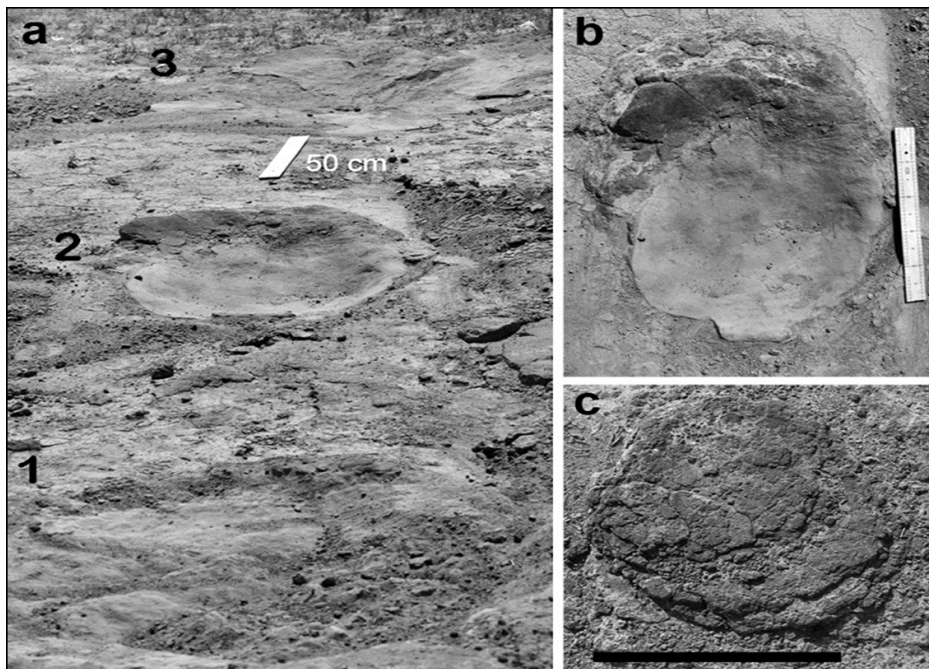
**Reference:** Leonardi (1994), de De Valais *et al.* (2015).

**Figure 5** - Footprint of an indeterminate Theropoda in Fortaleza dos Nogueiras (MA). Scale= 5cm.



Source: Assis *et al.* (2010).

**Figure 6** - Sauropoda footprints from the Cretaceous of Itaguatins (TO). A trail with three footprints where the closest one (a) is covered by modern sediments; (b) and (c) are moderately preserved footprints. Scale= 50 cm.



Source: De Valais *et al.* (2015).

### 7- Sítio Novo (Maranhão State)

**Locality 6:** Sítio Novo municipality (MA), 15 km north of the municipality downtown, at the road to Amarante do Maranhão municipality.

**Coordinates:** 05°45' S, 46°39' W.

**Stratigraphic level:** Codó Formation.

**Age:** Cretaceous (Aptian-Albian).

**Fossil record:** Indeterminate leaf molds.

**Reference:** Lima e Leite (1978); Santos e Carvalho (2009).

The fossil outcrops in the studied area are known to the scientific community since the middle of the last century, but few works have been carried out with the paleontological heritage of this region. This is mainly explained by the fragmentary nature of most specimens, which makes detailed description impossible. The results presented here show the paleontological richness of an area that is still little explored but has significant and diverse paleobiological records.

The Permian fossil-bearing outcrops in the Filadélfia municipality (TO), and in the municipalities of Carolina and Balsas (MA), are from the Lopingian to the Kungurian. The records from this geological stage include both animals and plants. The plant fossils are distributed in two distinct areas, one in the municipality of Filadélfia (TO) and the other in the municipality of Carolina (MA). Animal fossils are only present in one area in the municipality of Filadélfia.

In Filadélfia, the fossil plant record comprises gymnosperm trunks and fern leaves from the Motuca Formation rocks. The identified taxa are *Botryopteris nollii*, *Dadoxylon* sp., *Grammatopteris freitasii*, *Pecopteris* sp., *Psaronius* sp., and *Tietea* sp. (Tab. 1). The paleobiological record richness of this region, which is one of the largest fossilized forests in the world, has led to the creation of a protected area managed by the State government for the preservation of the paleontological heritage and scientific and educational purposes.

In the Carolina municipality (MA) the presence of fossil plants is characterized by *Araguainorachis simplíssima* and *Psaronius* sp., discovered in a rural area nearby the BR-230 road. This finding, in addition to the records from Filadélfia, shows the paleobiological richness of the studied area.

Table 1: Fossils of the studied area and their respective taxa, locations, and geological units.

Taxa	Locality	Geological Unit	Age	Reference selected
<i>Botryopteris nollii</i> <i>Dadoxylon</i> sp. <i>Grammatopteris freitasii</i> <i>Pecopteris</i> sp. <i>Psaronius</i> sp. <i>Tietea</i> sp.	Filadélfia, TO	Motuca Formation	Permian (Lopingian)	Dias-Brito <i>et al.</i> (2009)
<i>Xenacanthus</i> sp. <i>Ctenacanthus</i> sp.	Filadélfia, TO	Pedra de Fogo Formation, Trisidela Member	Permian (Kungurian)	Santos and Carvalho (2009) Alves (2010)
<i>Araguainorachis simplíssima</i> <i>Psaronius</i> sp.	Carolina, MA	Motuca Formation	Permian (Lopingian)	Santos and Carvalho (2009)

<i>Psaronius</i> sp. Stromatolites	Balsas, MA	Motuca Formation	Permian (Lopingian)	Santos and Carvalho (2009)
Teropoda indet.	Fortaleza dos Nogueiras, MA	Sambaíba Formation	Triassic	Assis <i>et al.</i> (2010)
Sauropoda indet.	Itaguatins, TO	Corda Formation	Cretaceous (Barremian)	Leonardi (1994) De Valais <i>et al.</i> (2015).
Plantae indet.	Sítio Novo, MA	Codó Formation	Cretaceous (Aptiano- Albiano)	Lima and Leite (1978) Santos and Carvalho (2009)

The paleontological record of Balsas (MA) is represented by *Psaronius* sp. and stromatolites from the Motuca Formation. These fossils were found at a farm 15 km east of the municipality. The preservation of both fossil types in the same area can be explained by the marine transgression that occurred during the sedimentation event of the Motuca Formation. This event led to the fossil preservation of this plant typical of dry environments and of stromatolites that are usually formed in shallow-sea environments. The Permian animal fossils from the studied area are represented by fins of *Ctenacanthus* sp., and teeth of *Xenacanthus* sp., found nearby the TO-222 road. According to Alves (2010), these findings are similar to the specimens found in the Permian of Kansas (USA). However, they were described at a very inclusive taxonomic level, and further studies are still needed to understand these relationships.

The Triassic record in the studied area is represented by indeterminate Theropoda ichnofossils found at the Fortaleza dos Nogueiras municipality (MA). This finding comprises footprints from the Sambaíba Formation rocks described by Assis *et al.* (2010). Some authors (e.g. Plummer, 1946; Lima; Leite, 1978; Caputo, 1984; Vaz *et al.*, 2007; Santos; Carvalho, 2009; Abrantes-Júnior; Nogueira, 2013) consider this geological unit as non-fossiliferous. Thus, the advent of this finding reveals the need for studies about the stratigraphic positioning of the ichnofossils or even a better understanding of the palaeoenvironment and sedimentation process of this unit.

The Cretaceous fossil materials include indeterminate leaf molds from the Codó Formation, Sítio Novo municipality (MA), and ichnofossils represented by footprint trails of indeterminate Sauropoda found in the Corda Formation, Itaguatins municipality (TO).

The indeterminate leaf molds are mentioned by Lima and Leite (1978) and by Santos and Carvalho (2009), but there is no additional information or description other than the site

locality. The indeterminate Sauropoda footprint trails were first reported by Leonardi (1980) and later described by De Valais *et al.* (2015). This finding consists of footprint trails assigned to a Diplodocoidea that has taxonomic similarities with taxa described in Africa. However, we believe that further studies on these taxa are crucial to allow more accurate inferences.

## FINAL CONSIDERATIONS

The geological formations described here correspond to units with few known fossil records. Until now, the only known fossil records from the Corda and Sambaíba formations are the ones reported here. The paleontological heritage of the studied area is of great value as it comprises the ages from the last stages of the supercontinent Gondwana to the initial phase of separation, in addition to having potential educational and touristic importance. Further researches are still needed for a better taxonomic understanding of the taxa mentioned here to increase the paleobiogeography and paleogeography knowledge of the studied area. Most fossiliferous outcrops mentioned in this work have a high degree of deterioration, which puts at risk the existence of these paleobiological records. In addition to works on systematic description, it is also necessary to perform geoconservationist studies on the paleontological heritage inventoried here to measure their values quantitatively and, thus, conceive appropriate geoconservation strategies for each geosite.

## ACKNOWLEDGMENTS

To Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) for funding doctoral research by Raylon Lopes.

## REFERENCES

- AGUIAR, G. A. Revisão Geológica da bacia Paleozóica do Maranhão. In: Congresso Brasileiro De Geologia, 25, 1971, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 1971. v. 3, p. 113-122.
- ALVES, Y.M. Report on the Upper Permian and Lower Cretaceous fossiliferous localities vertebrates-bearing in the centralnorth of Tocantins State, Brazil. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, Uberlândia, v. 1, n. 2, p. 372-386. 2010.
- ASSIS, F. P.; MACAMBIRA, J. B.; LEONARDI, G. Dinossauros terópodes do Ribeirão das Lajes, primeiro Registro fóssil da Formação Sambaíba (Neotriássico-EoJurássico), Bacia do Parnaíba: Fortaleza dos Nogueiras, Maranhão-Brasil. In: 45° Congresso Brasileiro de Geologia. **Anais...** Belém – PA. Sociedade Brasileira de Geologia, p. 1720,

2010. Disponível em: [http://sbg.sitepessoal.com/anais\\_digitalizados/2010-BEL%C3%89M/2010-BEL%C3%89M.zip](http://sbg.sitepessoal.com/anais_digitalizados/2010-BEL%C3%89M/2010-BEL%C3%89M.zip). Acesso em: 29 ago. 2020.

CAPUTO, M. V.; IANNUZZI, R.; FONSECA, V. M. M. Bacias sedimentares Brasileiras: Bacia do Parnaíba. Aracajú-SE: **Informativo da Fundação Paleontológica Phoenix**, n. 81, p. 1-6, 2005.

CUNHA, F. M. B. **Evolução paleozóica da Bacia do Parnaíba e seu arcabouço tectônico**. 1986, p. 107. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1986. Available in <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/anigeo/article/view/1626>

DE VALAIS, S.; CANDEIRO, C. R.; TAVARES, L. F.; ALVES, Y. M.; CRUVINEL, C. Current situation of the ichnological locality of São Domingos from the Corda Formation (Lower Cretaceous), northern Tocantins State, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 61, p. 142-146, 2015.

DIAS-BRITO, D.; ROHN, R.; CASTRO, J.C.; DIAS, R.R.; RÖBLER, R. Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional: O mais exuberante e importante registro florístico tropical-subtropical permiano no Hemisfério Sul. In: WINGE, M.; SCHOBENHAUS, C.; BERBERT-BORN, M.; QUEIROZ, E.T.; CAMPOS, D.A.; SOUZA, C.R.G.; FERNANDES, A.C.S. (eds.), **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. Brasília: CPRM, 2009. Disponível em: <https://sigep.eco.br/sitio104/sitio104.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2019.

FARIA JR, L. E. C. **Estudo sedimentológico da Formação Pedra de Fogo – Permiano – Bacia do Maranhão**. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1979. Available in <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/8387>.

FARIA JR, L. E. C.; TRUCKENBRODT, W. Estratigrafia e petrografia da Formação Pedra de Fogo – Permiano da Bacia do Maranhão. In: SBG, **Anais... 31º Congresso Brasileiro de Geologia**, Balneário Camboriú. v. 2, p. 740-754, 1980. Available in [http://sbg.sitepessoal.com/anais\\_digitalizados/1980-CAMBORIU/1980-CAMBORIU.zip](http://sbg.sitepessoal.com/anais_digitalizados/1980-CAMBORIU/1980-CAMBORIU.zip)

FERNANDES, G.; DELLA PIAZZA, H. O potencial oleogenético da Formação Codó. **BoI. Tecn. Petrobrás**. 21 (1): 3-16. 1978.

GEOSGB. Dados, informações e produtos do Serviço Geológico do Brasil. **Unidades Geológicas**. Rio de Janeiro: CRPM. 2018. Available in <https://geoportail.cprm.gov.br/geosgb/>.

GÓES, A. M. O.; FEIJÓ, F. J. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 8, p. 57-67, 1994. Disponível em <https://bgp.petrobras.com.br/bgp/article/view/581>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malhas Territoriais 2018**. Rio de Janeiro. 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?edicao=24048&t=downloads>.

KAUFFMANN, M.; RICARDI-BRANCO, F.; FABBRIN, E. P. O.; BENÍCIO, W. J.; JASPER, A. Resultados preliminares do resgate de fitofósseis no Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins, Bacia do Parnaíba, Tocantins, Brasil. *Revista Geonomos* - Vol. 21, n. 2. 10.18285/geonomos.v21i2.271. p. 46–52, 2013.

- LEONARDI, G. Ornithischian trackways of the Corda Formation (Jurassic) Goiás, Brazil. **Anais...** In: Abstract of Congreso Latinoamericano de Paleontología, Buenos Aires, Argentina, 1. pp. 215-222. 1980. Available in: [https://www.researchgate.net/publication/309763045\\_Ornithischian\\_trackways\\_of\\_the\\_Corda\\_Formation\\_Jurassic\\_Goias\\_Brazil](https://www.researchgate.net/publication/309763045_Ornithischian_trackways_of_the_Corda_Formation_Jurassic_Goias_Brazil).
- LEONARDI, G. **Annotated atlas of South America Tetrapod Footprints (Devonian to Holocene)**. CPRM, 1994.
- LIMA, E. A. M.; LEITE, J. F. **Projeto estudo global dos recursos Minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba**. Integração geológico-metalogenética, Relatório Final da Etapa III. Recife – PE: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1978.
- LINDOSO, R.M.; CARVALHO, I.S. Paleoambientes e paleoclima durante o Aptiano na Bacia do Parnaíba (Formação Codó), Nordeste do Brasil. In: CARVALHO, I.S. (Org.). **Paleontologia: cenários da vida**. Rio de Janeiro: Interciência. v. 4. p. 165-173. 2014.
- MELO, M. T., PRADÉ, G. O. **Geologia da região Sudeste de São Raimundo das Mangabeiras – Maranhão**. Belém: PETROBRÁS, DIREX/RENOR. Relatório 297. 1968.
- PLUMMER, F. B.; PRICE, L. I.; GOMES, F. A. Estados do Maranhão e Piauí. In: **Brasil, Conselho Nacional de Petróleo, relatório de 1946**. Rio de Janeiro, p. 87-134, 1948.
- RAMOS, M. I. F.; ROSSETI, D. F.; PAZ, J. D. S. Caracterização e significado Paleambiental da Fauna de Ostracodes da Formação Codó (Neoaptiano), Leste da Bacia de Grajaú, MA, Brasil. **Rev. bras. paleontol.**, v. 9, n. 3, p. 339-348, 2006.
- SANTOS, M. E. C. M.; CARVALHO, M. S. S. **Paleontologia das bacias do Parnaíba, São Luís e Grajaú**: Reconstituições paleobiológicas. CPRM, Rio de Janeiro – RJ, v. 1, 212 p, 2009.
- VAZ, P. T.; REZENDE, N. G. A.; WANDERLEY FILHO, J. R.; TRAVASSOS, W. A. S. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, 15: 253-263. 2007. Disponível em <https://bgp.petrobras.com.br/bgp/article/view/308>.

## **5 PEGADAS TRIDÁCTILAS DE DINOSSAUROS DO TRIÁSSICO DA FORMAÇÃO SAMBAÍBA NO NORTE DO BRASIL**

O capítulo a seguir, intitulado “Tridactyl dinosaur footprints from the Triassic Sambaíba Formation of northern Brazil”, objetivou descrever e propor interpretações sobre a descoberta de pegadas de dinossauros terópodes na Formação Sambaíba, que aflora na Bacia Sedimentar do Parnaíba.

Conforme o manuscrito, as pegadas tridáctilas reportadas para a Formação Sambaíba representam um registro inesperado para a região, considerando-se as interpretações dos ambientes de sedimentação nessa unidade geológica, entendida como não favorável à conservação fóssil. Os afloramentos contendo vestígios de atividades de tetrápodes nessa área apresentam o menor nível de conhecimento até o momento, em comparação com outros locais estudados nesta pesquisa.

Deste modo, foi essencial a este estudo o aprofundamento da compreensão sobre a natureza dos icnofósseis registrados na Formação Sambaíba. Nesta seção, procurou-se alcançar o objetivo específico de pesquisa “b”, respondendo parcialmente à questão-problema: “em que consiste o patrimônio paleontológico originário do Paleozoico e Mesozoico da região norte do estado do Tocantins e sudoeste do estado do Maranhão?”.

No inventário do patrimônio paleontológico da área em estudo, capítulo cinco, o sítio com pegadas de terópodes é chamado por Assis *et al.* (2010) de geossítio Ribeirão das Lajes. No entanto, para melhor identificação e associação direta com a área específica onde as pegadas foram descobertas, propomos renomeá-lo como geossítio Fazenda Malhada Vermelha. A nova nomenclatura busca refletir a localização exata e facilitar a referência nos contextos científicos e de conservação.

O artigo foi publicado no periódico *Journal of South American Earth Sciences*, Qualis Capes A2, com fator de impacto 1.8, e pode ser acesso em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0895981124002554>.

## TRIDACTYL DINOSAUR FOOTPRINTS FROM THE TRIASSIC SAMBAÍBA FORMATION OF NORTHERN BRAZIL

### Abstract

Some new tridactyl footprints have been recorded in the Malhada Vermelha farm locality, municipality of Fortaleza dos Nogueiras, state of Maranhão, northern Brazil, from the Sambaíba Formation, Parnaíba Sedimentary Basin. The specimens are fifteen isolated, in situ, mesaxonic tridactyl tracks preserved in six sandstone slabs as concave epireliefs. Abundant MISS evidence is preserved on the track-bearing blocks. The footprints are referred to as *Grallator* isp., linking them with an theropodian origin. The footprint-bearing levels were accumulated in shallow environments influenced by a tidal flat. The occurrence and interpretation of these findings bring a new approach to sedimentary subenvironments in the Sambaíba Formation.

**Keywords:** *Grallator* isp., MISS evidence, Late Triassic, Sambaíba Formation, Parnaíba Basin, Brazil.

### INTRODUCTION

The record of theropod dinosaur tracks from Triassic of Brazil, such as those from Rio Grande do Sul state, is scarce, unlike the diverse ichnological record from Argentina (e.g., Leonardi, 1994; Melchor; De Valais, 2006). The Triassic track record from South America, in fluvial-lacustrine deposits, are from the Caturrita and Guará formations in the state of Rio Grande do Sul state in Brazil (Schultz *et al.*, 2003; Dentzien-Dias *et al.*, 2005; Dias; Schultz, 2005; Dentzien-Dias; Bertoni-Machado, 2005; Scherer; Lavina, 2005; Silva *et al.*, 2008, 2012), and the Chañares, Ischichuca, Ischigualasto, Portezuelo, and Los Rastros formations of Argentina (e.g., Leonardi, 1994; Melchor; De Valais, 2006, and references in both contributions).

In the southwest region of the Maranhão state, Legal Amazon region of Brazil (formal geographic area), Fortaleza dos Nogueiras municipality, rocks from the Sambaíba Formation (Balsas Group) lack fossil tetrapod bone remains. However, abundant footprints attributed to theropods have been mentioned for this formation (Assis *et al.*, 2010). Taking into account the stratigraphical relationship with the overlying and underlying formations, a Triassic age is suggested for this unit (Plummer *et al.*, 1948; Caputo, 1984; Abrantes-Júnior; Nogueira, 2013).

In 2022, at least fifteen new footprints were found in slab sandstones from the Sambaíba Formation, at Malhada Vermelha farm, at 22 km southeast of Fortaleza dos Nogueiras town, Maranhão State, Brazil. The aim of this contribution is to describe, analyze, and interpret these tridactyl footprints from the southwest of the state of Maranhão, from an ichnotaxonomical and

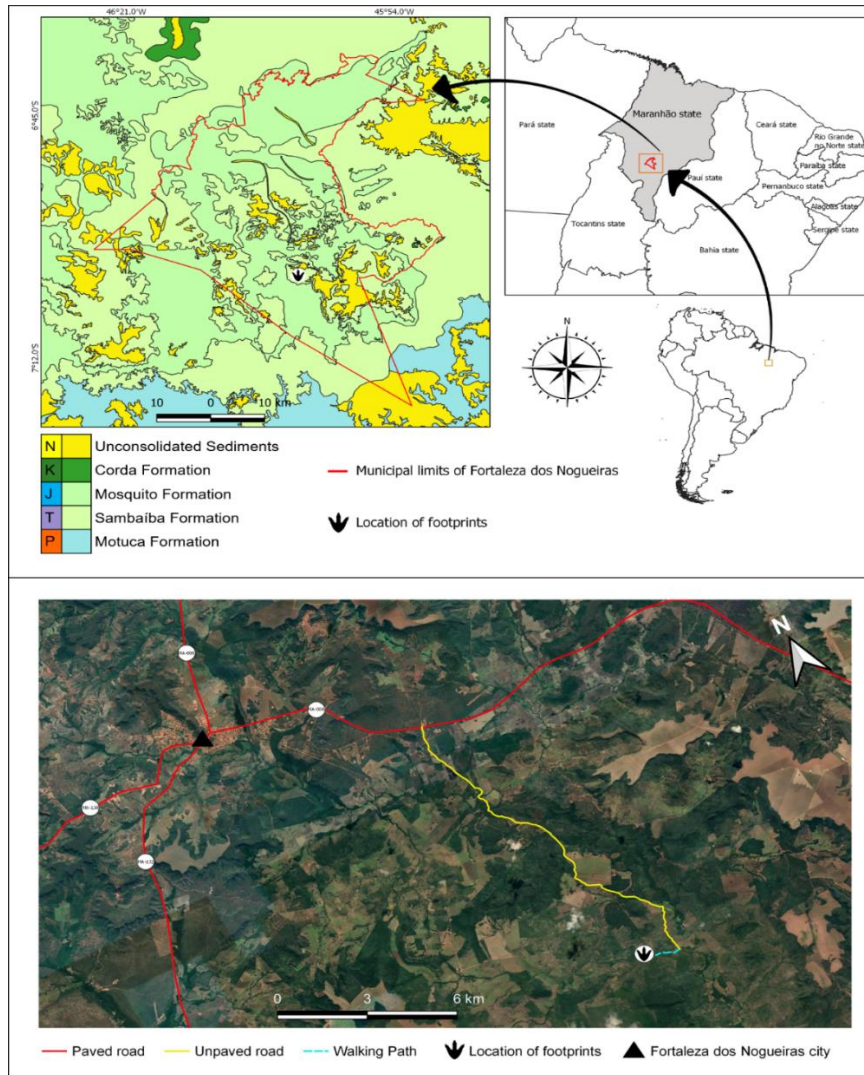
paleobiological point of view, taking into account the taphonomical and preservational processes.

## **MATERIAL AND METHODS**

The specimens are at least fifteen tracks preserved as negative epirelief in six footprint-bearing slabs from Malhada Vermelha farm locality, in the municipality of Fortaleza dos Nogueiras, at southwest of the state of Maranhão, Brazil (fig. 1). The slabs are both still in situ and slightly displaced from the original site, on the bed of the Lajes stream, 22 km from the Fortaleza dos Nogueiras town. They were assigned the following field numbers: FN1a#1 to FN1a#4, FN1b#1, FN2#1, FN3#1, FN4#1 to FN4#7, and FN5#1 (it means Fortaleza dos Nogueiras, block number, “a” and “b” are each part of a previously unique block, # is accompanied by track number).

The footprints were measured and photographed in situ. The photographs were taken under natural light conditions, and the footprint and trackway parameters follow mainly the convention of Leonardi (1987). Terminology about preservation of tracks follows Marty *et al.* (2009), while the characteristics and definitions about microbially induced sedimentary structures (MISS) follows Noffke (2010) and Noffke, Hagadorn and Bartlett (2019). The assignment of the identity of trackmaker follows the conventions by Thulborn (1990), Farlow and Chapman (1997), Moreno *et al.* (2012), and Abrahams *et al.* (2022).

**Figure 1** - Locality maps of the ichnofossil outcrop. (A) A simplified geological map of the area. (B) A simplified map of the area near Fortaleza dos Nogueiras town, showing the ichnosites



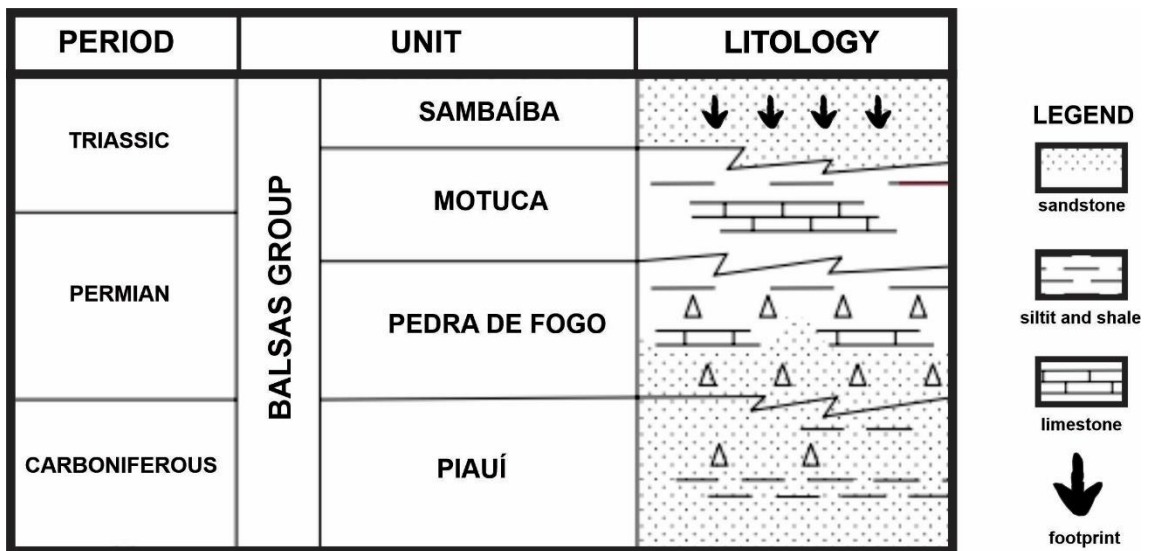
**Author:** Raylon da Frota Lopes. **Source:** Modified from Vaz *et al.* 2007; Assis *et al.* 2010; maps derived from combining data from Google Earth image.

## GEOLOGICAL SETTING

The Fortaleza dos Nogueiras municipality is approximately 710 km southwest from the Maranhão state capital, São Luís. In this area, the exposed sedimentary rocks correspond mainly to the Triassic Sambaíba Formation (Balsas Group, Parnaíba Basin) (Plummer *et al.*, 1948; Caputo, 1984; Góes; Feijó, 1994; Caputo *et al.*, 2005; Vaz *et al.*, 2007; Assis *et al.*, 2010; Abrantes-Júnior and Nogueira, 2013) (fig. 1). This unit is represented by sandstones with large planar and cross-channel stratification (Aguiar, 1971). These large cross-stratification sandstones containing several typical features of aeolian sediments characterize a desert system with fluvial contribution (Vaz *et al.*, 2007). However, that formation has recorded some of the best-preserved Triassic dinosaur footprints linked to Theropoda from Brazil (Assis *et al.*, 2010).

The Sambaíba Formation overlaps the sandstones of the Permian Motuca Formation (Balsas Group), which represents a significant episode of aridity of the Paranaíba Basin (Goés, 1990, 1994) (fig. 1). At the Malhada Vermelha farm locality, near the surroundings of Fortaleza dos Nogueiras Town, there are outcrops with icnofossiliferous slabs composed of sandstone facies (fig. 2). We produced and correlated vertical profiles that allowed us to interpret the paleoenvironment as a sand sheet and dune field deposits characterized by cream-orange sandstones with plane-parallel stratification and medium to large cross-bedding (Abrantes-Júnior; Nogueira, 2013).

**Figure 2** - Generalized stratigraphic column of the Balsas Group (Paranaíba Basin)



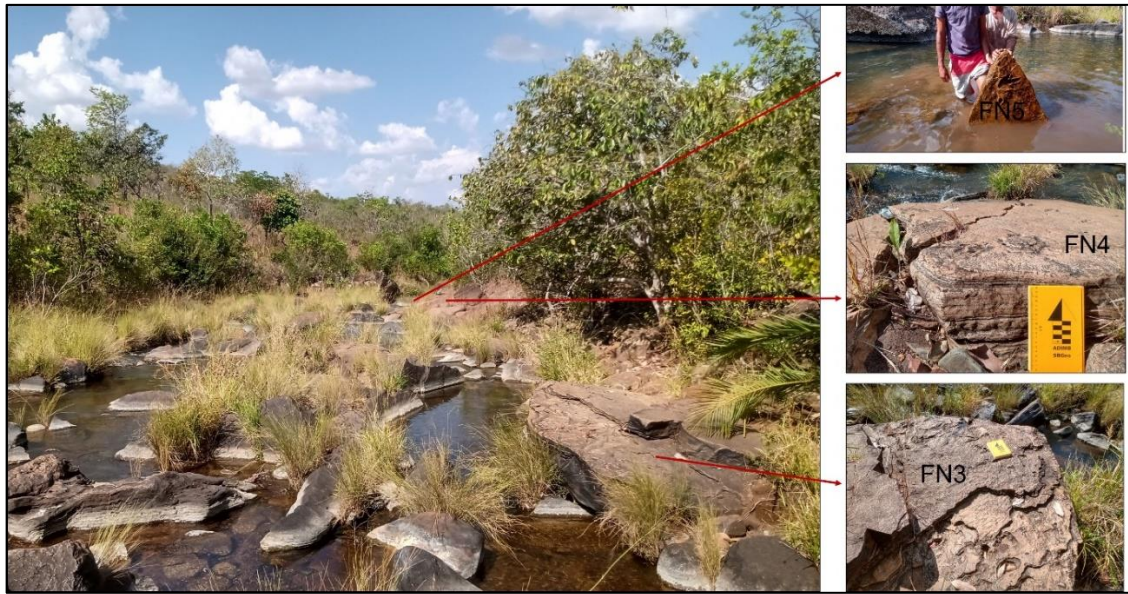
Source: Adapted from Góes *et al.* (1994).

## RESULTS

### Vertebrate tracks: formation and preservation

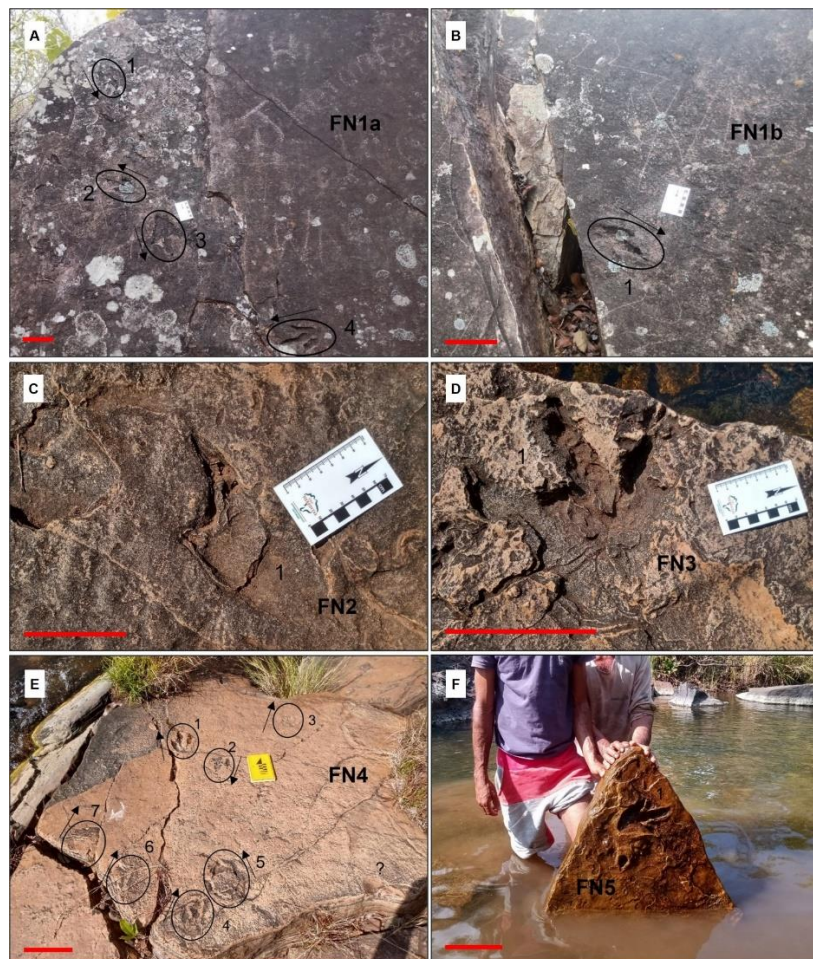
The studied footprints are preserved as negative epichnia in the surface of six pinky sandstone slabs or blocks, some of them moved from their original place (fig. 3). All of tracks are apparently isolated and not disposed in trackways. Physical weathering, caused mainly by river stream water, has affected and eroded most of the surfaces. Some of the tracks are very poorly preserved or distorted, mostly the footprints named as FN2#1 and FN4#3 to #7. The rest of the specimens have good to excellent preservation [FN1a#1 to #4, FN1b#1, FN3#1, FN4#1 and #2, and FN5#1 (fig. 4)].

**Figure 3** - Panoramic view of the stream with the location of blocks FN3, FN4 and FN5 (moved surface).



Photos: Raylon da Frota Lopes.

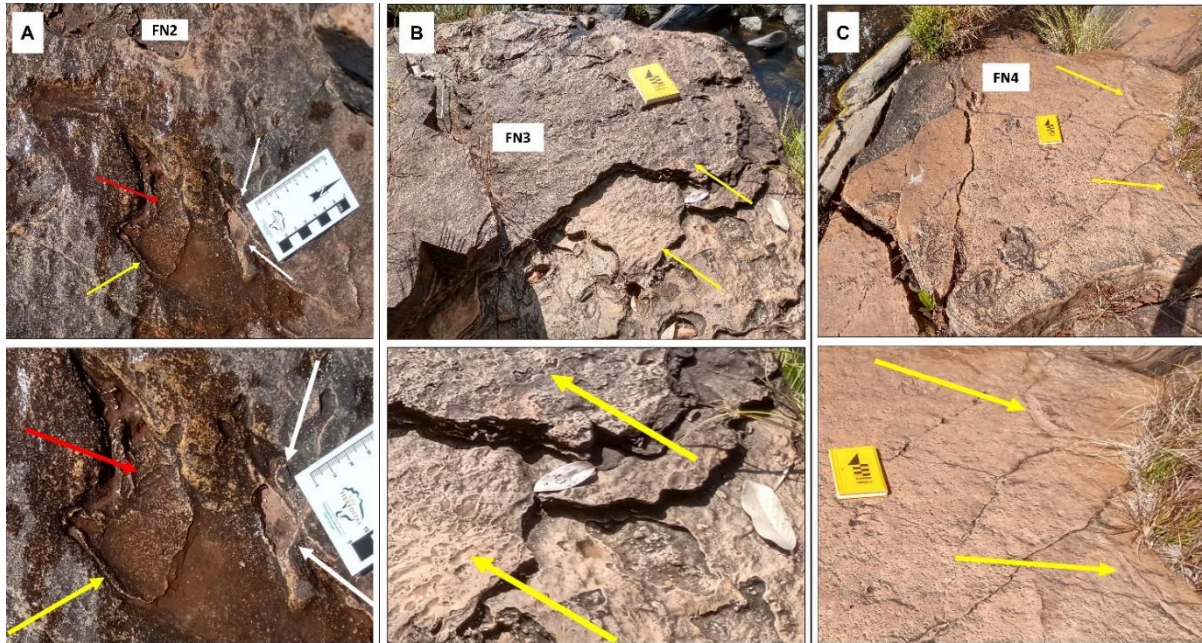
**Figure 4** - Sandstone slabs and theropod dinosaur footprints located at Malhada Vermelha farm, Fortaleza dos Nogueiras, Maranhão, Brazil. Some footprints, e.g. (E) FN4#3, #4, #5, #6 and #7, are difficult to distinguish due to preservation factors. The circles highlight footprints and the arrows represent the direction of the print. (?) It was inconclusive to say that they are impressions. Scale bar in (A), (B), (C), (D), (E) and (F): 15 cm.



Photos: Raylon da Frota Lopes.

All the track-bearing surfaces in the slabs or blocks have abundant evidence of MISS, such as wrinkle structures, textured surfaces, microbial mat chips, patches with different colors, fragments of mats slipped into the tracks and flipped over mats (fig. 5A-B). Some linear structures are interpreted as the basis of eroded microbial mat folds (fig. 5C). When visible, the lateral view of the blocks is composed of alternated laminations of different colors such as heterolite (fig. 6). The occurrence of symmetrical ripples was noticed at the same stratigraphic level as the footprints.

**Figure 5** - Evidence of MISS in the tracks bearing-blocks. In general, all slabs have wrinkle structures. (A) Block FN2: white arrows: a small microbial mat chip and surface altered by MISS. Red arrow: fragment of microbial mat inside a track. Yellow arrow: folded edges. (B) sandstone surfaces with evidence of microbial mats or textured surfaces. Arrows indicate deformations in the sediment caused by the presence of microbiota. (C) The arrows point to eroded tuft folds (the bases of the fold are visible, although the fold itself is not there because it has been eroded). Scale: geological field book (18 cm) and scale card (7 cm).



**Photos:** Raylon da Frota Lopes.

Block FN1 is divided into two almost in contact sub-blocks, FN1a and FN1b (fig. 4A, 4B). The slab FN1a bears four complete tridactyl footprints. All of them have a good to excellent preservation, with well-defined edges, even showing detailed claw traces, and no sedimentary rims around the tracks. The block FN1b has a well-preserved left footprint in an irregular surface, with a slightly rim around almost the whole track. The medial edge of the digit II imprint is not clearly defined.

**Figure 6** - Different colors of the laminations of the Sambaíba Sandstone that outcrops in the study area. Image saturation increased by 100% for better visualization of coloring changes.



**Photo:** Raylon da Frota Lopes.

Both FN2 and FN3 have an isolated, poorly preserved, quite distorted, indeterminate track. The low preservation quality makes it confusing to delineate the exact contour of the tracks (figs. 4C, 4D, 5A and 5B). The pressure of the trackmaker autopodium on the tracking surface at the beginning of the step cycle broke the microbial mat, forming a fragment reflecting a similar foot shape, moved and retained inside the print. The fragment has wrinkled structures and folded edges due to mat contraction.

The FN4 block contains seven footprints. Two of them (FN4#1 and #2) are moderate to well preserved, with the digit impressions clearly defined. The other five impressions (FN4#3 to #7) are completely distorted, with only two almost complete footprints (FN4#3 and #4) (figs. 4E, 5C). FN4#3 is a probably right shallow footprint, with no clear details. The FN4#4 and #5 specimens are composed of the fragment of microbial mat almost entirely covering the depression left by the trackmaker foot, which has sedimentary rim and wrinkles structure around it. The rest of the specimens are partial depressions due to be located on the broken edge of the block.

The FN5 slab (fig. 4F) has a single, deep, moderately preserved, possible left footprint. The whole contour of the track has a slender rim formed by the broken edges of the microbial mat, in addition to displacement of sediment at tip of imprint of digit III.

### Vertebrate tracks: description and ichnotaxonomy

Although fifteen isolated in situ footprints were found in six sandstone slabs, only nine well-preserved specimens were considered in this analysis, namely: FN1a#1, #2, #3, #4, FN1b#1, FN3#1, FN4#1 and #2, and FN5#1. Since no hand prints were found, we suggest a bipedal posture for the producers.

The footprints are mesaxonic, slightly longer than wide, ranging from 12 cm to 18 cm long and 7 cm to 11 cm wide, with average of 14,6 cm and 8.8 cm respectively (Table 1). The length/width ratio is 1.6. The posterior margin of the sole is formed by the fourth phalangeal pad trace of digit IV.

**Table 1** - Measurements of the specimens. Footprint length (FL), footprint width (FW), footprint length/footprint width ratio (FL/FW), digit length (LII, LIII, LIV), not determined (nd). Linear measurements in centimeters.

Track	FL	FW	FL/FW	LII	LIII	LIV
FN1a#1	13	8.5	1.5	6	9.1	5.7
FN1a#2	13.2	7	1.8	5.5	8.8	5.2
FN1a#3	18	9.2	1.9	8.3	12.6	7.9
FN1a#4	18	11	1.6	8.1	13	7.7
FN1b#1	15.4	8	1.9	6.5	10.2	6
FN2#1	Nd	nd	nd	nd	nd	nd
FN3#1	14.1	9.1	1.5	6	10	7
FN4#1	16.3	9.4	1.7	7.2	11.5	6.6
FN4#2	13.1	9	1.4	6.5	9.4	5.7
FN4#3	Nd	9	nd	nd	nd	nd
FN4#4	15.5	10	1.5	7.3	11	6.5
FN4#5	12.7	7.1	1.7	6.1	8.4	nd
FN4#6	12	nd	nd	5.4	nd	nd
FN4#7	Nd	9	nd	nd	nd	nd
FN5#1	15	8.7	1.7	7.2	11	7

**Author:** Raylon da Frota Lopes

The impressions of digits display average lengths of 6.6 cm (II), 10.4 cm (III), and 6.4 cm (IV). The average angles formed by them are II-IV 75°. Interdigital divergence between the imprints of the digits III and II and between III and IV is in both cases about 35°. Digit impressions are of similar width, about 2.5 cm in average, with clear digital pad traces. No hallux impression is preserved.

When present, the claw imprints are sharp and triangular, especially that of digit III, which is noticeably more developed than the others and exhibits a curvature towards the center

of the stride. The claw traces of digit II and IV are medially and laterally directed, respectively. The tracks FN1a#4, FN3#1 and FN4#1 corresponded to right footprints, whereas FN1b#1 and FN5#1 were left footprints. The other footprints considered into this analysis could not be accurately stated due to preservation conditions.

## DISCUSSION

### About the ichnofossils

These tridactyl footprints are added to the 71 previous fossil track attributed to theropods from a near area to Malhada Vermelha farm from the Sambaíba Formation (Assis *et al.*, 2009). The general features of the tracks presented herein (i.e. tridactyl, digitigrade, with digit impressions relatively slender, sharp and triangular claw traces bipedal) allow to assign them also to Theropoda.

Many time, dinosaur tracks are recorded in a particular spatial arrangement, displaying for instance, social or survival strategies (e.g. Currie; Eberth, 2010; Heredia *et al.*, 2020). The tracks studied here are not arranged in trackways nor are densely overprint in the same surface. This suggests that the individuals were not engaging in repetitive or gregarious behaviors, such as utilizing a migratory route or walking along an edge of a body of water such as a lake or lagoon.

Triassic tridactyl footprints related to dinosaurs are relatively common; however, their ichnotaxonomic identification and attribution to taxonomic groups generate controversies due to the still incipient diversification of this group during this period (Silva *et al.*, 2008; Falkingham *et al.*, 2016). Regarding morphology, the footprints record suggests that the producers were usually small, with some few exception of more robust individuals. As bone record indicates, the Triassic theropods were mostly small, with the clade diversifying into larger taxonomic groups in the Jurassic-Cretaceous transition (Hendrickx *et al.*, 2015).

Tridactyl footprints of the Late Triassic and Early Jurassic are documented in several outcrops from South America. The occurrence of them is reported in various ichnological sites, namely: in the Santa Maria, Guara, and Caturrita formations (Brazil); Chanares, Ischichuca, Ischigualasto, Portezuelo, and Los Rastros formations (Argentina) (Leonardi, 1994; Melchor; De Valais, 2006; Silva *et al.*, 2008).

Respect to ichnotaxonomy aspects, generally, tridactyl footprints are grouped into three main ichnogenera, *Anchisauripus*, *Eubrontes*, and *Grallator*, based on their shape, length and number of digit impressions, interdigital angles, and the presence or absence of claw traces

(Olsen; Smith; McDonald, 1998). Based on this distinction, taking into account that the size of a trace is not considered as an ichnotaxobases (e.g., Bertling *et al.*, 2006), the footprints from Malhada Vermelha farm are considered to belong to *Grallator*. However, the quality of preservation, the scarce morphological data from the specimens, and the lack of uniformity of criteria to establish the *Grallator* ichnospecies (Olsen; Smith; McDonald, 1998; Lockley, 2000), preclude any definite ichnotaxonomical assignment, defined these tracks as *Grallator* isp.

Silva *et al.* (2008) reported the occurrence of small-sized theropod footprints in the Santa Maria Formation (Ladinian-Carnian) in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. The footprints were described as *Grallator* and shared a considerable degree of morphological similarity with those described here; however, they exhibit a low degree of preservation, rendering the data uncertain for making further correlations.

### **About the paleoenvironment**

Several authors (Plummer, 1946; Lima; Leite, 1978; Caputo, 1984; Vaz *et al.*, 2007; Abrantes-Júnior; Nogueira, 2013) consider the sediments of the Sambaíba Formation represent aeolian environment with some fluvial contribution, deposited under desert conditions. This interpretation is supported by the evolution of the Parnaíba Basin during the Permian-Triassic transition from a shallow-marine clastic/evaporitic complex to a lacustrine/fluvio-desertic environment (Abrantes-Júnior; Nogueira, 2013). This intensified desertification during the Triassic could be due to the influence of continental conditions on the newly formed Gondwana and the Alleghenian Orogeny (Abrantes-Júnior, 2013). This orogenic activity led to uplift in the northern portion of South America, which, combined with various other factors, including complex climatic events, played a fundamental role in the progressive desertification of the region where the basin was situated during that period (Glennie; Buller, 1983; Zalán, 1991; Abrantes-Júnior, 2013). However, all these authors conducted their studies at small cartographic scales, using regional data (approximately 1:500.000 or 1:250.000). Assis *et al.* (2009) argue that when the analysis descends to a cartographic detail of 1:25.000, the Permian-Triassic transition in the Parnaíba Basin is characterized by the presence of coastal to shallow-marine sedimentary subenvironments, with incursions of tidal flats.

The analysis of the Sambaíba Sandstone outcropping at Malhada Vermelha farm suggests the occurrence of marine incursions during the Late Triassic and Early Jurassic. The presence of symmetrical ripples at the footprint-bearing level suggests a paleoenvironment with the presence of shallow-water laminations with subaerial exposure of the still loose sediment.

The occurrence of MISS in the sediment supports this interpretation, as microbial mats occur in shallow-water environments (Gerdes, 2010; Noffke, 2010; Bayet-Goll; Daraei, 2020).

## CONCLUSION

Fossilized footprints record an instantaneous moment in time, this way this product reflects the pedal morphology of a tetrapod where its behavior and the substrate conditions of this activity can be inferred. As a result, these types of tracks can also help to deduce trends in paleodiversity, pedal morphology, and paleoenvironments. In this article we evaluate fifteen tridactyl footprints attributed to *Grallator* reported for the first time from the Late Triassic of northern Brazil from the Sambaíba Formation (Parnaíba Basin). This ichnogenus has a wide geographic and temporal distribution for the Late Triassic of Gondwana (mainly in Africa and South America), so the record of this taxon for the area studied here is expected. The combination of traces of footprints, evidence of microbially, and ripple marks with marine influence indicates deposition on the banks of a shallow coastal area. This fact brings new contributions to interpretations about the sedimentation of the Sambaíba Formation and in the Parnaíba Basin during the late Triassic and early Jurassic. New studies should be conducted to assign the footprints at a less inclusive ichnotaxonomic level and bring new data and inferences about the humid sedimentation subenvironment in the studied geological unit.

## Acknowledgements

We address our sincere thanks to Luiz Carneiro, Malhada Vermelha farm owner, who gave his agreements for paleontological fieldwork during summer 2022. We thank Raimundo Rodrigues and Tadeu Dias Candeiro for information about the tracksite location, besides Raimundo Rodrigues for his help during the fieldwork. We also thank the Federal University of Goiás and Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel for funding the fieldwork.

## REFERENCES

- ABRAHAMS, M.; BORDY, E.M.; KNOLL, F.; FARLOW, J.O. Theropod Tridactyl Tracks Across the Triassic–Jurassic Boundary in Southern Africa: Implications for Pedal Morphology Evolution. **Frontiers in Ecology and Evolution**, vol. 10, p. 925313, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.925313>.
- ABRANTES, F. R. J.; NOGUEIRA, A. C. R.. Reconstituição paleoambiental das formações Motuca e Sambaíba, Permo-Triássico da Bacia do Parnaíba no sudoeste do Estado do

Maranhão, Brasil. **Geologia USP. Série Científica**, São Paulo, v. 13, n. 3, p. 65-82, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X201300030007>.

ABRANTES, F.R.J. **A zona de contato entre as formações Motuca e Sambaíba, Permo-Triássico da Bacia do Parnaíba, região de Filadélfia (TO), Riachão (MA) e Loreto (MA)**. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2013. Available in <https://www.repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/6361>.

AGUIAR, G. A. Revisão Geológica da bacia Paleozóica do Maranhão. In: Congresso Brasileiro De Geologia, 25, 1971, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 1971. v. 3, p. 113-122.

ASSIS, F. P.; MACAMBIRA, J. B.; LEONARDI, G. Dinossauros terópodes do Ribeirão das Lajes, primeiro Registro fóssil da Formação Sambaíba (Neotriássico-Eojurássico), Bacia do Parnaíba: Fortaleza dos Nogueiras, Maranhão-Brasil. In: 45° Congresso Brasileiro de Geologia. **Anais...** Belém – PA. Sociedade Brasileira de Geologia, p. 1720, 2010. Disponível em: [http://sbg.sitepessoal.com/anais\\_digitalizados/2010-BEL%C3%89M/2010-BEL%C3%89M.zip](http://sbg.sitepessoal.com/anais_digitalizados/2010-BEL%C3%89M/2010-BEL%C3%89M.zip). Acesso em: 29 ago. 2020.

BAYET-GOLL, A.; DARAIEI, M. Palaeoecological, sedimentological and stratigraphical insights into microbially induced sedimentary structures of the lower Cambrian successions of Iran. **Sedimentology**, v. 67, n. 6, p. 3199–3235, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/sed.12745>.

BERTLING, M., BRADDY, S., BROMLEY, R. G., DEMATHIEU, G.R., GENISE, JF., MIKULÁŠ, R., NIELSEN, J.K., NIELSEN, K.S.S., RINDSBERG, A.K., SCHLIRF, M., UCHMAN, A.. Names for trace fossils: a uniform approach. **Lethaia**, 39: 265-286. 2006.

CAPUTO, M.V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of Northern Basins of Brazil**. 1984. 583p. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade da Califórnia, Santa Barbara, EUA. 1984. Disponível em: [https://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/8961/6/Tese\\_StratigraphyTectonicsPaleoclimatology.pdf](https://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/8961/6/Tese_StratigraphyTectonicsPaleoclimatology.pdf).

CAPUTO, M. V.; IANNUZZI, R.; FONSECA, V. M. M. Bacias sedimentares Brasileiras: Bacia do Parnaíba. Aracaju-SE: **Informativo da Fundação Paleontológica Phoenix**, n. 81, p. 1-6, 2005.

CURRIE, P. J.; EBERTH, D. A. On gregarious behavior in *Albertosaurus*. **Can. J. Earth Sci.** 47 (9), 1277–1289. 2010. <https://doi.org/10.1139/E10-072>.

DENTZIEN-DIAS, P.C.; BERTONI-MACHADO, C. New discovers of dinosaurs footprints from Late Jurassic(?) Guará Formation, Southern Brazil. In: **Resúmenes**. XXI Jornadas Argentinas de Paleontología de Vertebrados, vol. 1, p. 15, 2005.

DENTZIEN-DIAS, P.C.; SCHULTZ, C.L.S.; SCHERER, C.M.S.; LAVINA, E.L.C. The fossil record from Guará Formation (Upper Jurassic), Southern Brazil. In: **Anais do II Congresso Latino-Americano de Paleontología de Vertebrados**, p. 93, 2005.

DIAS, P.C.D.; SCHULTZ, C.L.S. Estimated speeds of Dinosaurs trackways from Guará formation, Rio Grande do Sul, Brazil. **Paleontologia em Destaque**, n. 20, p. 38-39, 2005.

FALKINGHAM, P.L.; MARTY, D.; RICHTER, M. (eds): **Dinosaur Tracks: the Next Steps**.

Indiana University Press, 2016.

FARLOW, J.O.; CHAPMAN, R.E. The scientific study of dinosaur footprints. In: Farlow, J.O.; Brett-Surman, M.K. (eds.), **The Complete Dinosaur**, p. 519–553. Indiana University Press, Bloomington, 1997.

GERDES, G. What are microbial mats? In: Seckbach J, Oren A (eds) **Microbial mats: modern and ancient microorganisms in stratified systems**. Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology. Springer, v. 14, pp. 5–25, 2010.

GLENNIE, K. W.; BULLER, A.T. The Permian Weissliegendes of N.W. Europe: the partial deformation of aeolian dune sand caused by the Zechstein transgression. **Sedimentary Geology**, 35(1), 43-81. 1983. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(83\)90069-6](https://doi.org/10.1016/0037-0738(83)90069-6).

GÓES, A.M.O.; FEIJÓ, F.J. **Bacia do Parnaíba**. Boletim de Geociências da Petrobrás, 8, 57-67. 1994. Disponível em <https://bgp.petrobras.com.br/bgp/article/view/581>.

HENDRICKX, C.; HARTMAN, S. A.; MATEUS, O. An overview of non-avian theropod discoveries and classification. **PalArch's Journal of Vertebrate Palaeontology**, v. 12, p. 1–73, 2015.

HEREDIA, A. M.; DÍAZ-MARTÍNEZ, I., PAZOS, P. J., COMERIO, M., FERNÁNDEZ, D. E. Gregarious behaviour among non-avian theropods inferred from trackways: A case study from the Cretaceous (Cenomanian) Candeleros Formation of Patagonia, Argentina. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 538: 109480. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.109480>

LEONARDI, G. **Glossary and Manual of Tetrapod Footprint Palaeoichnology**. DNPM, Brazil. 117p. 1987.

LEONARDI, G. **Annotated atlas of South America Tetrapod Footprints (Devonian to Holocene)**. CPRM, 1994.

LOCKLEY, M. G. An emended description of the theropod footprint *Bueckeburgichnus maximus* Kuhn, 1958, and its bearing on the megalosaur tracks debate. **Ichnos**, 7: 217-225. 2000.

MARTY, D.; STRASSER, A.; MEYER, C. A.. Formation and Taphonomy of Human Footprints in Microbial Mats of Present-Day Tidal-flat Environments: Implications for the Study of Fossil Footprints, **Ichnos**, 16:1-2, 127-142. 2009.

MELCHOR, R.N.; DE VALAIS, S. A review of Triassic tetrapod track assemblages from Argentina. **Palaeontology**, 49(2), 355-379. 2006.

MORENO, K.; DE VALAIS, S.; BLANCO, N.; TOMLINSON, A.J.; JACAY, J.; CALVO, J.O. Large theropod dinosaur footprint associations in western Gondwana: Behavioural and palaeogeographic implications. **Acta Palaeontologica Polonica** 57(1): 73–83. 2012.

NOFFKE, N. **Geobiology**. Microbial Mats in Sandy Deposits from the Archaean Era to Today. Springer, p.194. 2010.

- NOFFKE, N.; HAGADORN, J.; BARTLETT, S. Microbial structures and dinosaur trackways from a Cretaceous coastal environment (Dakota Group, Colorado, USA) - **Journal of Sedimentary Research**, 89: 1096–1108. 2019.
- OLSEN, P.E.; SMITH, J.B.; MCDONALD, N.G. Type material of the type species of the classic theropod footprint genera *Eubrontes*, *Anchisauripus*, and *Grallator* (Early Jurassic, Hartford and Deerfield Basins, Connecticut and Massachusetts, USA). **Journal of Vertebrate Paleontology**, 18: 586- 601. 1998.
- PLUMMER, F. B.; PRICE, L. I.; GOMES, F. A. Estados do Maranhão e Piauí. In: **Brasil, Conselho Nacional de Petróleo, relatório de 1946**. Rio de Janeiro, p. 87-134, 1948.
- SCHERER, C.M.S.; LAVINA, E.L.C. Sedimentary cycles and facies architecture of aeolianefluvial strata of the Upper Jurassic Guar´a Formation, Southern Brazil. **Sedimentology**, 52, 1323e1341. 2005.
- SCHULTZ, C.L., DIAS, P.C.D., SCHERER, C.M.S., LAVINA, E.L.C. Icnof´osses da Forma¸ão Guar´a (Jur´assico Superior?), Bacia do Paran´a, RS. In: Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Paleontologia, pp. 256e257. 2003.
- SILVA, R. C; CARVALHO, I. S.; FERNADES, A.C.S. Pegadas de dinossauros do Tri´assico (Forma¸ão Santa Maria) do Brasil. **Ameghiniana**, 45(4), 783-790. 2008.
- SILVA, R.C.; BARBONI, R.; DUTRA, T.; GODOY, M.M.; BINOTTO, R.B. Footprints of large theropod dinosaurs and implications on the age of Triassic biotas from Southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 39, 16-23. 2012.
- THULBORN, T. **Dinosaur Tracks**. 409 pp. Chapman and Hall, London. 1990.
- VAZ, P. T.; REZENDE, N. G. A.; WANDERLEY FILHO, J. R.; TRAVASSOS, W. A. S. Bacia do Parna´iba. **Boletim de Geociªncias da Petrobr´as**, 15: 253-263. 2007. Dispon´ivel em <https://bgp.petrobras.com.br/bgp/article/view/308>.
- ZAL´AN, P. V. Influence of Pr´e-Andean orogenies on the Paleozoic Intracratonic Basins of South Am´eric. **Anais ... IV Simposio Bolivariano - Exploracion Petrolera en las Cuencas Subandinas**, v. 1, n. 7. Bogot´a. 1991. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.115.008eng>.

## 6 CARACTERIZAÇÃO DOS GEOSSÍTIOS ESTUDADOS

Na presente pesquisa, a avaliação e proposição de ações de proteção e uso sustentável foram realizadas considerando apenas o geossítios. Não foram analisados elementos *ex situ*, esta abordagem buscou destacar os valores e a necessidade de proteção de sítios ainda pouco estudados, bem como demonstrar a sua relevância para o uso sustentável. Também não foram analisados locais cuja identificação não foi possível realizar devido a problemas de localização com base nas bibliografias utilizadas.

Os geossítios avaliados foram o Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins, em Filadélfia, Tocantins; o geossítio que contém pegadas de dinossauros terópodes em Fortaleza dos Nogueiras, Maranhão; e o geossítio que contém pegadas de dinossauros saurópodes em Itaguatins, também no estado do Tocantins.

### 6.1 MONUMENTO NATURAL DAS ÁRVORES FOSSILIZADAS DO TOCANTINS (MONAFT)

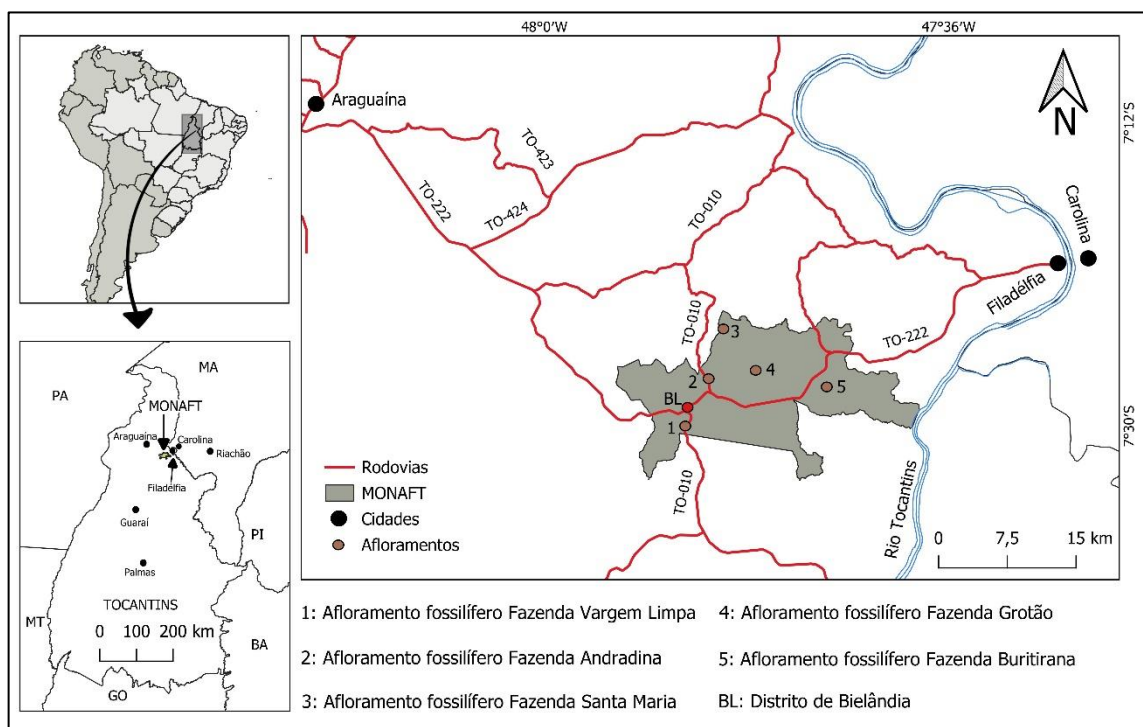
O Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins é uma unidade de conservação (UC) sob gestão estadual, mas sem desapropriação das terras particulares. O monumento se localizada no norte-nordeste do Tocantins, no município de Filadélfia, próximo à divisa com o Maranhão. Suas coordenadas são aproximadamente entre as latitudes 7°17'45'' e 7°38'34'' sul e as longitudes 47°35'17'' e 48°01'05'' oeste.

O trajeto até a região a partir da cidade de Araguaína é realizado pela rodovia TO-222, que perpassa grande parte da UC na orientação oeste-leste, na rota para Filadélfia. Outra rodovia regionalmente importante para acesso ao local é a rodovia TO-010, que atravessa o MONAFT na direção norte-sul. Essas autopistas juntamente com algumas estradas vicinais permitem acesso aos afloramentos da floresta fóssil denominada por Dias-Brito *et al.* (2009) de Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional.

O MONAFT é constituído por 32.067,10 ha (aproximadamente 320 km<sup>2</sup>) abrangendo um conjunto de paisagens compostas por áreas com atividades de pecuária, ocupação humana, e zonas do bioma Cerrado e suas fitofisionomias, na maioria Cerrado Rupestre e Cerrado Típico (*Stricto Senso*). A UC é caracterizada pela presença de fitofósseis que compreendem troncos de gimnospermas e folhas de samambaia constituídos por *Botryopteris nollii*, *Dadoxylon* sp., *Grammatopteris freitasii*, *Pecopteris* sp., *Psaronius* sp., *Tietea* sp. e *Buritiranopteris costata* entre os táxons registrados (Dias-Brito *et al.*, 2009; Tavares *et al.*, 2014).

As ocorrências afloram em sedimentos da Formação Motuca (Lopingiano) e podem ser observadas em diversos pontos da área protegida, mas se concentram essencialmente em cinco afloramentos principais. Esses afloramentos foram denominados por Dias-Brito *et al.* (2009) tendo como base as propriedades nas quais afloram, nomeadamente: Fazenda Andradina, Fazenda Buritirana, Fazenda Grotão, Fazenda Santa Maria, e Fazenda Vargem Limpa (Fig. 7). De acordo com as tipologias de geossítios propostas por Nascimento *et al.* (2021), o MONAF é categorizado como do tipo Área.

**Figura 7** - Localização do Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins (MONAFTO) e entorno.



Fonte: Modificado de Dias-Brito *et al.* (2009).

Como os elementos ocorrem no vasto território da área protegida e as paisagens, elementos e estrutura de acesso dos afloramentos mais significativos são semelhantes, optou-se por realizar, na quantificação, uma avaliação do MONAFT e não dos afloramentos individualmente, tendo em vista que os pontos de interesse possuem a mesma proteção e os desafios e potencialidades de gestão são compartilhados por todos, já que fazem parte da mesma área protegida.

## 6.2 GEOSSÍTIO FAZENDA MALHADA VERMELHA

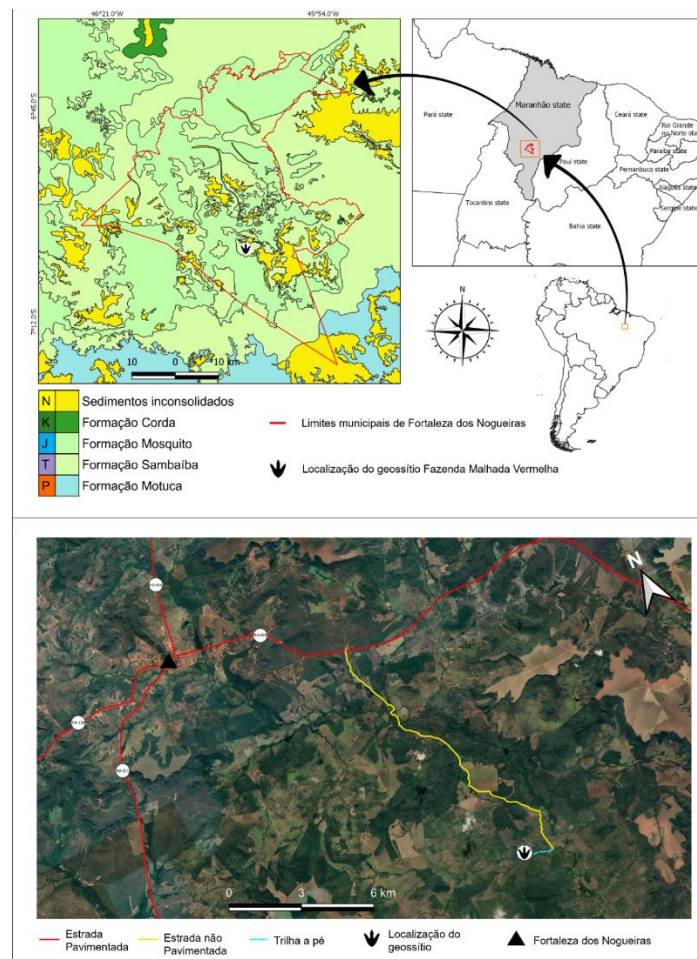
O geossítio Fazenda Malhada Vermelha se localiza a 22 km sudoeste da cidade de Fortaleza dos Nogueiras, no Maranhão, que por sua vez está a uma distância aproximada de

710 km da capital do estado do Maranhão, São Luís. Nesse geossítio, constituído por afloramentos da Formação Sambaíba (Triássico), há a ocorrência de pegadas tridáctilas, características de dinossauros terópodes carnívoros. Com base nas tipologias propostas por Nascimento *et al.* (2021), o geossítio se enquadra no tipo Área.

As pegadas registradas afloram continuamente por cerca de um quilômetro a montante, desde a desembocadura do ribeirão Lages no córrego Mosquito. Os icnofósseis são preservados como *epichnia* negativa na superfície de lajes e blocos de arenito, alguns deles movidos de seu local original. Ao todo são contabilizadas 86 impressões, 71 delas reportadas por Assis *et al.*, (2010) e 15 reportadas e descritas na presente pesquisa.

Para acessar à área onde as rochas portadoras das pegadas afloram é necessário realizar uma caminhada de cerca de 1 km (Fig. 8). Na região há a ocorrência de Cerrado denso e áreas de Cerrado ralo e mata seca. A localização do geossítio é 7°05'24" sul e 46°05'22" oeste. As pegadas são mesaxônicas, ligeiramente mais longas que largas, variando de 12 cm a 18 cm de comprimento e 7 cm a 11 cm de largura.

**Figura 8** – Localização do geossítio Fazenda Malhada Vermelha.



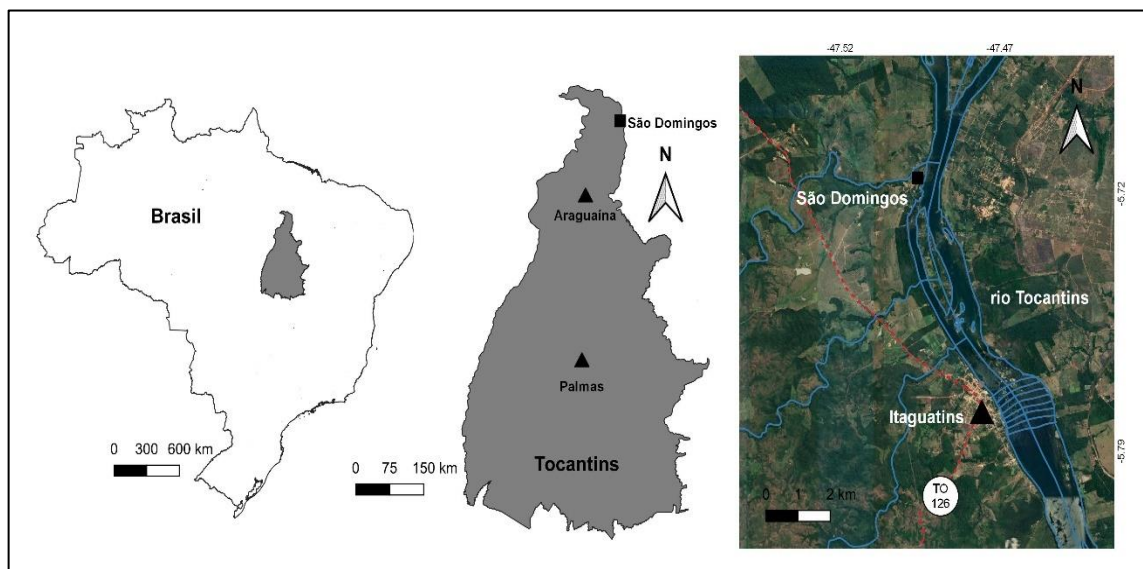
**Autor:** Raylon da Frota Lopes. **Fonte:** Modificado de Vaz *et al.* (2007); Assis *et al.* (2010); Google Earth.

Por se localizar às margens de um riacho, o geossítio é frequentado por moradores da região que buscam lazer e descontração. No entanto, essa visitação tem impactado negativamente a conservação dos principais elementos do afloramento. Banhistas costumam escrever seus nomes nas rochas, comprometendo sua integridade. Além disso, blocos soltos contendo impressões de pegadas correm o risco de serem levados pelos visitantes. Embora a área seja particular, há uma constante visitação sem permissão e supervisão, fato que gera problemas de preservação.

### 6.3 GEOSSÍTIO SÃO DOMINGOS

O geossítio São Domingos está localizado no distrito de mesmo nome, no município de Itaguatins, no extremo norte do estado de Tocantins, divisa com o estado do Maranhão. O afloramento situa-se a aproximadamente 10 quilômetros da sede do município (Fig. 9). Nesse geossítio há a ocorrência de pegadas fósseis do tipo *Parabrontopodus* (De Valais *et al.*, 2015; Lopes; Candeiro; De Valais, 2019), associadas a dinossauros saurópodes, encontradas em uma propriedade privada às margens do rio Tocantins, abrangendo uma área de cerca de 1,0 km<sup>2</sup>, em sedimentos da Formação Corda (Barremiano).

**Figura 9** - Localização do distrito de São Domingos, em Itaguatins, Tocantins.



**Autor:** Raylon da Frota Lopes. **Fonte:** IBGE (2018); Google Earth.

Os icnofósseis encontrados no geossítio são representados por pegadas subcirculares e algumas com sola subtriangular, possivelmente devido ao grau de desgaste. As impressões não possuem marcas de dígitos e garras e são relativamente mais compridas do que largas, variando

de 59 a 80 cm em largura e de 66 a 82 cm em comprimento. No total, constituem-se em 20 registros compostos por trilhas e pegadas isoladas (De Valais *et al.*, 2015).

O afloramento está situado a 0,5 quilômetros a nordeste da vila homônima, em uma zona de transição entre cerrado e a floresta amazônica. Para acessar o afloramento é necessário descer um pequeno talude até a planície de inundação do rio Tocantins, onde estão localizados os icnofósseis (Fig. 10). As coordenadas do afloramento são: latitude 5°42'58" sul e longitude 47°29'48" oeste. De acordo com as tipologias propostas por Nascimento *et al.* (2021), esse geossítio é classificado como do tipo Área.

As cheias normais da drenagem danificam a estrutura da rocha portadora dos icnofósseis. Um fator que se acrescenta é a alteração que ocorreu no regime da vazão de águas da drenagem com a entrada em operação da Usina Hidrelétrica de Estreito, localizada a 150 km a montante do geossítio.

**Figura 10** - Vista aérea do distrito rural de São Domingos e do geossítio homônimo.



**Fonte:** Google Earth.

A modificação do fluxo de água sobre o arenito tem provocado a aceleração da degradação deste importante geossítio, pois a força mecânica do escoamento das águas da drenagem que desce mais abruptamente após a construção da Hidrelétrica de Estreito vem ocasionando uma ação erosiva mais acentuada na rocha em que as pegadas estão inseridas. Próximo ao local de ocorrência dos icnofósseis há a criação de animais, que às vezes conseguem

atravessar a cerca que separa a área de pecuária da área do geossítio, este também é um fator que oferece grande risco à conservação desse patrimônio paleontológico.

## **7 AVALIAÇÃO E GEOCONSERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO PALEONTOLÓGICO DO NORTE DO ESTADO DO TOCANTINS E SUDOESTE DO ESTADO DO MARANHÃO, BRASIL: SUBSÍDIOS PARA O DESENVOLVIMENTO SOCIOECONÔMICO SUSTENTÁVEL**

O manuscrito a seguir corresponde à terceira e última etapa dos resultados de pesquisa. Nas etapas anteriores fez-se o levantamento das ocorrências fósseis registradas para a região. Dessas ocorrências, nem todos os registros foram avaliados quantitativamente, pois foram considerados apenas os geossítios, não sendo analisados elementos *ex situ*, uma vez que se pretendeu demonstrar sua relevância dos afloramentos para o uso sustentável e evidenciar valores e necessidade de proteção em locais ainda pouco estudados ou sujeitos a vulnerabilidades.

Após a realização do inventário do patrimônio paleontológico presente na área em estudo, foram escolhidos locais para a realização das quantificações e proposições de uso sustentável dessas áreas. Os locais avaliados foram os geossítios que compõem o Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins, em Filadélfia, Tocantins; o geossítio que contém pegadas de dinossauros terópodes em Fortaleza dos Nogueiras, Maranhão; e o geossítio que contém pegadas de dinossauros saurópodes em Itaguatins, também no estado do Tocantins.

A presente seção dos resultados buscou atingir os objetivos específicos de pesquisa: “c” (avaliar quantitativamente o valor científico, risco de degradação e potencial de uso educativo e turístico dos sítios paleontológicos) e “d” (discutir sobre o uso sustentável do patrimônio paleontológico da área estudada para fins científicos, educacionais e turísticos). Propôs-se ainda, responder à seguinte porção da questão problema: “quais os valores e potencialidades de uso sustentável do patrimônio paleontológico da área em estudo?”.

# ASSESSMENT AND GEOCONSERVATION OF THE PALEONTOLOGICAL HERITAGE OF THE NORTH OF THE STATE OF TOCANTINS AND SOUTHWEST OF THE STATE OF MARANHÃO, BRAZIL: SUBSIDIES FOR SUSTAINABLE SOCIOECONOMIC DEVELOPMENT

## ABSTRACT

In the central-northern region of Brazil, in the northern of the state of Tocantins and southwestern of the state of Maranhão, there are known fossiliferous outcrops of notable scientific importance, in particular the Natural Monument of the Fossilized Trees of Tocantins, in Filadélfia (Permian); the geosite containing theropod dinosaur footprints in Fortaleza dos Nogueiras, Maranhão (Triassic); and the geosite containing sauropod dinosaur footprints in Itaguatins, Tocantins (Eocretaceous). Assessments of the scientific value, degradation risk and potential for educational and touristic use were carried out on these geosites. The methodology used in the quantification was the one available on the Geosit website (<https://www.cprm.gov.br/geosit/>), administered by the Geological Survey of Brazil (CPRM). Overall, the geosites obtained moderate to high scientific value and educational and touristic use potential, and low degradation risk for the outcrops of the Tocantins Fossilized Trees Natural Monument, medium for the Theropoda footprints and high for the Sauropoda footprints. Geoconservation actions are proposed for each of these areas, in order to make a pragmatic contribution, through the paleontological heritage, to socioeconomic development and the protection of the natural heritage of the area under study.

**Keywords:** Geoconservation; Parnaíba Sedimentary Basin; Ichnofossils; Phytofossils.

## INTRODUCTION

Brazil has a rich and diverse paleontological heritage with findings recorded in much of its territory. In the central-northern region of the country, in the northern Tocantins State and Southwest Maranhão State, there are known fossiliferous outcrops of notable scientific importance. These occurrences, dating from the Permian to the Cretaceous of the Intracratonic Sedimentary Basin of Parnaíba, require geoconservation strategies for their proper sustainable use and management. (Dias-Brito *et al.*, 2009; Assis *et al.*, 2010; De Valais *et al.*, 2015; Lopes; Candeiro; De Valais, 2019; Lopes; Lima; Candeiro, 2021, 2022).

In order to protect some of these outcrops, a protected area was created encompassing geosites that became part of the Natural Monument of Fossilized Trees of Tocantins (MONAFT), established by State Law No. 1,179/2000 (Tocantins, 2000). This protected area contains fossils composed of gymnosperm trunks and permineralized ferns, forming one of the largest fossil-preserved forests in the world (Dias-Brito *et al.*, 2009; Benício *et al.*, 2016). The other reported fossil records for the region consist of shark remains, stromatolites, indeterminate

leaf molds and sauropod and theropod footprints; of these, only dinosaur ichnofossils are found in situ (Santos; Carvalho, 2009; Assis *et al.*, 2010; Kauffmann *et al.*, 2013; De Valais *et al.*, 2015; Lopes; Lima; Candeiro, 2021).

Despite the fact that there is already scientific knowledge produced about the paleontological heritage present in the study area, until now no research had been carried out with a geoconservation approach to quantifying the values, potential use and vulnerability for the geosites of this region. These investigations are essential to support effective geoconservation measures. The lack of studies for this purpose implies a lack of knowledge about the weaknesses and potential for using these geosites in geoeeducational activities and tourism development.

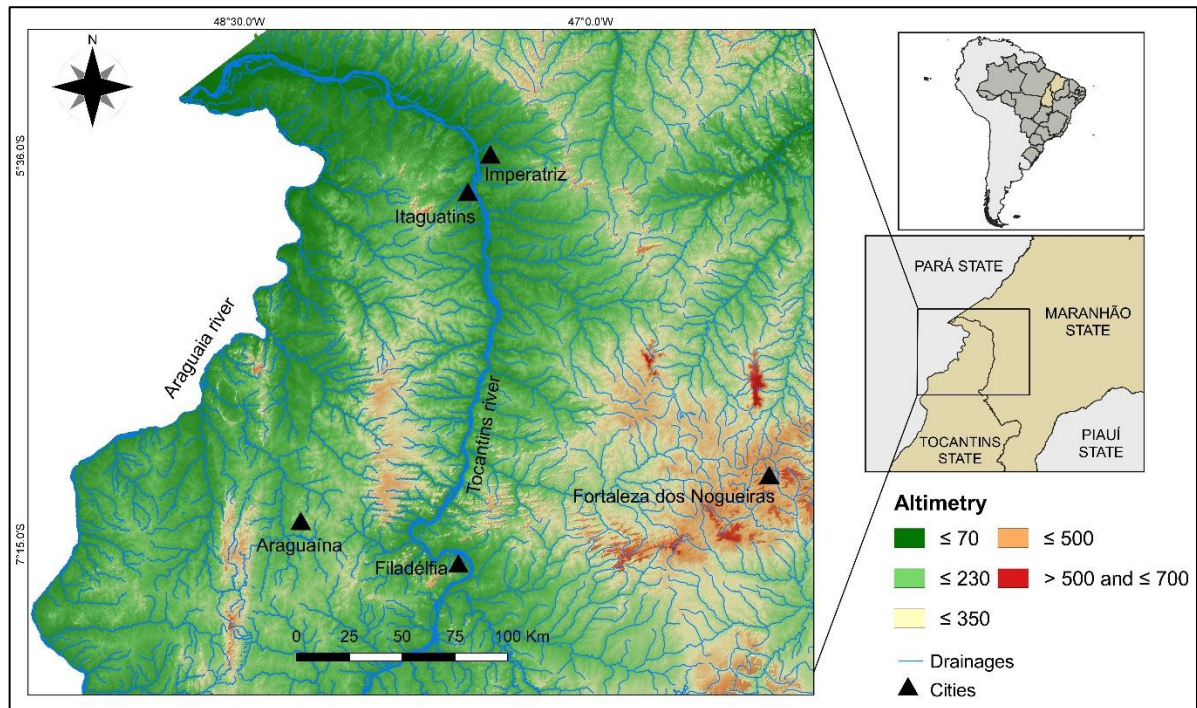
Several studies have already been conducted addressing strategies for assessment, management, and more effective plans for geoconservation of the geoheritage (e.g. Pereira *et al.*, 2007; Prosser *et al.*, 2013; Rocha *et al.*, 2014; Santos *et al.*, 2015; Moura *et al.*, 2018; Meira *et al.*, 2019; Mehdioui *et al.*, 2020; Garcia *et al.*, 2022). There are also various approaches and proposals for assessment methods to categorize and quantify the values of a geosite (Gray, 2004; Brilha 2005; Pereira *et al.*, 2007; Reynard, 2009; García-Cortéz; Carcavilla, 2013; Brilha, 2016; Baadi *et al.*, 2020; Sisto *et al.*, 2023). These initiatives aim to establish scientifically based criteria for identifying and understanding the geological, paleontological, cultural and geographical significance of each site in question.

The aim of the study presented here is to quantitatively assess the potential for educational and tourist use and the risk of degradation of the paleontological geosites in the north of the state of Tocantins and the southwest of the state of Maranhão, as well as to highlight their scientific value and thus contribute to the development of possible management plans aimed at conserving this geoheritage.

## **CHARACTERIZING THE STUDY AREA**

The study area was delimited between latitudes 07° 31' 48" S and 05° 02' 36" S; and longitudes 49° 16' 31" W and 45° 55' 22" W, in the states of Tocantins and Maranhão (fig. 1), covering around 60 municipalities with a population of approximately 1.200.000 inhabitants, according to the census of the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE, 2022). The region is dominated by savanna formations, but there are also occurrences of seasonal semi-deciduous forest and portions of Amazonian forest (Haidar, 2013).

**Figure 1** – Location of the study area with emphasis on the altimetry of the topography.



**Author:** Raylon da Frota Lopes. **Source:** IBGE (2018), INPE (2011).

Geologically, the area is located in the western portion of the Parnaíba Sedimentary Basin, a geological unit that evolved in a syncline in the west of Gondwana. The geological formations where the geosites are located outcrop in the central-western section of the basin. The Motuca Formation (Lopingian; Plummer, 1948) is composed of marine-origin sedimentary rocks with cross-stratification and intercalations of argillites and siltstones, and the occurrence of sandstones. The genesis of this unit is understood to be the result of marine transgressions and sporadic inflows of sandy rivers (Aguiar, 1971; Tocantins, 2004; Abrantes; Nogueira, 2013).

The Sambaíba Formation (Triassic; Plummer, 1948) is composed of reddish and whitish sandstones, predominantly fine to medium, well sorted, commonly friable, exhibiting large-scale cross-stratification. The origin of this unit is attributed to a desert environment with sediments organized by eolian action, indicating environmental changes caused by marine regression and the onset of a strongly arid climate in the basin.

The Corda Formation (Barremian; Aguiar, 1971) is represented by red, white, purple and gray sandstones of fine to medium grain size. The predominant structures in this unit are cross-stratified, channeled packages with a wide flow of grains that intersperse layers with plane-parallel stratifications. The sedimentation process is interpreted as a dry, hot climate with high-energy fluvial conditions.

The joint paleoenvironmental interpretation of these geological units indicates a gradual transition from a marine to a continental environment in the study area, between the Permian and the Cretaceous, with the occurrence of marine incursions, sometimes large and sometimes smaller in scale.

## **METHODOLOGY**

The study began with a bibliographic review of the topic and the study area. In this stage, outcrops were recognized and selected for analysis. After identifying and selecting the sites to be investigated, fieldwork was carried out to collect data. Following the fieldwork, office work commenced with the development of quantitative assessments, the creation of maps, and the formulation of geoconservation proposals for the geosites.

The fossils illustrated and cited here are located in situ and with some specimens in the following institutions: Paleontology and Evolution Laboratory of the Federal University of Goiás, Aparecida de Goiânia *Campus*; Paleobiology Laboratory of the Federal University of Tocantins, Porto Nacional *Campus* and Zoology/Geology-Paleontology Laboratory, of the Federal University of Northern Tocantins, Araguaína *Campus*.

### **Selection of geosites for quantification**

This research used the inventory of the paleontological heritage of the northern of the state of Tocantins and southwestern of the state of Maranhão carried out by Lopes, Lima and Candeiro (2021). It should be noted that this study is part of a larger effort to recover paleontological knowledge of the region and investigate the potential for sustainable use of geosites.

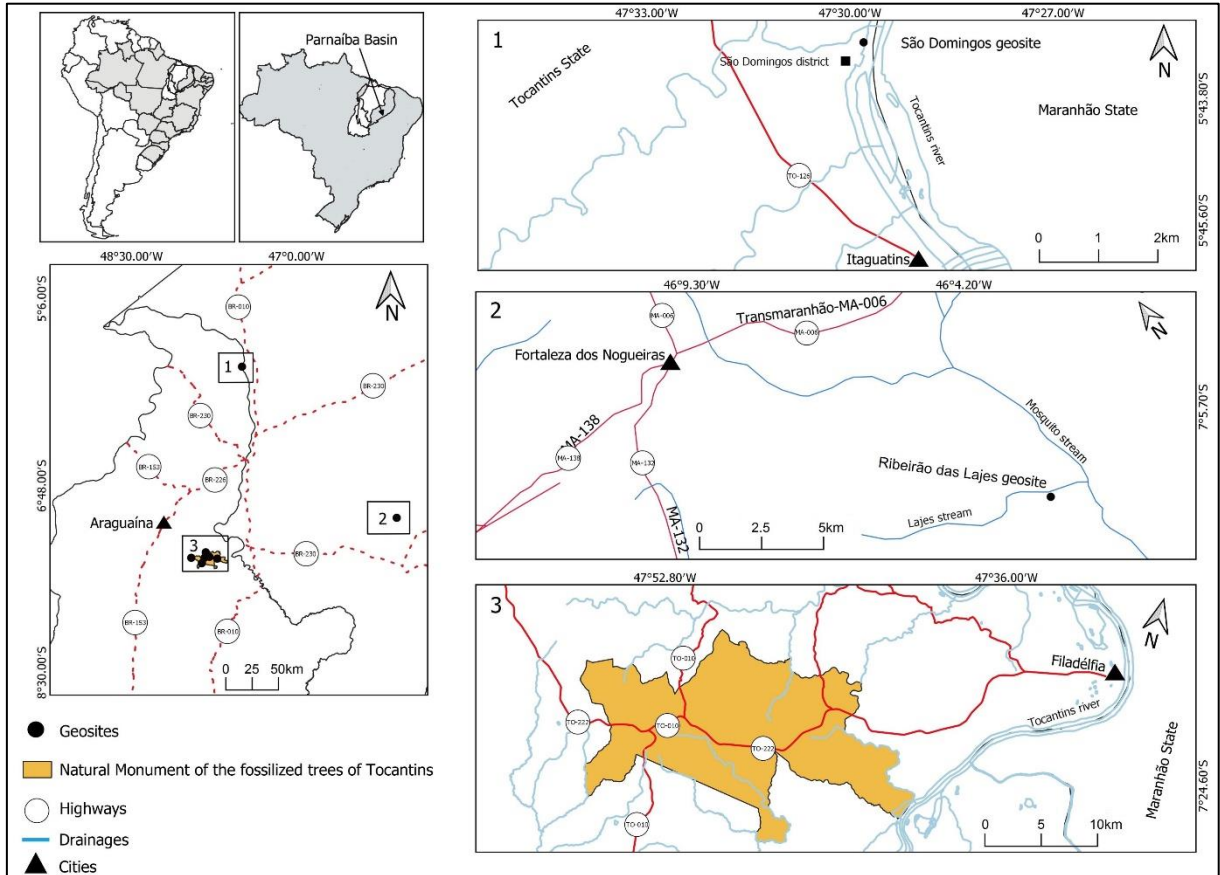
For the purposes of study, assessment, and proposing actions, only geosites were considered, and *ex situ* elements were not analyzed. This approach aims to highlight the values and need for protection in sites that are still under-studied, as well as demonstrate their relevance for sustainable use.

Alongside the quantitative analysis, the studied geosites were classified into typologies based on the methodology proposed by Nascimento *et al.* (2021). According to this approach, geosites can be categorized as point, section, area, and observatory (Nascimento *et al.*, 2021: Table 2).

The assessed sites were (fig. 2) the Natural Monument of the Fossilized Trees of Tocantins, in Filadélfia, Tocantins; the geosite containing theropod dinosaur footprints in

Fortaleza dos Nogueiras, Maranhão; and the geosite containing sauropod dinosaur footprints in Itaguatins, Tocantins.

**Figure 2** – Location of the paleontological sites under study: (1) São Domingos geosite; (2) Malhada Vermelha Farm geosite; (3) Natural Monument of the Fossilized Trees of Tocantins.



**Author:** Raylon da Frota Lopes.

### Assessment of the geosites

Quantifications were carried out for the scientific value, degradation risk and educational and touristic use value of each geosite. Throughout this stage, the quantitative assessment methodology available on the Geossit website (<https://www.cprm.gov.br/geossit/>), managed by the Geological Survey of Brazil (CPRM), was adopted. The assessment tables used in this methodology are based on the proposal by Brilha (2016) and influence of García-Cortés and Carcavilla Urquí (2009).

Geossit is a web application for registering and quantifying geosites. It also allows for the integration of inventory and quantification data to characterize geoheritage in Brazil. The system has several spreadsheets that must be filled in in order to carry out the quantitative assessment and obtain the relevance of the geosite under study. Geossit also suggests some

recommendations as to the urgency and need for protection, regardless of the location's purpose as a tourist or educational spot, for example.

After filling in all the parameters, which range in score from one to four when the parameter is applicable to the geosite, the system will calculate a final average for the geosites, taking into account the weights of each criterion, assigning them a low, moderate or high value for the potential for educational use, tourism and degradation risk, and relevance at international, national and regional levels in the assessment of scientific value.

## RESULTS AND DISCUSSIONS

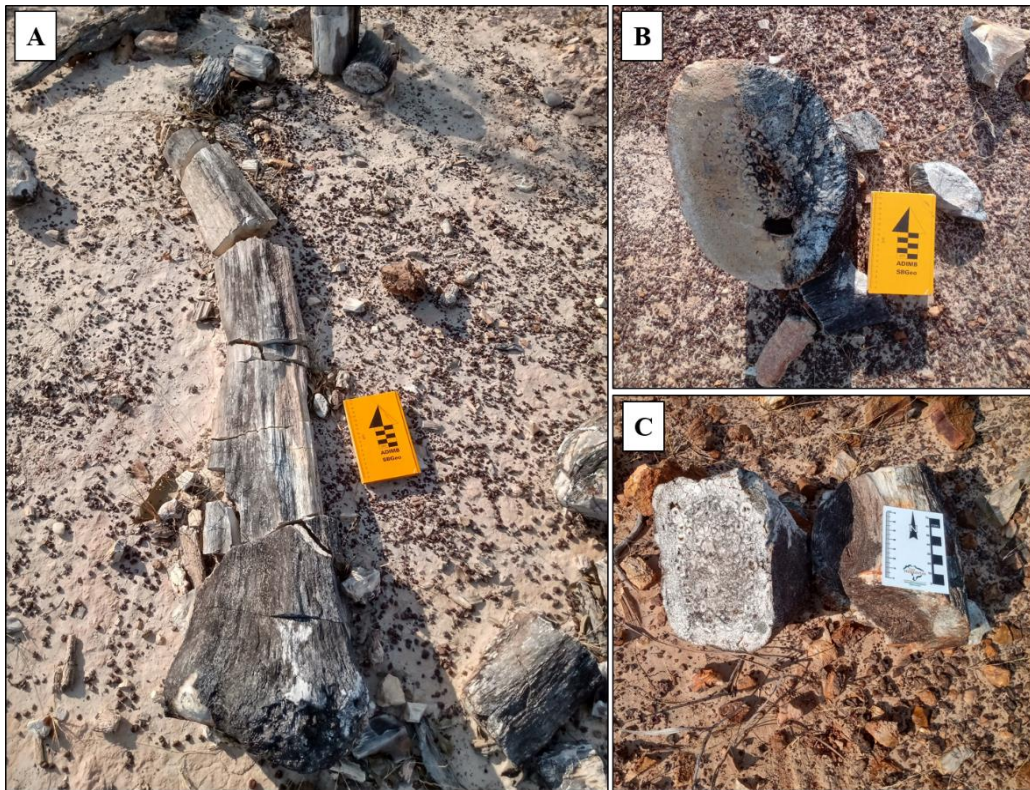
### The Paleontological Heritage of Northern Tocantins and Southwestern Maranhão

The area has significant paleontological outcrops composed of phytofossils attributed to gymnosperms and ferns (Dias-Brito *et al.*, 2009); ichnofossils composed of tracks attributed to sauropod dinosaurs (quadrupeds, vegetarians) (De Valais *et al.*, 2015), and ichnofossils composed of theropod footprints (bipeds, carnivores) (Assis *et al.*, 2010).

In the district of Bielândia, in the municipality of Filadélfia, Tocantins, there are phytofossils made up of gymnosperm trunks and fern leaves in sandstones from the Motuca Formation (Permian). The occurrences are located in five geosites that form a protected area created specifically to safeguard these finds, which include *Botryopteris nollii*, *Dadoxylon* sp., *Grammatopteris freitasii*, *Pecopteris* sp., *Psaronius* sp., and *Tietea* sp. among the taxa recorded (Rößler; Galtier, 2002, 2003) (fig.3). According to the typologies proposed by Nascimento *et al.* (2021), MONAFT is categorized as the Area type.

In a rural area in the municipality of Fortaleza dos Nogueiras, Maranhão, dinosaur footprints were identified and attributed to Theropoda. The outcrop corresponds to rocks of the Sambaíba Formation (Triassic). The ichnofossils consist of tracks and isolated footprints of small individuals. There are at least two sets of tridactyl footprints preserved as epichnia, totaling around 83 footprints. The length and width of the footprints range from 10 cm to 17 cm and 5 cm to 9 cm, respectively, with thick fingerprints and very clear claw traces generally on all of them (fig.4). In ichnotaxonomic analyses, Lopes *et al.* (2024) considered the ichnofossils to be *Grallator*. According to the typologies proposed by Nascimento *et al.* (2021), this geosite falls into the Area type.

**Figure 3** – Fossilized gymnosperm trunks found at MONAFT. (A) Fragmented fossilized stem, organized for better viewing by visitors; (B) Fossilized trunk, showing some internal structures of the plant; (C) Two fossilized trunks, one placed upright for better viewing. Scales of 18 and 7 cm respectively.



Photos: Raylon da Frota Lopes.

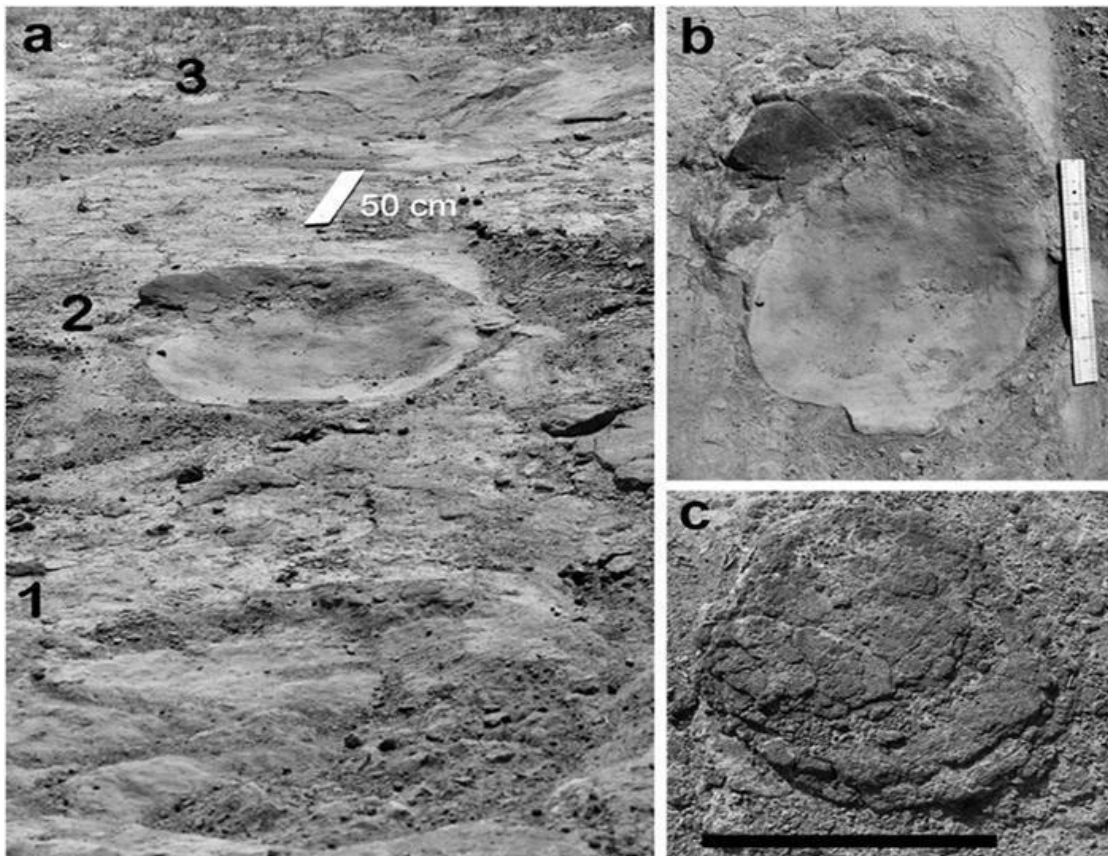
**Figure 4** – Theropod dinosaur footprints from Fortaleza dos Nogueiras, Maranhão, Brazil. (A) Footprint preserved in a submerged block; (B) Footprint on a sandstone slab with a natural inclination of 90°; (C and D) Footprints on a slab from the Sambaíba Sandstone on the banks of the Lajes stream. 18 cm scales.



Photos: Raylon da Frota Lopes.

In the northern region of the state of Tocantins, in the district of São Domingos, municipality of Itaguatins, there are sandstones with sauropod dinosaur footprints in rocks of the Corda Formation (Barremian). The geosite is composed of 20 footprints arranged in four trails and isolated footprints, with poor to moderate preservation. The ichnofossils do not contain prints of digits or claws, and are longer than they are wide, ranging from 59 to 80 cm wide and 66 to 82 cm long. De Valais *et al.* (2015) attribute the ichnotaxonomy of these specimens to *Parabrontopodus* (fig. 5). According to the typologies proposed by Nascimento *et al.* (2021), this geosite is classified as the Area type.

**Figure 5** - In situ tracks at the São Domingos geosite. A trail of three footprints, the nearest trail (a) is covered by modern sediments; (b) and (C) moderately preserved footprints. Scale bars 50 cm.



Source: De Valais *et al.* (2015).

### Quantitative assessment

The assessment of valuable elements of geodiversity is still evolving in the geosciences, seeking to minimize subjectivity. The element analyzed, i.e. the object, is factual and objective, but the notion of value is subjective and varies according to the method applied. Thus, the quantitative assessment of a geosite reflects a specific study, taking into account momentary

characteristics subject to environmental and infrastructural changes, a fact that can consequently result in altered levels of value according to the criteria of the method applied.

The results of the quantification are shown in tables 1, 2 and 3. In general, the geosites obtained moderate to high scientific value, with international relevance for the Natural Monument of the Fossilized Trees of Tocantins and Malhada Vermelha Farm geosite, and national relevance for the São Domingos.

**Table 1.** Criteria, weights and scores for quantifying the scientific value (CV) of the geosites under study. Based on Brilha (2016).

PARAMETERS	WEIGHTS	GEOSITES		
		MONAFT	Malhada Vermelha Farm Geosite	São Domingos Geosite
Representativeness	30	4	4	4
Key locality	20	4	2	2
Scientific knowledge	5	4	2	4
Integrity	15	4	4	1
Geological diversity	5	4	4	2
Rarity	15	4	4	4
Use limitations	10	1	2	2
		CV: 380 International relevance	CV: 330 International Relevance	CV: 285 National Relevance

**Table 2.** Criteria, weights and scores for quantifying the educational use (EU) and tourism use (TU) values of the geosites under study. Based on Brilha (2016).

PARAMETERS	WEIGHTS		GEOSITES		
	EU	TU	MONAFT	Malhada Vermelha Farm Geosite	São Domingos Geosite
Vulnerability	10	10	3	2	2
Accessibility	10	10	2	1	1
Use limitations	5	5	2	2	2

Safety	10	10	4	2	2
Logistics	5	5	4	4	3
Density of population	5	5	1	1	1
Association with other values	5	5	4	4	3
Scenery	5	15	1	1	1
Uniqueness	5	10	4	3	4
Observation conditions	10	5	4	4	3
Didactic potential	20	0	4	4	4
Geological diversity	10	0	4	4	3
Interpretative potential	0	10	4	4	3
Economic level	0	5	1	3	1
Proximity to recreational áreas	0	5	0	4	4
			TU: 275 - Moderate EU: 330 - High	TU: 245 - Moderate EU: 285 - Moderate	TU: 220 - Moderate EU: 260 - Moderate

**Table 3.** Criteria, weights and scores for quantifying the degradation risk (DR) of the geosites under study. Based on Brilha (2016).

PARAMETERS	WEIGHTS	GEOSITES		
		MONAFT	Malhada Vermelha Farm Geosite	São Domingos Geosite
Deterioration of geological elements	35	1	3	4
Proximity to areas/activities with potential to cause degradation	20	1	4	4
Legal protection	20	1	3	3

Accessibility	15	2	1	1
Density of population	10	1	1	1
		DR: 115 – Low	DR: 270 - Moderate	DR: 305 - High

Regarding the potential for educational and tourist use, the geosites showed significant touristic value, quantitatively assessed as moderate, but the educational value stands out, as they can be used at all levels of education. The degradation risk is high for the São Domingos geosite, medium for the Malhada Vermelha Farm geosite and low for MONAFT. This is also because the latter is already monitored, as it is protected by legal mechanisms.

### **Natural Monument of the Fossilized Trees of Tocantins**

The Natural Monument of Fossilized Trees of Tocantins is composed of five geosites containing fossilized plants forming what Dias-Brito *et al.* (2009) call the Petrified Forest of Northern Tocantins. The finds are found in sediments of the Motuca Formation, in the Parnaíba Intracratonic Sedimentary Basin. MONAFT was set up in 2000 due to the extreme need to curb the trafficking of phytofossils in the region. The territory belongs to the group of protected areas of integral protection in Brazilian legislation, whose objective is to preserve nature, with only indirect use of its natural resources permitted.

The protected area encompasses private lands where economic activities such as cattle raising and subsistence agriculture are permitted according to the Management Plan of MONAFT. These practices are allowed through the establishment of zoning for resilient areas within the territory, which require different degrees of intervention and protection.

Low-intensity agriculture and livestock farming occur with the use of controlled burning for clearing spaces during the dry season. This activity is carried out by the Nature Institute of Tocantins (NATURATINS), responsible for managing the territory, following the guidelines of the forest fire prevention, management, and combat plan for the protected area (MSR/OIKOS, 2005; Tocantins, 2021).

The fossil outcrops that make up the monument have high scientific value and international relevance. This is due to the fact that the finds, composed of a large number of permineralized plant records, are well preserved and that there are already several published taxonomic and paleoenvironmental characterization studies for these records.

The area still holds great potential for future studies due to the large quantity of phytofossils and its biological significance. Initially, there was no specific strategy aimed at safeguarding biodiversity. However, with the implementation of activities outlined in the management plan of the protected area, such as controlling hunting, fishing, deforestation, and fires, the conservation unit created to protect elements of geodiversity found itself also conserving the regional fauna and flora of the Brazilian savanna. This demonstrates how the paleontological heritage is being used as an umbrella for biotic defense.

The touristic and educational use values are moderate and high, respectively, in the area. There is not yet enough of a tourist structure to receive large numbers of visitors on a continuous basis. However, its elements can be easily identified and appreciated by the general public, as well as being used in classes for all levels of education, from primary school to postgraduate studies, which is already the case.

Due to the good state of conservation of the fossils and the legal rules on protection and safeguarding, the degradation risk is considered to be low. The small economic activities carried out within the territory do not put the phytofossils at risk in the short or medium term, all of which are monitored by NATURATINS officials, who advise and supervise the local population with regard to protecting the area.

### **Malhada Vermelha Farm Geosite**

The footprints of theropod dinosaurs were identified in the municipality of Fortaleza dos Nogueiras, in the state of Maranhão. The ichnofossils are located on the banks of the Lajes stream and are moderately to well preserved. These records come from the Sambaíba Formation (Neotriassic), which is considered aphosiliferous by several authors (Plummer, 1946; Aguiar *et al.*, 1971, Abrantes-Júnior; Nogueira, 2013).

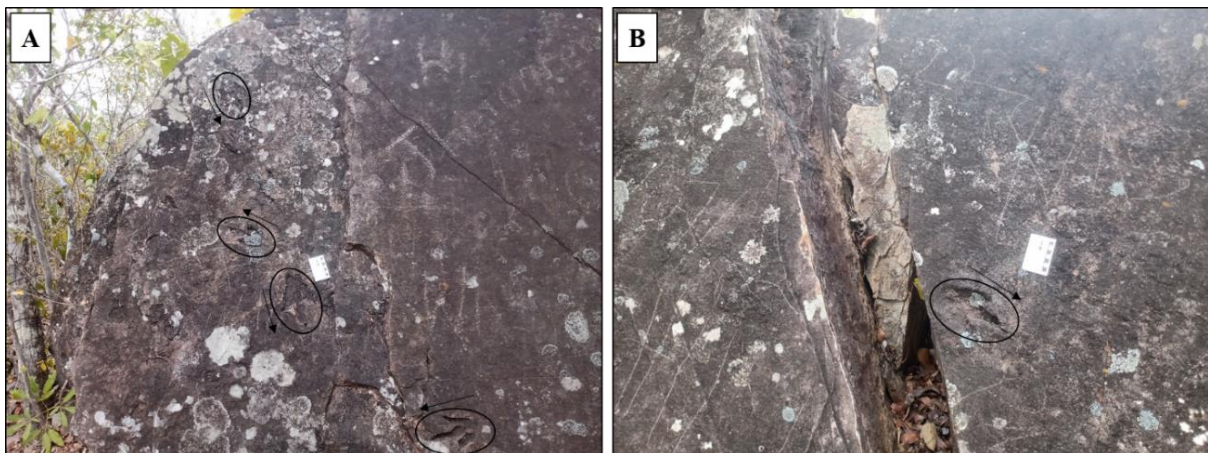
The first studies conducted on the occurrence of dinosaur footprints in the locality were carried out by Assis *et al.* (2010), and in recent fieldwork, new findings have been identified and described (Lopes *et al.*, 2024), reinforcing the need for a fresh perspective on the sedimentation of the Sambaíba Formation.

The findings in Fortaleza dos Nogueiras constitute the geosite known as Malhada Vermelha farm, which holds high scientific value with international significance in quantitative analyses. Despite being highly representative, there are still few scientific publications on these ichnofossils, and the first comprehensive studies involving ichnotaxonomic description and quantification of values and threats were carried out recently.

The educational and touristic values are moderate, mainly due to the lack of suitable physical infrastructure for visitation and the difficult access to the geosite, which requires a walk of about 20 minutes to the outcrops. A notable aspect for touristic and educational values is the excellent state of preservation of the specimens, which are perceptible to all educational levels.

Regarding the degradation risk, analyses indicate that it is moderate. Even though the specimens are in varying states of medium to high preservation, the geosite lacks any form of protection or access restriction, aside from being within private property. In fact, individuals who visit the Lajes stream region for leisure activities by the stream often scratch their names onto the rocks bearing the ichnofossils (fig. 6), highlighting the urgent need for some form of protection for the area. A concrete and effective way to conserve this heritage would be to designate it as a natural area of heritage interest at the municipal or state level, thereby ensuring its continuity, sustainable use, and preservation actions.

**Figure 6** – Slabs containing dinosaur footprints and names scratched into the rock by visitors to the area. (A) Slab containing four footprints; (B) Slab containing one footprint, located next to the slab in figure 6A. The arrows represent the direction of the footprint.



**Photos:** Raylon da Frota Lopes.

### São Domingos Geosite

The São Domingos geosite occupies an area of around 1.0 km<sup>2</sup> with sauropod dinosaur footprints preserved in a sandstone slab of the Corda Formation. The specimens present comprise 20 footprints distributed over 4 trails and isolated footprints, with poor to moderate preservation. The paleobiological elements of the geosite are unique in the region and in the Corda Formation, and have moderate scientific value. Even with several publications on the elements present at the geosite (De Valais *et al.*, 2015; Tavares *et al.*, 2015; Lopes; Candeiro;

De Valais, 2019; Lopes, Lima; Candeiro, 2021, 2022), the high degree of erosion of the host rocks compromises their scientific value while increasing their degradation risk.

The São Domingos geosite has a moderate educational use value. Even though its attributes make it a very representative site for geological events of ichnofossiliferous conservation and a testimony to national paleobiodiversity, the poor conservation of its elements means that in quantitative analyses its value is somewhat reduced (Table 2). This value highlights elements that can be used didactically at all levels of education. The outcrop is unique in the region and can help in the learning of subjects covered by basic education and higher education courses.

The touristic value was given a low score in the quantitative assessment, which is also due to the poor conservation of the geosite's elements and the lack of elements in the vicinity that have scenic beauty or are suitable for recreational activities. Regarding degradation risk, the geosite has a high threat of losing its most important elements. The outcrop is located on the banks of the Tocantins River and is vulnerable to flooding from the drainage, which is the factor that most wears away the ichnofossils, causing them to deteriorate and at the same time covering them with modern sediments. Of the seven original footprint trails, only four are left in a poor to moderate state of preservation, making activities aimed at their geoconservation urgent.

### **Sustainable use, relevance and geoconservation of the Paleontological Heritage**

Managing and sustainably using the paleontological heritage of the study area presents a variety of challenges, highlighting the clear need for specific and adaptable geoconservation strategies for each one. MONAFT exemplifies the coexistence of small economic practices and conservation, while the Malhada Vermelha Farm geosite highlights the urgency of effective protection to prevent irreversible damage. In the São Domingos geosite area, on the other hand, interventions are needed to minimize erosion and promote educational awareness (Erikstad, 2013, Conceição *et al.*, 2020).

We consider MONAFT to be a good model for sustainable geoheritage management. However, there is still of potential for utilizing the area. Campaigns to promote the findings are necessary to increase visitation to the area and thus further foster the local economy, reducing dependence on agricultural practices that pose risks to the paleontological heritage.

For the theropod footprint geosite, the implementation of a responsible ecotourism and geotourism program, combined with the creation of interpretive trails, is an alternative for the sustainable use of the area. Additionally, the region of Fortaleza dos Nogueiras has several

waterfalls with a high level of ecological conservation. By offering educational experiences guided by specialists, access can be controlled, and visitors can be made aware of the importance of geoconservation.

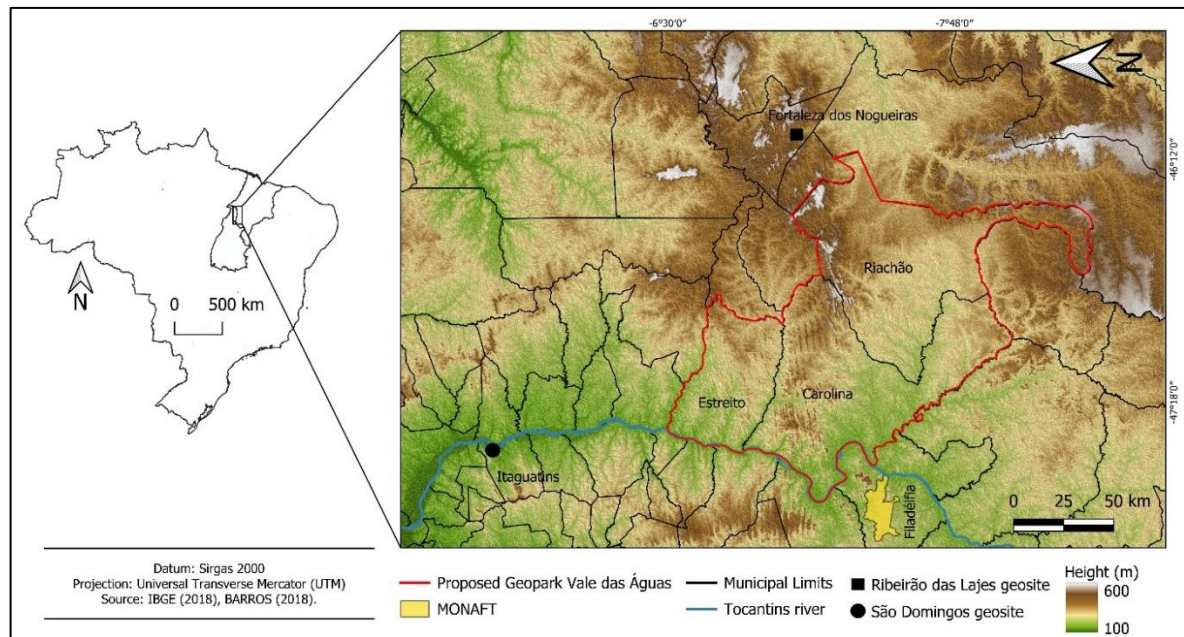
Partnerships with public and private organizations, and tax incentives for companies that support the protection of the geosite, can provide resources for improvements in the infrastructure and safety of the outcrop, while promoting economic growth. Similar strategies are addressed theoretically by Piranha *et al.* (2011) when discussing the challenges of geoheritage management in Brazil.

Initially, it is necessary to raise awareness among the local community about the importance of this outcrop and its potential to contribute to local socioeconomic development. Engaging the local community and volunteers in restoration and monitoring projects could transform the care of the geosite into a collective initiative. The participation of the university and public authorities is essential in this regard, including extension projects involving students from the basic education network.

Furthermore, the creation of an interactive digital platform, offering virtual tours and online geoeeducational experiences, can extend the geosite's reach beyond physical constraints, generating interest and support. Once these steps have been taken, the geosite should be used for visitation, giving the population and visitors direct contact with their own geoheritage.

Something relevant to highlight is that in the area under study there is a proposed geopark, the Vale das Águas Geopark (Barros *et al.*, 2018). However, none of the outcrops discussed in this research are included in the proposal, which covers the municipalities of Estreito, Carolina and Riachão, in the state of Maranhão (fig. 7). This proposal is motivated by the significant geodiversity of the area, with elements such as the Chapada das Mesas and its geofoms, and various waterfalls present in the region.

**Figure 7** – Proposed area for the Vale das Águas Geopark



**Source:** Modified from Barros *et al.*, 2018.

This proposal corroborates the significance and potential of northern Tocantins and southwestern Maranhão for sustainable development, with geodiversity as one of its driving forces. The Chapada das Mesas region is already a popular destination, featuring several tourist complexes (Oliveira; Coriolano, 2013; Silva; Araújo; Conceição, 2020).

We do not encourage the inclusion of the paleontological geosites under study in the area proposed for the Vale das Águas Geopark, as a large territory would make the administration and implementation of the project more complex and difficult to develop. The paleontological outcrops should have their own management, but together with their actions they should publicize the proposal, or perhaps in the future, the geopark. Likewise, the actions to publicize the proposed geopark should include the paleontological geosites portrayed here, bringing an interaction of actions and publicizing all the superlative elements of regional geodiversity (Farsani, *et al.*, 2014; Reynard; Brilha, 2018).

## FINAL CONSIDERATIONS

The sustainable use of the most valuable components of geodiversity must be constantly studied and improved, with the development of appropriate management strategies for each outcrop. In the area under study, the potential for activities that combine the use and protection of geoheritage has become evident. If well developed, these actions could generate socioeconomic change in the region.

The northern region of the state of Tocantins and the southwest of the state of Maranhão have significant paleontological sites, some at high risk and none protected. The existence of threats to the integrity of the paleontological heritage makes it necessary to constantly develop research and extension activities in each location, in order to implement practical conservation actions and, at the same time, raise awareness among the local population of the potential highlighted in this research.

The aim of this work was to assess the values, use potential and degradation risk of the selected geosites, as well as proposing strategies for their socioeconomic and educational use. The characterization and identification of these indicators led to the establishment of sustainable use proposals and the understanding that paleontological heritage can be a relevant instrument for the socioeconomic development of the area.

The research presented here has some limitations, as the paleontological heritage of the area under study is broader and has more values and potential uses than those measured in this investigation. Studies should therefore continue to be carried out in order to increase and update knowledge of the region's paleontological wealth, while at the same time seeking strategies for the sustainable use and protection of this rich heritage.

## REFERENCES

- ASSIS, F.P.; MACAMBIRA, J.B.; LEONARDI, G. Dinossauros terópodes do Ribeirão das Lajes, primeiro Registro fóssil da Formação Sambaíba (Neotriássico-Eojurássico), Bacia do Parnaíba: Fortaleza dos Nogueiras, Maranhão-Brasil. 2010. **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia**, Belém, PA, Brasil, 45. P.1720. Available in [http://sbg.sitepessoal.com/anais\\_digitalizados/2010-BEL%C3%89M/2010-BEL%C3%89M.zip](http://sbg.sitepessoal.com/anais_digitalizados/2010-BEL%C3%89M/2010-BEL%C3%89M.zip)
- BAADI, K.; SABAOU, A.; TEKOUT, B. Methodological Proposal for Assessment Geosites: its Application in Bou-Iblane Region (Middle Atlas, Morocco). **Geoheritage** 12, 55 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00476-1>.
- BARROS, J.S; OLIVEIRA FILHO, J.M; FREITAS, L.C.B. **Inventário do patrimônio geológico Vale das Águas: proposta de geoparque, estado do Maranhão**. Brasília. CPRM. 2018. Available in: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20813> access in: 29 ago 2020.
- BENÍCIO, JRW.; SPIEKERMANN, R.; MANFROI, J. UHL, D.; FABBRIN, E.; JASPER, A. Palaeoclimatic inferences based on dendrological patterns of permineralized wood from the Permian of the Northern Tocantins Petrified Forest, Parnaíba Basin, Brazil. **Palaeobio Palaeoenv.** 96, 255–264. 2016. <https://doi.org/10.1007/s12549-015-0218-8>.
- BRILHA, J. **Patrimônio Geológico e Geoconservação: A Conservação da Natureza na sua Vertente Geológica**. Braga: Editora Palimage, 2005.

BRILHA, J. Inventory and Quantitative Assessment of Geosite and Geodiversity Sites: a Review. **Geoheritage**, v. 8, n. 2, p. 119-134, 2016.

CONCEIÇÃO, D.M. TAVARES, T.M.V.; CISNEROS, J.C.; KURZAWA, F.; ALENCAR, M. A.; PACÍFICO-FILHO, M.; SILVA-MELO, A.; AIRES, H.A.. **Geoconservation of Permian Petrified Forests from Northeastern Brazil**. In: Iannuzzi, R., Rößler, R., Kunzmann, L. (eds) *Brazilian Paleofloras*. Springer, Cham. 2020. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-90913-4\\_13-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-90913-4_13-1).

DIAS-BRITO, D.; ROHN, R.; CASTRO, J.C.; DIAS, R.R.; RÖBLER, R. Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional: O mais exuberante e importante registro florístico tropical-subtropical permiano no Hemisfério Sul. In: WINGE, M.; SCHOBENHAUS, C.; BERBERT-BORN, M.; QUEIROZ, E.T.; CAMPOS, D.A.; SOUZA, C.R.G.; FERNANDES, A.C.S. (eds.), **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. Brasília: CPRM. 2009. Available in: <<https://sigep.eco.br/sitio104/sitio104.pdf>>. access in: 02 abril 2019.

DE VALAIS, S.; CANDEIRO, C.R.; TAVARES, L.F.; ALVES, Y.M.; CRUVINEL, C. Current situation of the ichnological locality of São Domingos from the Corda Formation (Lower Cretaceous), northern Tocantins state, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 61, 142–146. 2015. doi:10.1016/j.jsames.2014.09.023.

ERIKSTAD, L. Geoheritage and geodiversity management – the questions for tomorrow. **Proceedings of the Geologists' Association**, v. 124, Issue 4, p. 713-719. 2013.

FARSANI, N.T.; COELHO, C.O.A.; COSTA, C.M.M.; AMRIKAZEMI, A. Geo-knowledge Management and Geoconservation via Geoparks and Geotourism. **Geoheritage** 6, 185–192. 2014. <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0099-7>.

GARCÍA-CORTÉZ, A.; CARCAVILLA, L. Documento Metodológico Para la Elaboración del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG). **Instituto Geológico y minero de España**. Madrid, Espanha, p. 64. 2013.

GARCIA, M.D.; NASCIMENTO, M.A.L.; MANSUR, K.L.; PEREIRA, R.G.F.A. Geoconservation Strategies Framework in Brazil: Current Status from the Analysis of Representative Case Studies. **Environmental Science & Policy**, vol. 128, fevereiro de 2022, p. 194–207. DOI <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.11.006>.

GRAY, M. **Geodiversity: Valuing and conserving abiotic nature**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 448p. 2004.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama do censo demográfico 2022**. Rio de Janeiro: IBGE; 2023. Acesso em 20 julho 2022. Disponível em <<https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>>.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. DSR - Divisão de Sensoriamento Remoto. **Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil - Topodata**. 2011. Disponível em <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>>. Acesso 20 agosto 2021.

Haidar, R.F; Fagg, J.M.F; Pinto, J.R.R; Dias, R.R; Damasco, G; Silva, L.C.R; Fagg, C.W. Florestas estacionais e áreas de ecótono no estado do Tocantins, Brasil: parâmetros estruturais, classificação das fitofisionomias florestais e subsídios para

conservação. **Acta Amazônica**, v. 43, n. 3, p. 261-290. 2013. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/aa/a/MHhVg577jNybyYRc96D9bqM/abstract/?lang=pt>>. Acesso em 05 august 2023.

LOPES, R.F.; CANDEIRO, C.R.A.; DE VALAIS, S. Geoconservation of the paleontological heritage of the geosite of dinosaur footprints (sauropods) in the locality of São Domingos, municipality of Itaguatins, state of Tocantins, Brazil. **Environ Earth Sci**, 78, 707. 2019. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8722-1>.

LOPES, R.F.; CANDEIRO, C.R.A.; LIMA, C.V. Patrimônio Geológico: síntese terminológica e evolução conceitual. **BIODIVERSIDADE**, v. 19, p. 61-68, 2020.

LOPES, R.; LIMA, C. V.; CANDEIRO, C. R. A. O patrimônio paleontológico do norte do estado do Tocantins e sudoeste do Maranhão, Brasil: uma síntese preliminar: UMA SÍNTESE. **Terr@ Plural**, v. 15, p. 1–13, 2021. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/tp/article/view/17157>. Acesso em: 20 Jan. 2022.

LOPES, R.; VALÉRIA DE LIMA, C.; DOS ANJOS CANDEIRO, C. R. The geoheritage in the north of Tocantins state and southwest of Maranhão state, Brazil. **Ateliê Geográfico**, Goiânia, v. 16, n. 3, p. 40–58, 2022. DOI: 10.5216/ag.v16i3.73370. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/atelie/article/view/73370>. Acesso em: 27 mar. 2023.

LOPES, R. F.; CANDEIRO, C. R. A. ; DE VALAIS, S. ; LIMA, C. V. . Tridactyl dinosaur footprints from the Triassic Sambaíba Formation of Northern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**. vol. 144, p. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.105033>.

VIANA, M.S.S; CARVALHO, I.S. **Patrimônio paleontológico**. Editora Interciência, 158 p. Rio de Janeiro. 2019.

MEHDIOUI, S.; EL HADI, H.; TAHIRI, A.; BRILHA, J; EL HAIBI, H.; TAHIRI, M. Inventory and Quantitative Assessment of Geosites in Rabat-Tiflet Region (North Western Morocco): Preliminary Study to Evaluate the Potential of the Area to Become a Geopark. **Geoheritage** 12, 35 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00456-5>.

MOURA, P.; GARCIA, M.G.M.; BRILHA, J. Identificação de Sítios Geológicos para Gestão Prioritária: Propostas para a Geoconservação no Domínio Ceará Central, Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**. Rio de Janeiro. Vol. 41 – 2. p. 252-267. 2018.

MSR/OIKOS. **Plano de manejo do Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins**. Brasília: MRS, 2005. Informações gerais da UC. (Encartes: 1, 4). Disponível em: [https://www.terrabrasil.org.br/ecotecadigital/images/Plano\\_de\\_Manejo\\_Encarte\\_3\\_-\\_UC\\_e\\_Zona\\_de\\_Amortecimento.pdf](https://www.terrabrasil.org.br/ecotecadigital/images/Plano_de_Manejo_Encarte_3_-_UC_e_Zona_de_Amortecimento.pdf) Acesso em 20 ago 2022.

NASCIMENTO, M.A.L.; SILVA, M.L.N., ALMEIDA, M.C. de et al. Evaluation of Typologies, Use Values, Degradation Risk, and Relevance of the Seridó Aspiring UNESCO Geopark Geosites, Northeast Brazil. **Geoheritage**. 13, 25, 2021.

OLIVEIRA, W.R.; COROIOLANO, L. N. M. T. Áreas protegidas e atividade turística no Brasil: o Parque Nacional da Chapada das Mesas, Maranhão. In: EGAL, XIV, 2013, Peru. **Anais...** Peru: EGAL, 2013.

PIRANHA, JM, APARECIDA DEL LAMA, E; DE LA CORTE BACCI, D. Geoparks in Brazil—strategy of Geoconservation and Development. **Geoheritage** 3 , 289–298. 2011. <https://doi.org/10.1007/s12371-011-0043-z>.

REYNARD, E. **The assessment of geomorphosites**. In: Reynard E, Coratza P, Regolini-Bissig G (eds) *Geomorphosites*. Verlag Dr. Friedrich Pfeil, Munchen, p. 240. 2009.

REYNARD, E; BRILHA J. (Edts.). 2018. **Geoheritage: assessment, protection and management**. Elsevier, Amsterdam, 450p.

RÖBLER, R.; GALTIER, J. First Grammatopteris tree ferns from the Southern Hemisphere – new insights in the evolution of the Osmundaceae from the Permian of Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology**, 121:205-230. 2002.

RÖBLER, R.; GALTIER, J. The first evidence of the fern Botryopteris from the Permian of the Southern Hemisphere reflecting growth form diversity. **Review of Palaeobotany and Palynology**, 127:99-124. 2003.

TAVARES, L.F.S.; DE VALAIS, S.; ALVES, Y.M.; CANDEIRO, C.R.A. Amazonian Lower Cretaceous North Tocantins State (Brazil) dinosaur track site: conservation significance. **Environ Earth Sci** 73:142–126. 2015. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3754-z>.

TOCANTINS. Zoneamento Econômico Ecológico. **Secretaria de Planejamento e da Modernização da Gestão Pública (Seplan)**. Palmas: Seplan/DZE, 2013. Disponível em [http://zoneamento.sefaz.to.gov.br/Publicacoes\\_Tecnicas/Tocantins/TO\\_Rel\\_Map\\_Reg\\_Fito\\_Innv\\_Flor/Rel\\_Regioes\\_Fitoecologicas\\_Faixa\\_Centro\\_TO\\_vol1.pdf](http://zoneamento.sefaz.to.gov.br/Publicacoes_Tecnicas/Tocantins/TO_Rel_Map_Reg_Fito_Innv_Flor/Rel_Regioes_Fitoecologicas_Faixa_Centro_TO_vol1.pdf). Acesso em 18 agosto 2021.

\_\_\_\_\_. Lei Estadual nº 1.179/2000, de outubro de 2000. Cria na área que especifica o Monumento Natural das Árvores fossilizadas do estado do Tocantins. Palmas, 18 de outubro de 2000, **Diário Oficial do Estado do Tocantins**, nº 981, p. 21-45. Disponível em: <[https://www.al.to.leg.br/arquivos/23748.pdf#:~:text=Cria%2C%20na%20%20C3%A1rea%20que%20especifica,Fossilizadas%20do%20Estado%20do%20Tocantins.&text=partida.\(NR\)-,\\*Art.,de%2029%2F12%2F2009.>](https://www.al.to.leg.br/arquivos/23748.pdf#:~:text=Cria%2C%20na%20%20C3%A1rea%20que%20especifica,Fossilizadas%20do%20Estado%20do%20Tocantins.&text=partida.(NR)-,*Art.,de%2029%2F12%2F2009.>)>. Acesso 30 mar 2021.

\_\_\_\_\_. **Plano de Prevenção, Manejo e Combate a Incêndios Florestais**. Instituto Natureza do Tocantins. Equipe técnica: AIRES, A.H. CHAVES, E.S. NASCIMENTO, L.R. Filadélfia, TO. 2021. Disponível em <https://central.to.gov.br/download/245472>. Acesso em 20 de agosto de 2022.

SANTOS COSTA, S.S. The role of Paleontological Heritage in: **UNESCO Global Geoparks, EGU General Assembly 2023**, Viena, Áustria, 24–28 de abril de 2023, EGU23-10721, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-10721>, 2023.

SILVA, M. L. A.; ARAÚJO, M. F. V.; CONCEIÇÃO, G. M. Parque Nacional da Chapada das Mesas (Maranhão/Brasil): atividades socioeconômicas dos moradores e seus reflexos. **Revista IberoAmericana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 2, p. 381-392, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.002.0035>.

SISTO, M.; DI LISIO, A.; RUSSO, F. Geosite Assessment as a Tool for the Promotion and Conservation of Irpinia Landscape Geoheritage (Southern Italy). **Resources** 2022, 11, 97. <https://doi.org/10.3390/resources11100097>.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O patrimônio paleontológico da região norte do estado do Tocantins e sudoeste do estado do Maranhão é rico e diversificado, apresentando valores e potenciais de uso significativos que devem ser aproveitados de forma consciente e sustentável. Já há utilização de alguns desses afloramentos, mas existe um considerável conjunto de possibilidades para expandir e aprimorar o aproveitamento dessas áreas em benefício da sociedade e da história natural da região.

Este trabalho teve como objetivo inventariar o patrimônio paleontológico da área em estudo, descrever e avaliar os valores, potenciais de uso e risco de degradação dos geossítios selecionados, além de propor estratégias de uso socioeconômico e educacional dos locais. A caracterização e identificação desses indicadores permitiram estabelecer propostas de uso sustentável e demonstraram que o patrimônio paleontológico pode ser um instrumento relevante para o desenvolvimento socioeconômico da área.

As ocorrências fósseis reportadas para a região são constituídas por restos de animais e plantas, além de vestígios de atividade biológica de dinossauros herbívoros e carnívoros. Com base nos achados mencionados na literatura foram escolhidos para avaliação os geossítios que compõem o Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins (MONAFT), o geossítio Fazenda Malhada Vermelha e o geossítio São Domingos.

Os resultados indicam que esses locais possuem valores significativos e potenciais relevantes para atividades que contribuam para o desenvolvimento socioeconômico na região. Contudo, cada local de relevância paleontológica apresenta peculiaridades para o desenvolvimento de tais ações. O MONAFT está em melhores condições de proteção, conservação e uso, possuindo baixo risco de degradação, relevância internacional, moderado potencial de uso turístico e alto potencial de uso educacional.

O geossítio Fazenda Malhada Vermelha não possui medidas de proteção e não tinha uma descrição profunda e sistemática de seus componentes. A avaliação quantitativa revelou sua relevância internacional, devido ao alto valor científico, além de moderados índices de potenciais de uso educacional e turístico, e risco de degradação. O geossítio São Domingos, apesar de já possuir conhecimento produzido, não tinha avaliações sobre suas limitações de uso e formas concretas de proteção e uso sustentável. Na quantificação, apresentou relevância nacional, moderado potencial de uso educacional e turístico, e alto risco de degradação/perda de seus principais elementos.

As análises e avaliações realizadas permitiram propor medidas de proteção e utilização para cada uma das áreas de acordo com suas particularidades. No MONAFT e no geossítio de pegadas de dinossauros terópodes, os potenciais de uso se sobressaem aos riscos de degradação. No entanto, no geossítio de pegadas de dinossauros saurópodes, os riscos de deterioração superam os potenciais, sendo necessárias medidas de mitigação antes da realização de atividades na área.

Este estudo compilou e ampliou o conhecimento sobre o patrimônio paleontológico da área em estudo, trazendo descrições de afloramentos com pouco conhecimento disponível. Outra contribuição relevante da pesquisa é o novo olhar sobre os ambientes deposicionais na Formação Sambaíba, documentalmente considerada afossilífera nas interpretações vigentes dos seus paleoambientes. A nova proposição de um sistema úmido de sedimentação na unidade levanta a necessidade de estudos geológicos para um entendimento mais profundo e completo das condições ambientais que prevaleceram na transição Triássico-Jurássico da Bacia do Parnaíba.

A pesquisa trabalhou com a hipótese de que a área pesquisada engloba localidades fossilíferas significativas com importância científica, educacional e turística, mas que ainda são pouco conhecidas e exploradas. Esse pressuposto se provou verdadeiro, pois, de acordo com os potenciais analisados, os usos dessas áreas ainda são incipientes. Isso é positivo, pois antes do uso, esses sítios precisam de organização e proteção para a salvaguarda dos elementos neles presentes.

Embora os resultados respondam aos objetivos de investigação propostos, a pesquisa apresenta algumas limitações. O patrimônio paleontológico da área é mais abrangente que o esperado e possui mais valores e potenciais de uso do que os mensurados nesta investigação. Portanto, estudos devem continuar sendo realizados para aumentar e atualizar o conhecimento sobre a riqueza paleontológica da região, propondo estratégias de uso sustentável e proteção desse rico patrimônio.

## REFERÊNCIAS

- ABRAHAMS, M.; BORDY, E.M.; KNOLL, F.; FARLOW, J.O. Theropod Tridactyl Tracks Across the Triassic–Jurassic Boundary in Southern Africa: Implications for Pedal Morphology Evolution. **Frontiers in Ecology and Evolution**, vol. 10, p. 925313, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.925313>.
- ABRANTES, F. R. J.; NOGUEIRA, A. C. R.. Reconstituição paleoambiental das formações Motuca e Sambaíba, Permo-Triássico da Bacia do Parnaíba no sudoeste do Estado do Maranhão, Brasil. **Geologia USP. Série Científica**, São Paulo, v. 13, n. 3, p. 65-82, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X201300030007>.
- ABRANTES, F.R.J. **A zona de contato entre as formações Motuca e Sambaíba, Permo-Triássico da Bacia do Parnaíba, região de Filadélfia (TO), Riachão (MA) e Loreto (MA)**. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.
- AGUIAR, G. A. Revisão Geológica da bacia Paleozóica do Maranhão. In: Congresso Brasileiro De Geologia, 25, 1971, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 1971. v. 3, p. 113-122.
- ALVES, Y.M. Report on the Upper Permian and Lower Cretaceous fossiliferous localities vertebrates-bearing in the centralnorth of Tocantins State, Brazil. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, Uberlândia, v. 1, n. 2, p. 372-386. 2010.
- ANDRADE, L. S.; NOGUEIRA, A. C. R.; SILVA JUNIOR, J. B. C. Evolução de um sistema lacustre árido Permiano, parte superior da Formação Pedra de Fogo, borda oeste da Bacia do Parnaíba. **Geologia USP. Série Científica**, São Paulo, v. 14, p. 39-60, 2014.
- ARAÚJO, R. N.; NOGUEIRA, A. C. R.; BANDEIRA, J.; ANGÉLICA, R. S. Shallow lacustrine system of the Permian Pedra de Fogo Formation, Western Gondwana, Parnaíba Basin, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 67, p. 57-70, 2016.
- ARCE, A.; CAMPELO, F. M. A. C.; MOURA D. H. L.; RIGOTI, C. A.; SCHUAB, F. B. **Bacia do Parnaíba: Uma Revisão Estratigráfica, Tectônica, Estrutural e Sistemas Petrolíferos**. 2006. 84 f. Trabalho Final de Curso (Curso de Especialização em Projeto de Análise de Bacias: Módulo Geologia do Petróleo). Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- ASSIS, F. P.; MACAMBIRA, J. B.; LEONARDI, G. Dinossauros terópodes do Ribeirão das Lajes, primeiro Registro fóssil da Formação Sambaíba (Neotriássico-Eojurássico), Bacia do Parnaíba: Fortaleza dos Nogueiras, Maranhão-Brasil. In: 45° Congresso Brasileiro de Geologia. **Anais...** Belém – PA. Sociedade Brasileira de Geologia, p. 1720, 2010. Disponível em: [http://sbg.sitepessoal.com/anais\\_digitalizados/2010-BEL%C3%89M/2010-BEL%C3%89M.zip](http://sbg.sitepessoal.com/anais_digitalizados/2010-BEL%C3%89M/2010-BEL%C3%89M.zip). Acesso em: 29 ago. 2020.
- BAADI, K.; SABAOU, A.; TEKIOU, B. Methodological Proposal for Assessment Geosites: its Application in Bou-Iblane Region (Middle Atlas, Morocco). **Geoheritage**, v. 12, n. 55, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00476-1>.
- BARROS, J.S.; OLIVEIRA FILHO, J.M.; FREITAS, L.C.B. **Inventário do patrimônio geológico Vale das Águas**: proposta de geoparque, estado do Maranhão. Brasília: CPRM, 2018. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/20813>. Acesso em: 29 ago. 2020.

BAYET-GOLL, A.; DARAI EI, M. Palaeoecological, sedimentological and stratigraphical insights into microbially induced sedimentary structures of the lower Cambrian successions of Iran. **Sedimentology**, v. 67, n. 6, p. 3199–3235, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/sed.12745>.

BENÍCIO, JRW.; SPIEKERMANN, R.; MANFROI, J.; UHL, D.; FABBRIN, E.; JASPER, A. Palaeoclimatic inferences based on dendrological patterns of permineralized wood from the Permian of the Northern Tocantins Petrified Forest, Parnaíba Basin, Brazil. **Palaeobio Palaeoenv**, v. 96, p. 255–264, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12549-015-0218-8>.

BRILHA, J. **Património Geológico e Geoconservação: A Conservação da Natureza na sua Vertente Geológica**. Braga: Editora Palimage, 2005.

BRILHA, J. Inventory and Quantitative Assessment of Geosite and Geodiversity Sites: a Review. **Geoheritage**, v. 8, n. 2, p. 119-134, 2016.

BRUNO, D. E.; CROWLEY, B. E.; GUTAK, J. M.; MORONI, A.; NAZARENKO, O. V.; OHEIM, K. B.; RUBAN, D.; TIESS, G.; ZORINA, S. Paleogeography as geological heritage: Developing geosite classification. **Earth-Sci**. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.06.005>.

CACHÃO, M.; SILVA, C. Introdução do Patrimônio Paleontológico Português: definições e critérios de Classificação. **Genovas**, v. 18, n. 1, p. 13-19, 2004.

CARCAVILLA, L.; LÓPEZ-MARTINÉZ, J.; DURÁN, J. J. Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos. **Cuadernos del Museo Geominero**, Madrid, n. 7, IGME, 2007.

CARCAVILLA, L.; DURÁN, J. J.; GARCÍA-CORTÉS, A.; LÓPEZ-MARTINÉZ, J. Geological heritage and geoconservation in Spain: past, present, and future. **Geoheritage**, v. 1, p. 75-91, 2009.

CAPUTO, M.V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of Northern Basins of Brazil**. 1984. 583p. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade da Califórnia, Santa Barbara, EUA. 1984. Disponível em: [https://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/8961/6/Tese\\_StratigraphyTectonicsPaleoclimatology.pdf](https://repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/8961/6/Tese_StratigraphyTectonicsPaleoclimatology.pdf).

CAPUTO, M. V.; IANNUZZI, R.; FONSECA, V. M. M. Bacias sedimentares Brasileiras: Bacia do Parnaíba. Aracajú-SE: **Informativo da Fundação Paleontológica Phoenix**, n. 81, p. 1-6, 2005.

CARVALHO, I. S. Fósseis: importância econômica e social do patrimônio paleontológico. In: GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. C. O. (org.). **Geoturismo, Geodiversidade e Geoconservação: Abordagens geográficas e geológicas**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2018.

CONCEIÇÃO, D.M.; TAVARES, T.M.V.; CISNEROS, J.C.; KURZAWA, F.; ALENCAR, M.A.; PACÍFICO-FILHO, M.; SILVA-MELO, A.; AIRES, H.A. Geoconservation of Permian Petrified Forests from Northeastern Brazil. In: IANNUZZI, R.; RÖBLER, R.; KUNZMANN, L. (eds.) **Brazilian Paleofloras**. Springer, Cham, 2020. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-90913-4\\_13-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-90913-4_13-1).

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil - Escala 1:250.000.** Brasília - DF: CPRM/DIEDIG/DEPAT. Disponível em: < <https://geosgb.cprm.gov.br/geosgb/downloads.html>>. Acesso em 10 jan 2021.

CUADRADO, D.G.; *et al.* Microbially-Induced Sedimentary Structures (MISS) as Record of Storm Action in Supratidal Modern Estuarine Setting. **Sedimentary Geology**, v. 296, p. 1–8, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2013.07.006>.

CUNHA, F. M. B. **Evolução paleozóica da Bacia do Parnaíba e seu arcabouço tectônico.** 1986, p. 107. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1986.

DENTZIEN-DIAS, P.C.; BERTONI-MACHADO, C. New discovers of dinosaurs footprints from Late Jurassic(?) Guará Formation, Southern Brazil. In: **Resúmenes. XXI Jornadas Argentinas de Paleontología de Vertebrados**, vol. 1, p. 15, 2005.

DENTZIEN-DIAS, P.C.; SCHULTZ, C.L.S.; SCHERER, C.M.S.; LAVINA, E.L.C. The fossil record from Guará Formation (Upper Jurassic), Southern Brazil. In: **Anais do II Congresso Latino-Americano de Paleontología de Vertebrados**, p. 93, 2005.

DE VALAIS, S.; CANDEIRO, C. R.; TAVARES, L. F.; ALVES, Y. M.; CRUVINEL, C. Current situation of the ichnological locality of São Domingos from the Corda Formation (Lower Cretaceous), northern Tocantins State, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 61, p. 142-146, 2015.

DIAS, P.C.D.; SCHULTZ, C.L.S. Estimated speeds of Dinosaurs trackways from Guará formation, Rio Grande do Sul, Brazil. **Paleontologia em Destaque**, n. 20, p. 38-39, 2005.

DIAS-BRITO, D.; ROHN, R.; CASTRO, J.C.; DIAS, R.R.; RÖBLER, R. Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional: O mais exuberante e importante registro florístico tropical-subtropical permiano no Hemisfério Sul. In: WINGE, M.; SCHOBENHAUS, C.; BERBERT-BORN, M.; QUEIROZ, E.T.; CAMPOS, D.A.; SOUZA, C.R.G.; FERNANDES, A.C.S. (eds.), **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. Brasília: CPRM, 2009. Disponível em: <https://sigep.eco.br/sitio104/sitio104.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2019.

DINO, R.; ANTONIOLI, L.; BRAZ, S. M. N. Palynological data from the Trisidela Member of Upper Pedra de Fogo Formation (“Upper Permian”) of the Parnaíba Basin, northeastern Brazil. **Revista Brasileira de Paleontologia**, p. 24-35, 2002.

ERIKSTAD, L. Geoheritage and geodiversity management – the questions for tomorrow. **Proceedings of the Geologists' Association**, v. 124, Issue 4, p. 713-719, 2013.

GARCÍA-CORTÉS, A. CARCAVILLA URQUÍ, L. **Documento metodológico para La elaboración del inventario español de lugares de interés geológico (IELIG)**, Version 12. Instituto Geológico Y Minero De España, Madrid. 2009.

FARLOW, J.O.; CHAPMAN, R.E. The scientific study of dinosaur footprints. In: Farlow, J.O.; Brett–Surman, M.K. (eds.), **The Complete Dinosaur**, p. 519–553. Indiana University Press, Bloomington, 1997.

FARIA JR, L. E. C. **Estudo sedimentológico da Formação Pedra de Fogo – Permiano – Bacia do Maranhão.** Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1979.

FARIA JR, L. E. C.; TRUCKENBRODT, W. Estratigrafia e petrografia da Formação Pedra de Fogo – Permiano da Bacia do Maranhão. In: SBG, **Anais...** 31º Congresso Brasileiro de Geologia, Balneário Camboriú. v. 2, p. 740-754, 1980.

FALKINGHAM, P.L.; MARTY, D.; RICHTER, M. (eds): **Dinosaur Tracks: the Next Steps**. Indiana University Press, 2016.

FARSANI, N.T.; COELHO, C.O.A.; COSTA, C.M.M.; AMRIKAZEMI, A. Geo-knowledge Management and Geoconservation via Geoparks and Geotourism. **Geoheritage**, v. 6, p. 185–192, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0099-7>.

FASSOULAS, C.; MOURIKI, D.; DIMITRIOU-NIKOLAKIS, P.; ILIOPOULOS, G. Quantitative assessment of geotopes as an effective tool for geoheritage management. **Geoheritage**, v. 4, n. 3, p. 177-193, 2012.

FERNANDES, G.; DELLA PIAZZA, H. O potencial oleogenético da Formação Codó. **BoI. Tecn. Petrobrás**. 21 (1): 3-16. 1978.

GARCÍA, A.; CARCAVILLA, L. **Documento Metodológico Para la Elaboración del Inventario Español de Lugares de Interés Geológico (IELIG)**. Área de Pesquisa do Patrimônio Geológico e Mineiro do IGME. Madri, Espanha, p. 61. 2009.

GARCIA, M.D.; NASCIMENTO. M.A.L.; MANSUR, K.L.; PEREIRA, R.G.F.A. Geoconservation Strategies Framework in Brazil: Current Status from the Analysis of Representative Case Studies. **Environmental Science & Policy**, v. 128, fevereiro de 2022, p. 194–207. DOI <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.11.006>.

GERDES, G. What are microbial mats? In: Seckbach J, Oren A (eds) **Microbial mats: modern and ancient microorganisms in stratified systems**. Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology. Springer, v. 14, pp. 5–25, 2010.

GLENNIE, K. W., BULLER, A. T. The Permian Weissliegendes of N.W. Europe: the partial deformation of aeolian dune sand caused by the Zechstein transgression. **Sedimentary Geology**, 35(1), 43-81. 1983. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(83\)90069-6](https://doi.org/10.1016/0037-0738(83)90069-6).

GRAY, M. **Geodiversity: Valuing and conserving abiotic nature**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. 448p. 2004.

\_\_\_\_\_. **Other nature: geodiversity and geosystem services**. *Environ Conserv*, v. 38, n. 3, p. 271–274, 2013.

\_\_\_\_\_. Geodiversity, geoheritage and geoconservation for society. **International Journal of Geoheritage and Parks**, v. 7, p. 226-236, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2019.11.001>.

GÓES, A. M. O.; FEIJÓ, F. J. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 8, p. 57-67, 1994. Disponível em <https://bgp.petrobras.com.br/bgp/article/view/581>.

Haidar, R.F; FAGG, J.M.F; PINTO, J.R.R; DIAS, R.R; DAMASCO, G; SILVA, L.C.R; FAGG, C.W. Florestas estacionais e áreas de ecótono no estado do Tocantins, Brasil: parâmetros estruturais, classificação das fitofisionomias florestais e subsídios para conservação. **Acta Amazônica**, v. 43, n. 3, p. 261-290, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/MHhVg577jNybyYRc96D9bqM/abstract/?lang=pt>. Acesso em 05 ago. 2023.

- HENDRICKX, C.; HARTMAN, S. A.; MATEUS, O. An overview of non-avian theropod discoveries and classification. **PalArch's Journal of Vertebrate Palaeontology**, v. 12, p. 1–73, 2015.
- HENRIQUES, M. H.; PENA DOS REIS, R.; BRILHA, J.; MOTA, T. S. Geoconservation as an emerging geoscience. **Geoheritage**, v. 3, n. 2, p. 117–128, 2011.
- HENRIQUES, M. H.; PENA DOS REIS, R. Framing the Palaeontological Heritage Within the Geological Heritage: An Integrative Vision. **Geoheritage**, v. 7, p. 249-259, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0141-9>.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malhas Territoriais 2018**. Rio de Janeiro. 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?edicao=24048&t=downloads>
- \_\_\_\_\_. **Panorama do censo demográfico 2022**. Rio de Janeiro: IBGE; 2023. Acesso em 20 julho 2022. Disponível em <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. DSR - Divisão de Sensoriamento Remoto. **Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil - Topodata**. 2011. Disponível em < <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>>. Acesso 20 agosto 2021.
- KAUFFMANN, M.; RICARDI-BRANCO, F.; FABBRIN, E. P. O.; BENÍCIO, W. J.; JASPER, A. Resultados preliminares do resgate de fitofósseis no Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins, Bacia do Parnaíba, Tocantins, Brasil. **Revista Geonomos - Vol. 21, n. 2**. 10.18285/geonomos.v21i2.271. p. 46–52, 2013.
- KLEIN, H.; et al. First Occurrence of a Middle Triassic Tetrapod Ichnofauna from the Argana Basin (Western High Atlas, Morocco). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 307, n. 1–4, p. 218–31, julho de 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.05.021>.
- NOFFKE, N. **Geobiology: Microbial Mats in Sandy Deposits from the Archaean Era to Today**. Springer, 2010.
- LEONARDI, G. **Glossary and Manual of Tetrapod Footprint Palaeoichnology**. DNPM, Brazil. 117p. 1987.
- LEONARDI, G. **Annotated atlas of South America Tetrapod Footprints (Devonian to Holocene)**. CPRM, 1994.
- LINDOSO, R.M.; CARVALHO, I.S. Paleoambientes e paleoclima durante o Aptiano na Bacia do Parnaíba (Formação Codó), Nordeste do Brasil. In: CARVALHO, I.S. (Org.). **Paleontologia: cenários da vida**. Rio de Janeiro: Interciência. v. 4. p. 165-173. 2014.
- LIMA, E. A. M.; LEITE, J. F. **Projeto estudo global dos recursos Minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba**. Integração geológico-metalogenética, Relatório Final da Etapa III. Recife – PE: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1978.
- LOPES, R. F.; CANDEIRO, C. R. A.; LIMA, C. V. Patrimônio Geológico: síntese terminológica e evolução conceitual. **BIODIVERSIDADE**, v. 19, p. 61-68, 2020.
- LOPES, R.F.; CANDEIRO, C.R.A.; DE VALAIS, S. Geoconservation of the paleontological heritage of the geosite of dinosaur footprints (sauropods) in the locality of São Domingos, municipality of Itaguatins, state of Tocantins, Brazil. **Environ Earth Sci**, v. 78, p. 707, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8722-1>.

LOPES, R.F; LIMA, C. V.; CANDEIRO, C.R.A. The Paleontological Heritage of Northern Tocantins State and Southwest Maranhão State, Brazil: a Preliminary Synthesis. *Terr@ Plural*, v. 15, p. 1–13, 2021. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/tp/article/view/17157>. Acesso em: 20 jan. 2022.

LOPES, R.F; LIMA, C.V.; CANDEIRO, C.R.A. The geoheritage in the north of Tocantins state and southwest of Maranhão state, Brazil. *Ateliê Geográfico*, Goiânia, v. 16, n. 3, p. 40–58, 2022. DOI: 10.5216/ag.v16i3.73370. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/atelie/article/view/73370>. Acesso em: 27 mar. 2023.

MARANHÃO. **Zoneamento Econômico Ecológico do Maranhão**. Secretaria de Estado de Programas Estratégicos. São Luís. 2018. Disponível em < <http://www.zee.ma.gov.br/Portal/basededados/cerrado> >. Acesso em 18 agosto de 2021.

MARQUES, R. M. **Bacia do Parnaíba: estado atual do conhecimento e possibilidades para a produção de gás natural**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Faculdade de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010. Disponível em: [https://bdm.ufpa.br:8443/jspui/bitstream/prefix/1809/1/TCC\\_BaciaParnaibaEstado.pdf](https://bdm.ufpa.br:8443/jspui/bitstream/prefix/1809/1/TCC_BaciaParnaibaEstado.pdf).

MEHDIOUI, S.; EL HADI, H.; TAHIRI, A.; BRILHA, J; EL HAIBI, H.; TAHIRI, M. Inventory and Quantitative Assessment of Geosites in Rabat-Tiflet Region (North Western Morocco): Preliminary Study to Evaluate the Potential of the Area to Become a Geopark. *Geoheritage*, v. 12, n. 35, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00456-5>.

MELO, M. T., PRADE, G. O. **Geologia da região Sudeste de São Raimundo das Mangabeiras – Maranhão**. Belém: PETROBRÁS, DIREX/RENOR. Relatório 297. 1968.

MELCHOR, R.N.; DE VALAIS, S. A review of Triassic tetrapod track assemblages from Argentina. *Palaeontology*, v. 49, n. 2, p. 355-379, 2006.

MORENO, K.; et al. Large theropod dinosaur footprint associations in western Gondwana: Behavioural and palaeogeographic implications. *Acta Palaeontologica Polonica*, v. 57, n. 1, p. 73–83, 2012.

MOURA, P.; GARCIA, M.G.M.; BRILHA, J. Identificação de Sítios Geológicos para Gestão Prioritária: Propostas para a Geoconservação no Domínio Ceará Central, Nordeste do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*. Rio de Janeiro, v. 41, n. 2, p. 252-267, 2018.

MSR/OIKOS. **Plano de manejo do Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins**. Brasília: MRS, 2005. Informações gerais da UC. (Encartes: 1, 4). Disponível em: [https://www.terrabrasilis.org.br/ecotecadigital/images/Plano\\_de\\_Manejo\\_Encarte\\_3\\_-\\_UC\\_e\\_Zona\\_de\\_Amortecimento.pdf](https://www.terrabrasilis.org.br/ecotecadigital/images/Plano_de_Manejo_Encarte_3_-_UC_e_Zona_de_Amortecimento.pdf) Acesso em 20 ago 2022.

NASCIMENTO, M. A. L.; RUCHKYS, Ú. A.; MANTESSO NETO, V. **Geodiversidade, Geoconservação e Geoturismo: trinômio importante para a proteção do patrimônio geológico**. 1ª ed. Sociedade Brasileira de Geologia, São Paulo - SP, 2008.

NASCIMENTO, M. A. L.; MANSUR, K. L.; MOREIRA, J. C. Bases conceituais para entender Geodiversidade, patrimônio geológico, geoconservação e geoturismo. *Revista Equador*, vol. 04, n° 03, Edição especial 02, Teresina-PI, 2015.

NASCIMENTO, M.A.L.; SILVA, M.L.N. da, ALMEIDA, M.C. de et al. Evaluation of Typologies, Use Values, Degradation Risk, and Relevance of the Seridó Aspiring UNESCO

Geopark Geosites, Northeast Brazil. **Geoheritage**. 13, 25, 2021.  
<https://doi.org/10.1007/s12371-021-00542-2>.

NOFFKE, N. Geobiology - a holistic scientific discipline. **Palaeogeogr, Palaeoclimatol, Palaeoecol**, v. 219, n. 1–2, p. 1–3, 2005.

OLIVEIRA, W.R.; COROIOLANO, L. N. M. T. Áreas protegidas e atividade turística no Brasil: o Parque Nacional da Chapada das Mesas, Maranhão. In: EGAL, XIV, 2013, Peru. **Anais...** Peru: EGAL, 2013.

OLSEN, P.E.; SMITH, J.B.; MCDONALD, N.G. Type material of the type species of the classic theropod footprint genera Eubrontes, Anchisauripus, and Grallator (Early Jurassic, Hartford and Deerfield Basins, Connecticut and Massachusetts, USA). **Journal of Vertebrate Paleontology**, v. 18, p. 586-601, 1998.

PAGE, K. N. Fossils, Heritage and Conservation: Managing Demands on a Precious Resource. In: REYNARD & BRILHA. **Geoheritage: Assessment, Protection, and Management**. Amsterdã: Elsevier, 2018, pp. 102-128.

PINTO, C. P.; SAD, J. H. G. Revisão da estratigrafia da Formação Pedra de Fogo, borda sudoeste da Bacia do Parnaíba. In: SBP, 34º Congresso Brasileiro de Paleontologia, Goiás, **Anais**, v. 1, p. 346-356, 1986.

PIRANHA, JM, APARECIDA DEL LAMA, E; DE LA CORTE BACCI, D. Geoparks in Brazil—strategy of Geoconservation and Development. **Geoheritage**, v. 3 , p. 289–298, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12371-011-0043-z>.

PLUMMER, F. B.; PRICE, L. I.; GOMES, F. A. Estados do Maranhão e Piauí. In: **Brasil, Conselho Nacional de Petróleo, relatório de 1946**. Rio de Janeiro, p. 87-134, 1948.

PROSSER, C. D.; BROWN, E. J.; LARWOOD, J. G.; BRIDGLAND, D. R. Geoconservation for science and society: challenges and opportunities. **Proc Geol Assoc**, v. 124, n. 4, p. 559–730, 2013. doi:10.1016/j.pgeola.2011.01.007.

PONCIANO, L. C. M. O.; CASTRO, A. R. S. F.; MACHADO, D. M. C.; FONSECA, V. M. M.; KUNZLER, J. Patrimônio Geológico-Paleontológico in situ e ex situ: definições, vantagens, desvantagens e estratégias de conservação. In: I. S. Carvalho et al. (orgs.). **Paleontologia: Cenários de Vida**. Rio de Janeiro: Interciência, v. 4, p. 460-472, 2011.

RAMOS, M. I. F.; ROSSETI, D. F.; PAZ, J. D. S. Caracterização e significado Paleoambiental da Fauna de Ostracodes da Formação Codó (Neoaptiano), Leste da Bacia de Grajaú, MA, Brasil. **Rev. bras. paleontol.**, v. 9, n. 3, p. 339-348, 2006.

REYNARD, E. The assessment of geomorphosites. In: Reynard E, Coratza P, Regolini-Bissig G (eds) **Geomorphosites**. Verlag Dr. Friedrich Pfeil, Munchen, p. 240, 2009.

REYNARD, E.; BRILHA, J. (Edts.). **Geoheritage: assessment, protection and management**. Elsevier, Amsterdam, 450p, 2018.

REZENDE, W. M.; PAMPLONA, H. R. P. **Estudo do desenvolvimento do Arco Ferrer – Urbano Santos**. Boletim Técnico da Petrobrás, v. 13, n. 1, p 5-14, 1970.

RIBEIRO, L. C. B.; WINTER, C. V. P.; MARTINELLI, A. G.; NETO, F. M.; TEIXEIRA, V. P. A. O Patrimônio Paleontológico como elemento de desenvolvimento social, econômico e cultural: Centro Paleontológico Price e Museu dos Dinossauros, Peirópolis, Uberaba (MG). In: I. S. Carvalho, N. K. Srivastava, L. Strohschoen Jr., C. C. Lana (orgs.). **Paleontologia:**

- Cenários de Vida. Editora Interciência, vol 3, Rio de Janeiro, Brasil, ISBN: 978-85-7193-274-6, 2011.
- RÖßLER, R. & GALTIER, J. First Grammatopteris tree ferns from the Southern Hemisphere – new insights in the evolution of the Osmundaceae from the Permian of Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 121, p. 205-230, 2002.
- RÖßLER, R. & GALTIER, J. The first evidence of the fern Botryopteris from the Permian of the Southern Hemisphere reflecting growth form diversity. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 127, p. 99-124, 2003.
- ROCHA, J.; BRILHA, J.; HENRIQUES, M. Assessment of the geological heritage of Cape Mondego Natural Monument (Central Portugal). **Proceedings of the Geologists' Association** (125), pp 107- 113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pgeola.2013.04.005>, 2014.
- ROJAS-LÓPEZ, J. Los desafíos del estudio de la geodiversidad. **Revista Geográfica Venezolana**, v. 46, p. 143 – 152, 2005.
- SANTOS, M. E. C. M.; CARVALHO, M. S. S. **Paleontologia das bacias do Parnaíba, São Luís e Grajaú: Reconstituições paleobiológicas**. CPRM, Rio de Janeiro – RJ, v. 1, 212 p, 2009.
- SANTOS COSTA, S.S. The role of Paleontological Heritage in: UNESCO Global Geoparks. **Conference Proceedings... EGU General Assembly 2023**, Viena, Áustria, 24–28 de abril de 2023, EGU23-10721. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-10721>, 2023.
- SCHERER, C.M.S.; LAVINA, E.L.C. Sedimentary cycles and facies architecture of aeolianefluvial strata of the Upper Jurassic Guará Formation, Southern Brazil. **Sedimentology**, v. 52, p. 1323e1341, 2005.
- SCHULTZ, C.L.; DIAS, P.C.D.; SCHERER, C.M.S.; LAVINA, E.L.C. Icnofósseis da Formação Guará (Jurássico Superior?), Bacia do Paraná, RS. In: **Anais ... XVIII Congresso Brasileiro de Paleontologia**, pp. 256e257, 2003.
- SERRANO, E.; RUIZ-FLAÑO, P. Geodiversity: A theoretical and applied concept. **Geographica Helvetica**, v. 62, p. 140-147, 2007.
- SHARPLES, C. **Concepts and principles of geoconservation**. Documento em PDF disponibilizado na Tasmanian Parks & Wildlife Service website, 2002. Disponível em: <https://dpiwwe.tas.gov.au/Documents/geoconservation.pdf>. Acesso em 20 de novembro de 2020.
- SILVA, R.C.; CARVALHO, I.S.; FERNANDES, A.C.S. Pegadas de dinossauros do Triássico (Formação Santa Maria) do Brasil. **Ameghiniana**, v. 45, n. 4, p. 783-790, 2008. Disponível em: [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0002-70142008000400011&lng=es&tlng=pt](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-70142008000400011&lng=es&tlng=pt).
- SILVA, M. L. A.; ARAÚJO, M. F. V.; CONCEIÇÃO, G. M. Parque Nacional da Chapada das Mesas (Maranhão/Brasil): atividades socioeconômicas dos moradores e seus reflexos. **Revista IberoAmericana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 2, p. 381-392, 2020. DOI <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.002.0035>.
- SISTO, M.; DI LISIO, A.; RUSSO, F. Geosite Assessment as a Tool for the Promotion and Conservation of Irpinia Landscape Geoheritage (Southern Italy). **Resources**, v. 11, p. 97, 2022. <https://doi.org/10.3390/resources11100097>.

STANLEY, M. **Geodiversity strategy**. Progeo NEWS, Londres, v. 8, p. 6 – 9, 2001.

TAVARES, L.F.S.; DE VALAIS, S.; ALVES, Y.M.; CANDEIRO, C.R.A. Amazonian Lower Cretaceous North Tocantins State (Brazil) dinosaur track site: conservation significance. **Environ Earth Sci**, v. 73, p. 142–126, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3754-z>.

TOCANTINS. **Zoneamento Econômico Ecológico**. Secretaria de Planejamento e da Modernização da Gestão Pública (Seplan). Palmas: Seplan/DZE, 2013. Disponível em [http://zoneamento.sefaz.to.gov.br/Publicacoes\\_Tecnicas/Tocantins/TO\\_Rel\\_Map\\_Reg\\_Fito\\_Inv\\_Flor/Rel\\_Regioes\\_Fitoecologicas\\_Faixa\\_Centro\\_TO\\_vol1.pdf](http://zoneamento.sefaz.to.gov.br/Publicacoes_Tecnicas/Tocantins/TO_Rel_Map_Reg_Fito_Inv_Flor/Rel_Regioes_Fitoecologicas_Faixa_Centro_TO_vol1.pdf). Acesso em 18 ago. 2021.

\_\_\_\_\_. Lei Estadual nº 1.179/2000, de outubro de 2000. Cria na área que especifica o Monumento Natural das Árvores fossilizadas do estado do Tocantins. Palmas, 18 de outubro de 2000, **Diário Oficial do Estado do Tocantins**, n° 981, p. 21-45. Disponível em: [https://www.al.to.leg.br/arquivos/23748.pdf#:~:text=Cria%2C%20na%20%C3%A1rea%20que%20especifica,Fossilizadas%20do%20Estado%20do%20Tocantins.&text=partida.\(NR\)-,\\*Art.,de%2029%2F12%2F2009..](https://www.al.to.leg.br/arquivos/23748.pdf#:~:text=Cria%2C%20na%20%C3%A1rea%20que%20especifica,Fossilizadas%20do%20Estado%20do%20Tocantins.&text=partida.(NR)-,*Art.,de%2029%2F12%2F2009..) Acesso 30 mar 2021.

\_\_\_\_\_. **Plano de Prevenção, Manejo e Combate a Incêndios Florestais**. Instituto Natureza do Tocantins. Equipe técnica: AIRES, A.H. CHAVES, E.S. NASCIMENTO, L.R. Filadélfia, TO. 2021. Disponível em <https://central.to.gov.br/download/245472>. Acesso em 20 de ago. de 2022.

THULBORN, T. **Dinosaur Tracks**. Chapman and Hall, London, 1990.

VAZ, P. T.; REZENDE, N. G. A.; WANDERLEY FILHO, J. R.; TRAVASSOS, W. A. S. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, 15: 253-263. 2007. Disponível em <https://bgp.petrobras.com.br/bgp/article/view/308>.

VIANA, M. S. S.; CARVALHO, I. S. **Patrimônio Paleontológico**. Editora Interciência, 1ª ed. Rio de Janeiro – RJ, 158 p, 2019.

WIMBLEDON, W.; ANDERSEN, S.; CLEAL, C. J.; COWIE, J. W. Geological World Heritage: GEOSITES - A global comparative site inventory to enable prioritisation for conservation. **Mem Descrittive Della Carta Geol D'Italia**, v. 54, p. 45-60, 1999.

ZALÁN, P. V. **Influence of Pré-Andean orogenies on the Paleozoic Intracratonic Basins of South América**. IV Simposio Bolivariano - Exploracion Petrolera en las Cuencas Subandinas, v. 1, n. 7. Bogotá. 1999. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.115.008eng>.