

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

Domingas Maria da Conceição

**PROSPECÇÃO, MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE DEPÓSITOS
FITOFOSILÍFEROS DA PORÇÃO NORDESTE DA BACIA SEDIMENTAR DO
PARNAÍBA (FORMAÇÃO PEDRA DE FOGO, PERMIANO)**

Dissertação de Mestrado

RECIFE, PE
2016

Domingas Maria da Conceição

**PROSPECÇÃO, MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE DEPÓSITOS
FITOFOSILÍFEROS DA PORÇÃO NORDESTE DA BACIA SEDIMENTAR DO
PARNAÍBA (FORMAÇÃO PEDRA DE FOGO, PERMIANO)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, orientada pelo Prof. Dr. Juan Carlos Cisneros e coorientada pelo Prof. Dr. Roberto Iannuzzi (UFRGS), como requisito obrigatório para a obtenção do grau de Mestre em Geociências, área de concentração em Geologia Sedimentar e Ambiental.

RECIFE, PE
2016

Catalogação na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

C744p Conceição, Domingas Maria da.
Prospecção, mapeamento e caracterização de depósitos fitofossilíferos da porção nordeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba (Formação Pedra de Fogo, Permiano) / Domingas Maria da Conceição . - 2016.
121folhas, Il.; e Tab.

Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Cisneros.
Coorientador: Prof. Dr. Roberto Iannuzzi.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação Geociências, 2016.
Inclui Referências, e Anexos.

1. Geociências. 2. Floresta petrificada. 3. Gimnospermas.
4. Pteridófitas. 5. Permiano. 6. Cisuraliano. I. Cisneros, Juan Carlos.
(Orientador). II. Iannuzzi, Roberto. (Coorientador).

UFPE

551 CDD (22. ed.)

BCTG/2016-127

**PROSPECÇÃO, MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE DEPÓSITOS
FITOFOSSILÍFEROS DA PORÇÃO NORDESTE DA BACIA SEDIMENTAR DO
PARNAÍBA (FORMAÇÃO PEDRA DE FOGO, PERMIANO)**

Domingas Maria da conceição

APROVADA

19 de fevereiro de 2016

Prof. Dr. Juan Carlos Cisneros (orientador)
Universidade Federal do Piauí (Teresina)

Prof.^a Dr.^a Tatiane Marinho Vieira Tavares (Examinador Externo)
Universidade Federal do Tocantins (Araguaína)

Prof.^a Dr.^a Paula Andréa Sucerquia Rendón (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco (Recife)

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, quero expressar imensamente meus agradecimentos aos meus orientadores, Dr. Juan Carlos Cisneros (UFPI) e Dr. Roberto Iannuzzi (UFRGS), por me apresentarem ao mundo da Paleontologia e pela orientação durante o desenvolvimento desta dissertação, apoio em todos os momentos, viabilizando, na medida do possível, todas as etapas deste trabalho e, sobretudo, sou muito grata, pela confiança em mim depositada. A vocês, meu muito obrigada!

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado.

À profa. Dr^a. Alcina Magnólia (UFPE), pela orientação inicial neste trabalho.

Ao Geólogo Luiz Saturnino de Andrade (UFPA), por sua valiosa contribuição na caracterização geológica dos afloramentos, que enriqueceram de forma considerável as discussões do presente trabalho.

Aos membros da banca examinadora por terem aceitado o convite e contribuído para a melhoria deste trabalho.

À Pós-Graduação em Geociências (UFPE), pelo espaço cedido, e a todos os funcionários sempre muito receptivos e dispostos a ajudar.

Quero registrar, aqui, o companheirismo dos meus queridos amigos do grupo “Arqueoantipáticos”, Mayana, Pety, Kalio, Aline, Júnior, Natália, Karoline, Felipe Rocha, Felipe, João e Adna, aos quais sou muito grata, pela compreensão dos meus refúgios em Teresina, para o bom andamento deste trabalho.

Às minhas amigas e colegas do Laboratório de Paleontologia da UFPI, Renata Larissa, Sara Cristina, Andressa, Keyla e Raphaela, agradeço pelos bons momentos compartilhados. Obrigado especial à Renata Larissa por sua valiosa contribuição nas etapas de campo (o campo mais difícil e ao mesmo tempo, mais engraçado que já fizemos!).

Aos queridos amigos e colegas da Pós-Graduação “Grupo Pós-rifte”, Emmariele, Athos, Léo, Camilla, Marcelo, Luciana, Eduardo, Isla, Thamires, Hewerton, Ravi Felipe e Fernando, sou grata pelos momentos tensos que dividimos na “tão temida disciplina de Sedimentologia”, e claro, pelo companheirismo e os bons momentos compartilhados.

Aos meus queridos amigos que tive o prazer de dividir apartamento em Recife, Ludmila e Anderson, obrigada pelos bons e felizes momentos que dividimos, e pelas contribuições neste trabalho em meus momentos de desespero!

Ao querido Luis Carlos Duarte Cavalcante (UFPI), por sua amizade, carinho paciência e apoio. Por estar sempre que possível disponível, quando precisei dos seus conselhos e ajuda. Você foi e sempre será um exemplo a ser seguido!

À toda minha família, por compreender a minha ausência.

Finalmente, ao Willian M. K. Matsumura, por todo seu apoio e disponibilidade nos momentos finais desta dissertação.

RESUMO

Os afloramentos fitofossilíferos da margem nordeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba, em estratos do Permiano (Cisuraliano) da Formação Pedra de Fogo, ainda estão pouco estudados. Este trabalho visou o reconhecimento e análise de alguns dos afloramentos da margem supracitada, tendo se concentrado no estudo de áreas nos municípios de Altos, no Piauí, e de Duque Bacelar e Coelho Neto, no Maranhão. Em Altos, detectou-se em um único afloramento, uma associação autóctone?/parautóctone, dominada por grandes lenhos gimnospérmicos (com até 1,80 m de diâmetro). A área de Duque Bacelar e Coelho Neto apresentou mais de cinco afloramentos contendo associações formadas, especialmente, por lenhos gimnospérmicos de grande porte (de até 1,15 m de diâmetro), alguns em posição de vida, e, secundariamente, por caules de pteridófitas horizontalizados, e.g. *Psaronius* sp. (com até 5 m de comprimento). Análises espectroscópicas em amostras de fósseis do Maranhão apresentaram um elevado nível de sílica e a permanência residual de carbono amorfo, evidenciando nestes troncos um processo de permineralização por sílica. Foram confeccionadas lâminas petrográficas de troncos fósseis com o intuito de verificar o grau de preservação de tecidos e determinar o seu potencial para futuras análises taxonômicas. Finalmente, foi possível corroborar que as associações encontram-se inseridas em rochas lacustres da base da Formação Pedra de Fogo (Membro Sílex Basal), próximas ao contato com a infrajacente Formação Piauí (Carbonífero, Pensilvaniano). Esta observação contrasta com estudos anteriores, realizados na margem sudoeste da bacia, que referem o posicionamento dos fitofósseis na parte superior da Formação Pedra de Fogo (Membro Trisidela) ou, ainda, na sobrejacente Formação Motuca.

PALAVRAS-CHAVE: Floresta petrificada. Gimnospermas. Pteridófitas. Piauí. Maranhão. Bacia do Parnaíba. Permiano. Cisuraliano.

ABSTRACT

Petrified plant-bearing outcrops of lower Permian (Cisuralian) strata of the Pedra de Fogo Formation located in the northeastern margin of the Parnaíba Sedimentary Basin, are still poorly studied, and dominated mostly by gymnosperm trunks and, rarely, pteridophyte stems (*Psaronius* sp.). This work aimed prospection and analysis of some of the outcrops in the aforementioned margin of the basin, being focused on two new areas in the municipalities of Altos, Piauí state, and Duque Bacelar-Coelho Neto, Maranhão state. In Altos, an autochthonous?/parautochthonous assemblage dominated by huge gymnosperm trunks (reaching 1,8 m in diameter) was recorded in a single outcrop. The Duque Bacelar-Coelho Neto area evinced more than five exposures formed mostly by large gymnosperm trunks, some of them in life position (reaching 1,15 m in diameter) and, less often, by pteridophyte stems in horizontal position, e.g. *Psaronius* sp. (reaching 5 m long). Invertebrate traces and stromatolites are exposed here too. Spectroscopic analyses in fossil samples from Maranhão showed a high concentration of silica and the residual presence of amorphous carbon, evincing a process of silica-permineralization. Petrographic thin-sections of fossil trunks were produced in order to verify the degree of tissue preservation and determinate its potential for future taxonomic analyses. Finally, it was possible to assess that these assemblages are placed within lacustrine rocks at the base of the Pedra de Fogo Formation (Sílex Basal Member), close to the contact with the underlying Piauí Formation (Carboniferous, Pennsylvanian). This observation contrasts with former studies made at the southwestern margin of the basin that refer the placement of fossil-plant horizons of the Pedra de Fogo Formation to the uppermost Trisdela Member or even to the overlying Motuca Formation.

KEYWORDS: Petrified forest. Gymnosperms. Pteridophytes. Piauí. Maranhão. Parnaíba Basin. Permian. Cisuralian.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Mapa da Bacia Sedimentar do Parnaíba mostrando os municípios onde se localizam os afloramentos fitofossilíferos estudados neste trabalho, e a FFRP e MNAFTO, ocorrências já descritas para o Permiano da Bacia do Parnaíba.....14
- Figura 2: Divisão da “Província Parnaíba” em quatro bacias menores: bacias do Parnaíba (Siluriano-Triássico), das Alpercatas (Jurássico-Cretáceo), do Grajaú (Cretáceo) e do Espigão-Mestre (Cretáceo). Modificado de Góes (1995).....15
- Figura 3: Alguns procedimentos utilizados em campo durante o georreferenciamento dos fósseis nos afloramentos. A- procedimentos de medidas do comprimento dos troncos; B- limpeza para evidenciar os fósseis; C- retirada da matriz sedimentar que cobria o fóssil; D- atribuição de um código de campo ao fóssil; E, elaboração de seções estratigráficas.23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sequências deposicionais da Bacia do Parnaíba (sensu Vaz et al., 2007 e Góes, 1994) com descrição da litologia e interpretações paleoambientais.....	16
Tabela 2: Vegetais fósseis descritos para o Permiano da Bacia Sedimentar do Parnaíba (modificado de Neregato, 2012).....	20

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	11
1. REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
1.1 Bacia Sedimentar do Parnaíba.....	13
1.1.1 Geologia e Estratigrafia da Bacia Sedimentar do Parnaíba	14
1.1.2 Formação Pedra de Fogo	17
1.1.3 Litologia e Estratigrafia	17
1.1.4 Estado da arte sobre os vegetais fósseis do Permiano da Bacia do Parnaíba	18
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	22
2.1 MATERIAL	22
2.2 MÉTODOS.....	22
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	25
Novo registro de uma Floresta Petrificada em Altos, Piauí: relevância e estratégias para geoconservação;.....	256
New petrified forest in Maranhão, Permian (Cisuralian) of the Parnaíba Basin, Brazil; ...	252
Spectroscopic studies on Permian plant fossils in the Pedra de Fogo Formation from the Parnaíba Basin, Brazil.	91
4.CONCLUSÕES	107
4.1 Prospecção e georreferenciamento	107
4.2 Caracterização geológica-sedimentar	,107
4.3 Análises espectroscópicas.....	108
4.4 Investigação taxonômica	109
4.5 Geoconservação e medidas de proteção	109
4.6 Propostas para continuidade das pesquisas na área	110
REFERÊNCIAS	111
ANEXOS	116

INTRODUÇÃO

Este estudo objetivou a realização de trabalhos prospectivos, de georreferenciamento e caracterização de afloramentos fitofossilíferos em estratos da Formação Pedra de Fogo (Permiano inferior), situados na margem nordeste da Bacia do Parnaíba (Figura 1). De forma específica, procurou-se contribuir com dados preliminares a cerca de aspectos tafonômicos e taxonômicos para os sítios catalogados neste trabalho. Ainda, comparou-se e discutiram-se aspectos das associações fitofossilíferas identificadas nestes afloramentos com as demais já descritas para outras porções da bacia (Floresta Fóssil do Rio Poti-FFRP, Teresina, PI e Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins – MNAFTA, Filadélfia, TO), visando estabelecer, quando possível, uma correlação mais precisa com os demais registros. E, por fim, avaliou-se o estado de preservação dos espécimes e, consequentemente, apresentaram-se medidas de proteção para as áreas aqui georreferenciadas, com base na legislação vigente que abarca a conservação do patrimônio cultural brasileiro.

Deste modo, são apresentadas duas novas áreas fitofossilíferas para os estratos do Permiano inferior desta bacia, atribuídas a horizontes do Membro Sílex Basal, porção inferior da Formação Pedra de Fogo. Geograficamente, as áreas estão inseridas nos estados do Piauí (Sítio Paleobotânico São Benedito, município de Altos) e Maranhão (cinco afloramentos, designados: “Ladeira do Olho d' Água”, “Morro das Pedras Brancas”, “Fazendinha”, “Olho D' Água”, e “Morro da Pandora”, municípios de Duque Bacelar e Coelho Neto. Os fósseis presentes nos afloramentos analisados formam associações caracterizadas essencialmente por lenhos gimnospérmicos de grande porte (até 1,15 de diâmetro) e, por vezes, em posição de vida, e tridimensionalmente bem preservados, através do processo de permineralização por sílica.

O presente trabalho foi escrito em formato de artigos científicos (totalizando três), estando a dissertação subdividida em quatro capítulos, a saber:

- Capítulo I, intitulado Referencial Teórico, no qual são abordados aspectos referenciais relacionados às principais pesquisas sobre a geologia da Bacia do Parnaíba e, especialmente, à Formação Pedra de Fogo, bem como um levantamento das pesquisas existentes até o momento em termos paleobotânicos para a sequência permiana da supracitada bacia;

- Capítulo II, intitulado Material e Métodos, onde são apresentados os materiais, objetos de estudo deste trabalho, e a descrição dos métodos utilizados para a obtenção dos resultados apresentados e discutidos no capítulo III;
- Capítulo III, intitulado Resultados e Discussões, onde são apresentados os três artigos contendo os resultados obtidos na dissertação e suas respectivas discussões;
- Capítulo IV, intitulado Conclusões, contém uma síntese geral sobre os principais resultados obtidos neste trabalho e alguns pontos considerados relevantes para pesquisas futuras na região.

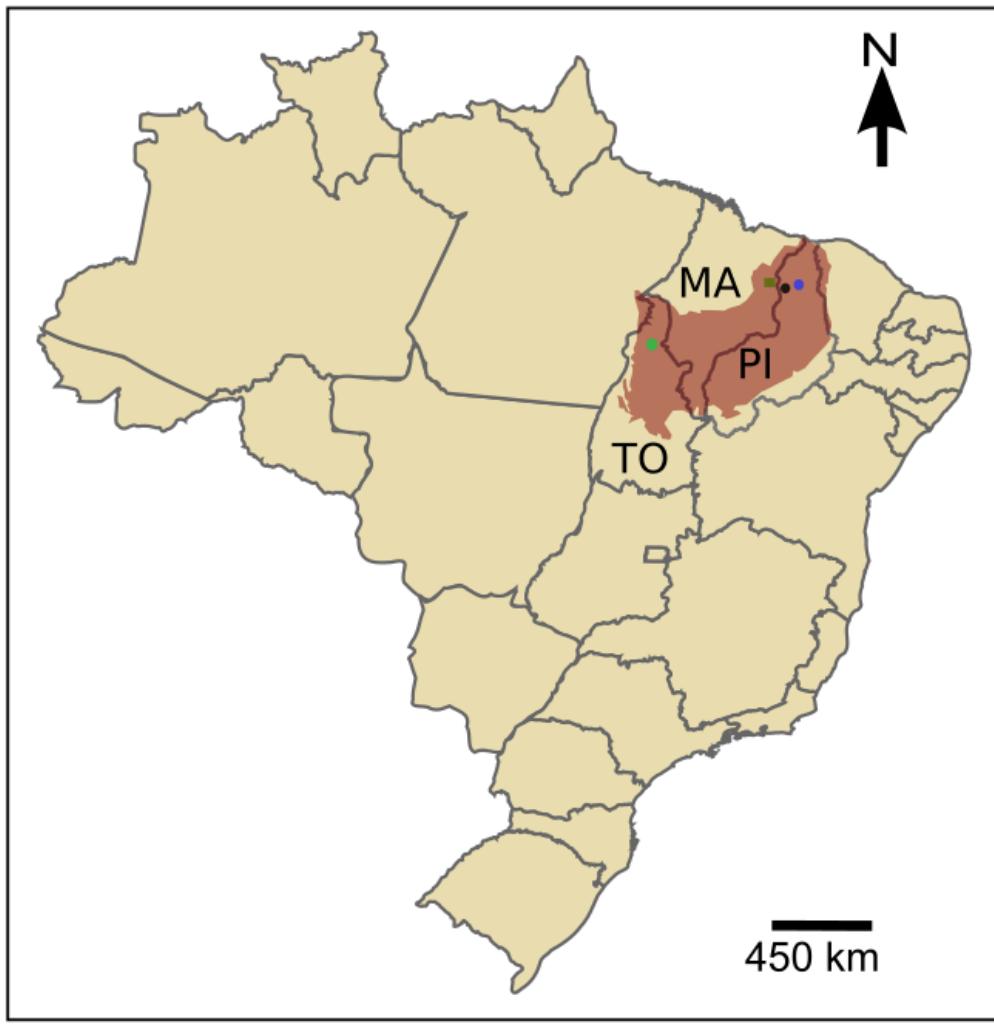
1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1 Bacia Sedimentar do Parnaíba

A Bacia do Parnaíba, com um preeencimento essencialmente paleozoica, comprehende uma ampla região sedimentar, correspondendo a uma área de 300 mil km² das regiões Norte e Nordeste brasileiro, recobrindo a maior parte dos estados do Maranhão, Piauí e Tocantins, e em menor escala os estados do Pará e Ceará (Santos & Carvalho, 2004; Góes & Feijó, 1994) (Figura 1). Esta bacia pode ser considerada, dentre as bacias sedimentares paleozoicas brasileiras, uma das menos estudadas do ponto de vista geológico e paleontológico. Conforme Góes *et al.* (1992), a Bacia do Parnaíba desenvolveu-se diretamente sobre um estrato formado especialmente por rochas metamórficas procedentes de processos tectonomagmáticos do Mesoproterozoico, sobre os quais se superpõem *grabens* com preenchimentos no Neoprotezoico (Formação Riachão) e Cambro-Ordoviciano (Formação Mirador).

Para Vaz *et al.* (2007), através da correlação com dados litológicos presentes nas faixas de dobramentos, maciços medianos dentre outras mais complexas localizadas nas bordas ou áreas adjacentes à Bacia do Parnaíba, é possível inferir que o substrato dessa bacia é formado por rochas metamórficas, ígneas e sedimentares, as quais têm idades que compreendem um longo intervalo que vai do Arqueano ao Ordoviciano. Contudo, é provável que predominem rochas formadas a partir do final do Proterozoico e início do Paleozoico, que corresponde ao intervalo de consolidação da plataforma Sul- Americana (*sensu* Vaz *et al.*, 2007).

Figura 1: Mapa da Bacia Sedimentar do Parnaíba mostrando os municípios onde se localizam os afloramentos fitofossilíferos estudados neste trabalho, e a FFRP e MNAFTO, ocorrências já descritas para o Permiano da Bacia do Parnaíba.



- Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins (MNAFTO)
- Duque Bacelar, MA
- Sítio Paleobotânico São Benedito (SPSB), Altos, PI
- Floresta Fóssil do Rio Poti, Teresina, PI

1.1.1 Geologia e Estratigrafia da Bacia Sedimentar do Parnaíba

Conforme Brito e Neves(1998) a província do Parnaíba foi implantada sobre os riftes cambro-ordovicianos de Jaibaras, Jaguarapi, Cococi/Rio Jucá, São Julião e São Raimundo Nonato (Figura 2). Esta província anteriormente considerada como uma unidade geotectônica única (*i.e.*, Bacia do Parnaíba), apresentou evolução policíclica, o que possibilitou dividi-la em diferentes bacias com gêneses e idades distintas (Góes, 1995, figura 2), a saber: do Parnaíba (Siluriano-Triássico), das Alpercatas (Jurássico-Cretáceo), do Grajaú (Cretáceo) e do Espigão-Mestre (Cretáceo).

Em trabalhos como de Góes (1995) o registro estratigráfico da Bacia do Parnaíba foi subdividido em cinco grupos estratigráficos que correspondem as supersequências deposicionais de Vaz *et al.* (2007) delimitadas por discordâncias que se estendem por toda a bacia ou envolvem regiões amplas, *e.g.* Siluriana, Mesodevoniana-Eocarbonífera, Neocarbonífera-Eotriássica, Jurássica e Cretácea (Figura 3). No entanto, no presente trabalho serão descritas apenas aquelas sequências com depósitos sedimentares que fazem parte da Bacia do Parnaíba propriamente dita, *i.e.* a Siluriana, a Mesodevoniana-Eocarbonífera e a Neocarbonífera-Eotriássica, conforme Tabela 1. Todas correspondem a ciclos transgressivo-regressivos causados pelas flutuações dos níveis dos mares epicontinentais e orogenias de caráter global, segundo Vaz *et al.* (*op. cit.*).

Figura 2: Divisão da “Província Parnaíba” em quatro bacias menores: bacias do Parnaíba (Siluriano-Triássico), das Alpercatas (Jurássico-Cretáceo), do Grajaú (Cretáceo) e do Espigão-Mestre (Cretáceo).



Modificado: Góes, 1995.

Tabela 1: Sequências deposicionais da Bacia do Parnaíba (*sensu* Vaz *et al.*, 2007 e Góes, 1994) com descrição da litologia e interpretações paleoambientais.

Sequência	Grupo	Formação	Aspectos litológicos	Ambientes deposicionais
Neocarbonífera-Eotriássica (~310-220 Ma)	Balsas	Sambaíba	Arenitos vermelhos a cor-de-rosa, creme-claro/esbranquiçado, em geral finos a médios, subangulosos a subarredondados. As dunas com estratificação cruzada de grande porte, contendo diversas feições típicas de sedimentos eólicos.	Desértico, com contribuição fluvial (Lima e Leite, 1978).
			Siltito vermelho e marrom, arenito branco fino e médio, subordinadamente folhelho, anidrita e raros calcários.	Sistema desértico, com lagos associados (Góes e Feijó, 1994).
		Pedra de Fogo	Sílex, calcário oolítico e isolítico creme a branco, eventualmente estromatolítico, intercalado com arenito fino a médio amarelado, folhelho cinzento, siltito, anidrita e, eventualmente, dolomito.	Marinho raso a litorâneo com planícies de sabkha, sob ocasional influência de tempestades (Góes & Feijó, 1994). Ciclos deposicionais podem ser identificados na sucessão de camadas desta unidade (Aguiar, 1971).
		Piauí	Duas sucessões: a inferior, composta de arenitos cor-de-rosa, médios, maciços ou com estratificação cruzada de grande porte e intercalações de folhelho vermelho, e a superior, formada de arenitos vermelhos, amarelos, finos a médios, contendo intercalações de folhelhos vermelhos, calcários e finas camadas de sílex. Siltitos e lentes conglomeráticas também ocorrem (Caputo, 1984).	Fluvial com contribuição eólica e breves incursões marinhas, num clima semi-árido a desértico Lima e Leite (1978).
		Poti	Uma sucessão de estratos que pode ser dividido em duas porções, a inferior constituída de arenitos cinza esbranquiçados, médios, com lâminas dispersas de siltito cinza-claros, e a superior de arenitos cinza, lâminas de siltitos e folhelhos com eventuais níveis de carvão (Lima & Leite, 1978).	Deltas e planícies de maré, às vezes sob a influência de tempestades (Góes e Feijó, 1994).
	Canindé	Longá	Folhelhos cinza-escuros a pretos, em parte arroxeados, homogêneos ou bem laminados, bioturbados. Em sua porção média comumente apresentam um pacote de arenitos e siltitos cinza-claros a esbranquiçados, laminados (Lima e Leite, 1978)	Plataformal dominado por tempestades foi interpretado por Góes e Feijó (1994).
		Cabeças	Arenitos cinza-claros a brancos, médios a grossos, com intercalações delgadas de siltitos e folhelhos. Diamictitos ocorrem eventualmente e com maior frequência na parte superior. Tilitos, pavimentos e seixos estriados.	Glacial ou periglacial (Caputo, 1984).
		Pimenteiras	Folhelhos cinza-escuros a pretos, esverdeados, em parte bioturbados.	Plataforma rasa dominada por tempestades Góes e Feijó (1994).
		Itaim	Arenitos finos a médios com grãos subarredondados, bem selecionados e com alta esfericidade.	Deltaicos e plataformais, dominados por correntes induzidas por processos de marés e de tempestades (Góes e Feijó, 1994).
		Jaicós	Arenitos cinza com tonalidades claras, creme ou amarronzada, grossos, contendo seixos angulares a subangulares, mal selecionados, friáveis, maciços ou com estratificação cruzada ou lenticular.	
Siluriana (~440-395 Ma)	Serra Grande	Tianguá	Folhelhos cinza-escuro, bioturbados, sideríticos e carbonáticos, de arenitos cinza-claro, fino a médio, feldspáticos e de intercalações de siltitos e folhelhos cinza-escuros, bioturbados e micáceos.	Plataforma rasa (Góes e Feijó, 1994).
		Ipu	Arenitos com seixos, conglomerados com matriz areno-argilosa e maticões de quartzo ou quartzito e arenitos de finos a grossos.	Glacial proximal e glacio-fluvial, a leques ou frentes deltaicos (Caputo, 1984).

É importante mencionar que os poucos conhecimentos litoestratigráficos, paleoambientais e paleontológicos a respeito da Bacia do Parnaíba, são oriundos dos estudos de seus bons afloramentos, publicados em uma série de trabalhos pioneiros feitos a partir da segunda metade do século XX, pelo Conselho Nacional de Petróleo, por exemplo, (Carrozzi *et al.*, 1975; Mesner & Wooldridge, 1964; Caputo, 1984; Goés *et al.*, 1990 *apud* Lima Filho, 1998), bem como das publicações no âmbito do Departamento Nacional de Produção Mineral (*i.e.* Kegel, 1951, 1953; Cruz *et al.*, 1973, Lima & Leite, 1978, dentre outros). No entanto, os conhecimentos acerca dessa bacia ainda são incipientes quando comparados às demais bacias paleozoicas brasileiras. Isto se deve especialmente às poucas contribuições de trabalhos prospectivos, tanto no âmbito geológico quanto paleontológico, existentes para a Bacia do Parnaíba como um todo. Este pouco interesse nas sequências sedimentares da bacia em partes reflete a crença, perpetuada por décadas, de que os seus depósitos não continham reservas de hidrocarbonetos fósseis (petróleo e gás) economicamente exploráveis.

1.1.2 Formação Pedra de Fogo

Plummer *et al.* (1948) propuseram a denominação Formação Pedra de Fogo para as camadas permianas ricas em sílex e fósseis vegetais do gênero *Psaronius* que ocorriam no leito do Riacho Pedra de Fogo, entre os municípios de Pastos Bons e Nova Iorque, MA. Ainda, o autor supracitado considerou, de modo geral, esta unidade litoestratigráfica como uma das mais importantes e difíceis de serem interpretadas dentre as demais presentes no norte do Brasil.

1.1.3 Litologia e Estratigrafia

Esta unidade possui um conjunto de litotipos associados, sobretudo a arenitos silicificados e expressivos níveis de sílex e calcários, além de abundante conteúdo fossilífero composto por associações de caules pretificados, microbialitos (ooïdes, pisoides e estromatólitos; segundo Plummer, 1948), além da presença de uma rica fauna de vertebrados aquáticos e continentais (Plummer, 1948; Price, 1948; Mesner & Wooldridge 1964; Faria Jr. & Truckenbrodt, 1980; Cox & Hutchinson, 1991; Santos & Carvalho, 2004; Cisneros *et al.*, 2015). A Formação Pedra de Fogo possui ampla distribuição, especialmente na porção central da bacia, aflora sobre depósitos da Formação Piauí (Pensilvaniano) e subjaz estratos das

formações Motuca (possivelmente de idade também permiana) e Sambaíba (triássica?). Em termos estratigráficos, essa formação encontra-se subdividida em três membros (*sensu* Faria Jr. 1979), que apresentam fácies semelhantes; são eles, da base para o topo: Sílex Basal, Médio e Trisidela. O Membro Sílex Basal, apresenta siltitos alternados com depósitos carbonáticos, atribuídos a bancos carbonáticos, e associados a estes há concreções silicosas. No Membro Médio, encontram-se sequências areníticas subjacentes a camadas de pelitos (siltitos e folhelhos) e, no topo do pacote, encontram-se bancos carbonáticos associados a concreções silicosas. O Membro Trisidela, é constituído por laminações ou camadas finas de folhelhos e camadas descontínuas de sílex e macrorrestos vegetais associados (Faria Jr., 1979; Plummer, 1948).

No tocante ao ambiente deposicional desta unidade, há diversas interpretações propostas por diferentes autores. Para Plummer (1948), Price, (1948) e Kegel (1951) a presença de organismos característicos de água doce (*e.g.* *Prionosuchus*, *Ctanachantus*, peixes paleoniscídeos, *Psaronius* e coníferas) indicam a ocorrência de um ambiente de água doce ou, no máximo água salobra para esta unidade. Com base nos dados dos autores supracitados, Barbosa e Gomes (1957 *apud* Faria Jr., 1979) inferiram um ambiente úmido em sistema deposicional deltaico para a Formação Pedra de Fogo. Ainda sobre seu ambiente deposicional, Lima e Leite (1978) sugeriram uma deposição continental, lagunar e fluvial, com influências eólicas e marinhais secundárias. Enquanto que para Faria Jr. e Trukenbrodt (1980), os sedimentos desta formação se depositaram em um ambiente marinho, restrito e raso, do tipo epicontinental, a parcialmente transicional. Já Caldas *et al.* (1989), em seu trabalho sobre a Floresta Fóssil do Rio Poti, defenderam a existência de um ambiente de transição, entre costeiro e continental, concordando em parte com a visão de Faria Jr. e Trukenbrodt (*op. cit.*). Por outro lado, em trabalhos recentes nas margens sudoeste e nordeste da Bacia do Parnaíba, utilizando tanto fósseis de vertebrados aquáticos e análises sedimentológicas (Cisneros *et al.*, 2015, porção nordeste) quanto análises faciológicas e estratigráficas (Andrade *et al.*, 2014, porção sudoeste), interpretaram os depósitos sedimentares desta unidade como resultantes de processos deposicionais lacustres.

1.1.4 Estado da arte sobre os vegetais fósseis do Permiano da Bacia do Parnaíba

No Permiano inferior da Bacia Sedimentar do Parnaíba são encontradas muitas ocorrências macrofitofossilíferas, algumas em posição de crescimento sendo predominantemente lenhos gimnospérmicos (Formação Pedra de Fogo, em Caldas *et al.*,

1989), e outras contendo vegetais fósseis horizontalizados, com até 10 m de comprimento, e dominadas por samambaias arborescentes (Formação Motuca, em Dias-Brito *et al.*, 2009). Contudo, apesar da abundância de afloramentos contendo estas associações fitofossilíferas (Caldas *et al.*, 1989; Conceição *et al.*, no prelo; Conceição *et al.*, 2015), de modo geral, poucas contribuições têm sido apresentadas, especialmente para os depósitos da unidade Pedra de Fogo nas bordas sudeste e leste da bacia, e sobretudo no âmbito da taxonomia dos fitofósseis.

A paleoxiloflora da Bacia do Parnaíba, conhecida por sua abundância e qualidade de preservação, vem sendo estudada desde meados do século XIX (Brongniart, 1872; Pelourde, 1912; Lisboa, 1914; Oliveira, 1930; Dolianiti, 1954). Conforme Kurzawe *et al.* (2013a), a espécie de samambaia *Psaronius brasiliensis*, descrita originalmente por Brongniart (1872) com base em espécimes provenientes de afloramentos localizados entre os municípios de Amarante e Oeiras, no Piauí, é considerada a primeira espécie vegetal fóssil descrita para o Brasil. Após um longo intervalo sem pesquisas voltadas à paleoflora da bacia, Coimbra e Mussa (1984, 1987) identificaram novas espécies de vegetais para a porção sudoeste da bacia, principalmente de gimnospermas, a partir de exemplares coletados nos estados do Tocantins e Maranhão (Tabela 2). Para a porção nordeste, até o presente, há apenas uma espécie de samambaia, *i.e.* *Psaronius brasiliensis* Brongniart, 1872, e uma de gimnosperma pteridospérmica, *i.e.* *Teresinoxylon eusebioi* Mussa 1989 (Caldas et al., 1989), encontrada na “Floresta Fóssil do Rio Poti”, situada às margens do rio do mesmo nome, em Teresina, Piauí. Porém, vale a pena destacar que Lisboa (1914), em seus trabalhos na região de Teresina, afirmou ter encontrado caules fossilizados em vários locais nos arredores da cidade, todos referentes ao gênero *Psaronius* (samambaias arborescentes). Isto indica que há sítios fitofossilíferos ainda não formalmente assinalados a serem localizados e estudados nessa área.

A partir da década de 1990, a compreensão a respeito da paleoflora permiana da Bacia do Parnaíba tem sido aprofundada para os depósitos situados à margem sudoeste, em estratos atribuídos a Formação Motuca e se compõe especialmente por samambaias, que constituem o grupo dominante nas sequências sedimentares desta unidade na região (Pelourde, 1912; Herbst ,1985, 1992, 1999; Rößler & Galtier, 2002a, b, 2003; Kurzawe *et al.*; 2013a, b; Capretz & Rohn, 2013; Tavares *et al.*, 2014; Neregato *et al.*, 2015).

Contudo, para o Permiano das bordas sudeste e nordeste, o desenvolvimento das pesquisas permanece em um estágio incipiente. Os registros de vegetais fósseis descritos para o Permiano desta bacia, até o presente, são apresentados a seguir na Tabela 1.

Tabela 2: Vegetais fósseis descritos para o Permiano da Bacia Sedimentar do Parnaíba.

Fóssil	Órgão encontrado	Afinidade botânica	Hábito de vida	Local de registro	Referências	Idade/posição estratigráfica	Outros registros		
<i>Psaronius brasiliensis</i>	Caule	Samambaia Ordem Marattiales	Arborescente	Entre Oeiras e São Gonçalo do Amarante (PI)	Brongniart (1872)	Permiano/Fm. Pedra de Fogo	Bacia do Paraná, Alemanha, França, EUA, China		
				Entre Araguaína e Filadélfia (TO)	Rößler & Noll (2002)				
<i>Psaronius arrojadoi</i>	Caule	Samambaia Ordem Marattiales	Arborescente	Chapada do Jaboti (MA)	Pelourde (1914)	Permiano/Fm. Motuca	Bacia do Paraná, Brasil		
<i>Psaronius sinuosus</i>				Araguaína (TO)	Herbst (1985; 1999)				
<i>Psaronius sp.</i>					Herbst (1986) Rößler & Noll (2002)				
<i>Titea singularis</i>				Carolina (MA)	Herbst (1992)				
<i>Titea derbyi</i>	Fronde fértil	Samambaia , Ordem Filicales	Arborescente ?	Araguaína (TO)	Rößler & Noll (2002)	Permiano/Fm. Motuca	Alemanha, EUA, China		
<i>Grammatopteris freitasii</i>				Araguaína e Filadélfia (TO)	Rößler & Galtier (2002a)				
<i>Dembachia brasiliensis</i>					Rößler & Galtier (2003)				
<i>Botryopteris nollii</i>	Fronde	Samambaia , Ordem Marattiales	Arborescente	MNAFTO (TO)	Tavares (2011)	Permiano/Fm. Motuca	endêmica Cosmopolita		
<i>Fernia constata</i>									
<i>Tocantinorachis buritiranaensis</i>									
<i>Pecopteris</i> sp 1									
<i>Pecopteris</i> sp 2	Caule	Pteridófita incertae sedis	Arborescente	MNAFTO (TO)	Neregato (2012)	Permiano/Fm. Motuca	França, Alemanha, Inglaterra, EUA e China		
<i>Arthropitys cacundensis</i>									
<i>Arthropitys isoramis</i>									
<i>Arthropitys tabebuiensis</i>									
<i>Arthropitys tocantinensis</i>									
<i>Arthropitys barthelii</i>	Caule	Esfenófita , Família Calamitaceae	Arborescente	Araguaína (TO) e Carolina (MA)	Coimbra & Mussa (1984)	Permiano/Fm. Motuca	França, Alemanha, Inglaterra, EUA e China		
<i>Arthropitys buritirannensis</i>					MNAFTO (TO)				
<i>Sphenophyllum sp.</i>									
<i>Dadoxylon</i> sp.	Tronco	Gimnosperma , Ordem Cordaitales?	Arborescente	MNAFTO (TO)	Rößler & Noll (2002)	Permiano/Fm. Motuca	Cosmopolita		
<i>Amyelon bieloi</i>	Raiz	Gimnosperma Ordem Cordaitales	Arbustivo ou arbóreo	Araguaína (TO) e Carolina (MA)	Coimbra & Mussa (1984)				

<i>Araguaianorachis simplissima</i>	Ráquis ou pecíolo	Samambaia? Gimnosperma? Pteridosperma?	Herbácea, arbustiva ou arborescente		Mussa & Coimbra (1987)		endêmica
<i>Carolinapitys maranhensis</i>	Tronco	Gimnosperma Ordem Cordaitales?	Rodovia Carolina-Riachão (MA), Trevo para Araguaína (TO)	Mussa & Coimbra (1987)	Coimbra & Mussa (1984)		endêmico
<i>Cyclomedulloxylon parnaibense</i>		Gimnosperma , Ordem Pteridospermales ?					
<i>Cycadoxylon brasiliense</i>		Gimnosperma , Ordem Pteridospermales (Cycadoxylaceae)					
<i>Teresinoxylon euzebioi</i>	Raiz	Gimnosperma , Ordem Pteridospermales (Cycadoxylaceae)	Teresina (PI)	Caldas <i>et al.</i> (1989)	Permiano/ Fm. Pedra de Fogo		endêmicos
<i>Parnaiboxylon</i> sp	Tronco	Gimnosperma	Arborescente	MNAFTO (TO)	Kurzawe <i>et al.</i> (2013a)	Permiano/Fm. Motuca	endêmico
<i>Parnaiboxylon rohnae</i>							endêmico
<i>Ductoabietoxylon solis</i>							endêmico
<i>Scleroabietoxylon chordas</i>							endêmico
<i>Taeniopitys tocantinensis</i>	Tronco	Gimnosperma	Arborescente	MNAFTO (TO)	Kurzawe etal. (2013b)	Permiano/Fm. Motuca	Antártica
<i>Taeniopitys</i> sp.							
<i>Damudoxylon Buritiranaense</i>							
<i>Damudoxylon humile</i>							
<i>Damudoxylon roessleri</i>							
<i>Kaokoxylon Punctatum</i>							Índia, Austrália e África do Sul
<i>Buritiranopteris costata</i>	Pínulas	Marattiales	Arborescente	MNAFTO (TO)	Tavares <i>et al.</i> (2014)	Permiano/Fm. Motuca	Índia, Austrália África do Sul Argentina Antártica

Modificado de Neregato (2012).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 MATERIAL

O material corresponde aos espécimes catalogados nas novas associações fitofossilíferas, localizadas em afloramentos nos municípios de Altos (Piauí), Duque Bacelar e Coelho Neto (Maranhão), borda nordeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba (Figura 1). O número total de espécimes levantados durante este estudo foi de aproximadamente 140. A quantidade de espécimes encontrados em cada área, está detalhada nos artigos anexados no Capítulo III: tabela 1 do artigo 1 para o município de Altos, PI e tabela 1 do artigo 2 para os municípios de Duque Bacelar e Coelho Neto, MA.

Dentre todo o material catalogado, alguns poucos espécimes foram coletados e três deles, foram preparados para análises por meio de corte polido ou lâminas petrográficas. Dois deles estão depositados na coleção de paleontologia do Centro de Ciências da Natureza da Universidade Federal do Piauí (UFPI), Campus de Teresina, PI, sob a sigla UFPI-PAB081e 014, o outro pertence à Coleção de Paleontologia do Centro de Pesquisa de História Natural e Arqueologia do Maranhão (CPHNAMA), situado em São Luís do Maranhão, MA, e está catalogado sob a sigla PL-122.

2.2 MÉTODOS

Em relação às atividades desenvolvidas nos trabalhos de campo, os seguintes métodos foram utilizados para que fossem alcançados os resultados nos artigos apresentados no Capítulo III:

- a) análises de imagens de satélite da região, obtidas através do programa *Google Earth*;
- b) prospecção e processamento dos fósseis, que envolveu a limpeza, atribuição de código de campo e identificação a nível macroscópico do material fóssil nas áreas aflorantes, conforme visto na figura 3;
- c) georreferenciamento dos troncos encontrados, feito com auxílio de GPS;

d) levantamentos de seções estratigráficas, a fim de interpretar as associações de fácies e definir os sistemas deposicionais, similarmente aos métodos utilizados por Allen (1983) e Miall (1985, 1988);

e) elaboração de uma planilha Excel de dados em laboratório, contendo os dados de catalogação dos fósseis, conforme modelo proposto por Conceição *et al.* (no prelo), incluindo, neste caso, caules de pteridófitas (C= “Caule”, figura 3B).

Figura 3: Alguns procedimentos utilizados em campo durante o georreferenciamento dos fósseis nos afloramentos. A- procedimentos de medidas do comprimento dos troncos; B- limpeza para evidenciar os fósseis; C- retirada da matriz sedimentar que cobria o fóssil; D- atribuição de um código de campo ao fóssil; E, elaboração de seções estratigráficas.



Em relação às atividades desenvolvidas em laboratório, os seguintes métodos foram utilizados para que fossem alcançados os resultados nos artigos apresentados no Capítulo III:

a) corte, polimentos e confecção de lâminas petrográficas, utilizando-se técnicas consagradas de laminação e elaboração de seções delgadas e manufatura de lâminas petrográficas (de acordo com Merlotti & Rosa, 2002), para verificar o grau de preservação de alguns espécimes fósseis, *i.e.* a ocorrência de paredes celulares ainda preservadas;

b) análises espectroscópicas de fragmentos fossilizados de troncos, conforme Alencar *et al.* (2015) e Silva *et al.* (2013), por métodos como: espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR); espectroscopia Raman; difração de raios – X (DRX), Energia

dispersiva (EDS) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), a fim de determinar a composição química dos troncos fossilizados, e, tentativamente inferir a sequência de eventos químicos e os principais mecanismos do processo de fossilização que os produziram.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados alcançados na presente dissertação, bem como suas respectivas discussões são apresentados em três artigos científicos, a saber:

- 1°) Novo registro de uma Floresta Petrificada em Altos, Piauí: relevância e estratégias para geoconservação;
- 2°) New petrified forest in Maranhão, Permian (Cisuralian) of the Parnaíba Basin, Brazil;
- 3°) Spectroscopic studies on Permian plant fossils in the Pedra de Fogo Formation from the Parnaíba Basin, Brazil.

Novo registro de floresta petrificada em Altos, Piauí: relevância e estratégias para geoconservação

Domingas Maria da CONCEIÇÃO¹, Juan Carlos CISNEROS^{1,2} & Roberto IANNUZZI³

1. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, CEP 50740-530, Recife, PE, Brasil. E-mail: domingasmary@hotmail.com.

2. Departamento de Ciências da Natureza, Universidade Federal do Piauí. Av. Ininga, s/n, CEP 64049-550, Teresina, PI, Brasil. E-mail: juan.cisneros@ufpi.edu.br.

3. Departamento de Paleontologia e Estratigrafia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91540-000, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: roberto.iannuzzi@ufrgs.br.

Resumo - Apresenta-se aqui uma nova ocorrência de plantas fósseis na Formação Pedra de Fogo, Permiano da Bacia Sedimentar do Parnaíba, NE do Brasil. A ocorrência, aqui denominada Sítio Paleobotânico São Benedito, localiza-se em um assentamento do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), no povoado São Benedito, 19 km da sede do Município de Altos, Estado do Piauí. Caracteriza-se por apresentar uma significativa quantidade de troncos gimnospérmicos de grande porte, medindo até 180 cm de diâmetro, sendo que alguns se encontram possivelmente em posição de vida. Foram catalogados mais de 70 troncos fósseis, configurando-se, provavelmente, na maior área de concentração de troncos permineralizados registrada para o estado, superando a “Floresta Fóssil do Rio Poti”, em Teresina. São apresentadas propostas de geoconservação para o sítio, tendo em vista que tal ocorrência se encontra atualmente sem bases legais para sua proteção. Este novo registro de vegetais fósseis demonstra o grande potencial para estudos paleobotânicos nessa bacia.

Palavras-chave: Floresta fóssil, Gimnospermas, Formação Pedra de Fogo, Bacia do Parnaíba, Permiano, Patrimônio fóssil.

Abstract - NEW RECORD OF A PETRIFIED FOREST IN ALTOS, PIAUÍ: IMPORTANCE AND GEOCONSERVATION STRATEGIES. Here were present a new record of fossil plants from the Permian Pedra de Fogo Formation of the Parnaíba Basin, northeastern Brazil. This fossiliferous area, here named São Benedito Paleobotanical Site is located in a settlement of the Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), in the São Benedito village, 19 km from Altos

municipal capital, Piauí state. It is characterized by a great number of large gymnosperm trunks, measuring up to 180 cm in diameter, some of them being possibly preserved in life position. More than 70 fossil tree logs were cataloged, probably constituting the largest concentration of permineralized trunks recorded in the state, surpassing the Poti River Fossil Forest in Teresina. Some proposals for its preservation are presented, taking into consideration that the site currently has no legal bases for its protection. This new record of fossil plants evidence great potential for palaeobotanical studies in the basin.

Keywords: Fossil Forest, Gymnosperms, Pedra de Fogo Formation, Parnaíba Basin, Permian, Paleontological Heritage.

1 Introdução

Em termos de registros fósseis vegetais, o Estado do Piauí possui um rico e significativo acervo paleobotânico, embora relativamente pouco estudado, pois, de modo geral, a própria Bacia do Parnaíba encontra-se ainda pouco prospectada, dada a sua extensão. Apesar da existência de uma série de trabalhos sobre os estudos paleobotânicos do Permiano desta bacia (síntese em Kurzawe *et al.*, 2013a, 2013b; Tavares *et al.*, 2014; Neregato *et al.*, 2015), pouco se conhece sobre a paleoflora deste período no estado. A maioria dos estudos disponíveis é antiga, e corresponde a trabalhos pontuais voltados quase que exclusivamente à flora de pteridófitas (*e.g.*, Brongniart, 1872; Pelourde, 1912; Oliveira, 1934; Dolianiti, 1954).

Há apenas um estudo mais recente, publicado para a porção piauiense da bacia, referente aos vegetais fósseis permianos, realizado por Caldas *et al.* (1989). Nesse trabalho, os pesquisadores descreveram a “Floresta Fóssil do Rio Poti”, em Teresina, e revelaram uma nova espécie de gimnosperma (pteridospérmica), denominada *Teresinoxylon eusebioi* Mussa 1989. Desde então, percebe-se a ausência de trabalhos voltados à flora do Permiano, na parte nordeste da bacia.

Neste artigo, é apresentada uma nova ocorrência de lenhos gimnospérmicos da Bacia do Parnaíba, no Estado do Piauí, que recebe a denominação de “Sítio Paleobotânico São Benedito” (SPSB). Nessa localidade há uma quantidade considerável de troncos gimnospérmicos permineralizados por sílica (Alencar *et al.*, 2015), tendo sido catalogados aproximadamente 70

espécimes de grande porte em uma área relativamente pequena, configurando assim uma concentração de troncos equiparável com a da “Floresta Fóssil do Rio Poti”, em Teresina. O novo sítio é comparado com as principais ocorrências de caules permianos na bacia. Finalmente, procura-se fornecer propostas, com base na legislação vigente, para a preservação do sítio.

2 Área, materiais e métodos

2.1 Geologia

A Bacia do Parnaíba é uma bacia intracratônica (Santos & Carvalho, 2004), também denominada como Bacia do Maranhão ou Bacia do Meio Norte, a qual abrange uma área de cerca de 300 mil km², recobrindo grande parte dos estados do Maranhão e Piauí, centro-norte do Tocantins e porções pequenas dos estados do Ceará e Pará. O local de estudo constitui-se de um afloramento da Formação Pedra de Fogo, conforme aponta o mapa geológico do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2006).

A Formação Pedra de Fogo, de idade permiana (Plummer, 1948; Mesner & Wooldridge, 1964; Faria Jr. & Truckenbrodt, 1980; Mussa & Coimbra, 1987), assenta-se sobre a Formação Piauí (neocarbonífera), e é recoberta por depósitos das formações Motuca (provavelmente de idade também permiana) e Sambaíba (triássica?). Estas formações compõem o Grupo Balsas (Silva *et al.*, 2003). A Formação Pedra de Fogo é composta por camadas de arenitos e siltitos silicificados e tem como principal característica a presença de camadas de sílex e calcários, com abundantes madeiras permineralizadas, ooídes e pisoides (Plummer, 1948; Faria Jr., 1979; Santos & Carvalho, 2004), sendo também encontrados nessa unidade vertebrados e icnofósseis de invertebrados marinhos (Plummer, 1948; Price, 1948; Cox & Hutchinson, 1991). O pacote é interpretado como um conjunto de ciclos transgressivos-regressivos (Mesner & Wooldridge 1964; Goés & Feijó, 1994; Santos & Carvalho, 2004).

Segundo Faria Jr. (1979), a Formação Pedra de Fogo é dividida em três membros, Membro Sílex Basal, com uma grande distribuição em área, no qual há uma intercalação de siltitos e bancos

carbonáticos contendo concreções silicosas; Membro Médio, composto por pacotes de arenitos seguidos até o topo por camadas de siltitos, folhelhos e bancos carbonáticos com pequenas concreções silicosas; e o Membro Trisidela, que constitui a parte superior da formação e é caracterizado por intercalações laminares de folhelhos e níveis descontínuos de sílex, e por madeiras fossilizadas (Plummer, 1948). Os fragmentos de rochas mais comuns nesta formação são as “placas de sílex” que compõem as brechas intraformacionais. Os arenitos da Formação Pedra de Fogo são normalmente finos a muito finos, pobemente selecionados, enquanto as rochas carbonáticas ocorrem principalmente no Membro Sílex Basal e na sequência superior (Faria Jr., 1979; Faria Jr. & Truckenbrodt, 1980). Cabe mencionar que no sul/sudoeste da bacia são encontrados, na Formação Motuca, caules permineralizados por sílica, geralmente associados a arenitos de canais fluviais ou a arenitos com intercalações de finos relacionados à planície de inundação (Capretz & Rohn, 2013; Tavares *et al.*, 2014).

2.2 Localização da área

O “Sítio Paleobotânico São Benedito” (SPSB) localiza-se no povoado homônimo, um assentamento do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA), e encontra-se a 19 km a sudoeste da sede do município de Altos, Piauí (Fig. 1). O acesso é feito pela BR 343 até a sede do município, prosseguindo em direção sul pela estrada de terra denominada “Brejo”. Embora já conhecida pela população local, não há estudos publicados sobre esta floresta fóssil. O sítio está recoberto por densa mata de cocais, o que dificulta o trabalho de prospecção na área.

O local onde estão situadas algumas concentrações de troncos fósseis é próximo a um núcleo urbano, bem como de um campo agrícola, que inclui algumas ocorrências. Ainda que a maior parte do sítio não seja muito propícia para a agricultura, por estar na encosta de um morro, são perceptíveis os impactos antrópicos, inclusive queimadas em locais onde há alguns troncos fósseis aflorando. Os troncos fósseis do sítio ocorrem associados a uma cobertura arenosa, não sendo possível observar as rochas sedimentares expostas, o que dificulta a interpretação do contexto geológico da localidade.

[Inserir figura 1]

2.3 Materiais e métodos

A pesquisa de campo foi realizada através de prospecção de superfície por caminhamento, com o auxílio de imagens de satélite obtidas através do programa *Google Earth* e um receptor de GPS para efetuar o mapeamento dos troncos. Cada tronco foi catalogado, utilizando-se para isso a inicial T (T = “Tronco”), seguida de um numeral, começando-se em T1, prosseguindo em ordem crescente T2, T3, etc. (Tab. 1). Além disso, os exemplares foram catalogados de forma digital por meio de uma planilha de dados no programa livre *LibreOffice*. Os períodos para a execução dos trabalhos de campo tiveram duração de dois anos, tendo sido efetuadas aproximadamente cinco etapas ao ano, cada uma com duração de um dia. Os troncos fósseis catalogados passaram por uma limpeza prévia no campo com pinças e escovas (Fig. 2) o que permitiu o reconhecimento de suas feições macroscópicas e posterior registro fotográfico.

[Inserir figura 2]

Não foi possível fazer medidas (diâmetros e comprimentos) completas da maioria dos troncos, principalmente dos diâmetros, pois quase todos se encontram expostos de forma parcial no solo, fragmentados, ou mostrando seções transversais de apenas algumas fatias (Fig. 2). Durante as etapas de prospecções, duas amostras de troncos foram coletadas para polimento e depositadas na “Coleção de Paleobotânica” da Universidade Federal do Piauí, em Teresina, sob prefixo e números: UFPI PAB013 e 014. Nestas amostras foram feitos cortes em seções transversais, a fim de visualizar com maior clareza a existência de possíveis anéis de crescimento (Fig. 3A). A partir do corte de uma delas (UFPI PAB014), foram confeccionadas lâminas petrográficas com o intuito de verificar se há tecidos preservados (Fig. 4).

3 Resultados

O novo sítio é constituído por troncos gimnospérmicos de grandes dimensões. Foram catalogados aproximadamente 70 caules, ressaltando-se ainda que vários deles foram georreferenciados por concentração, dada a proximidade em que se encontravam uns aos outros (Tab. 1). Cabe mencionar que o mapeamento realizado não deve ser considerado definitivo, tendo em vista as dificuldades de acesso à área, assim, estima-se que a quantidade de troncos fósseis possa ser maior. Estes são encontrados em sua maioria na posição horizontal, rolados no solo, visivelmente sem ramos ou outros órgãos vegetais conectados. Entre os troncos catalogados, apenas dois parecem estar em posição de vida (troncos T23 e T31, Fig. 5A-B). Todos os exemplares fósseis mapeados pertencem ao grupo das gimnospermas, o que pode ser reconhecido através da presença de estruturas do xilema secundário aqui interpretadas como possíveis anéis de crescimento. (Figs. 2, 5D, F, H e 6). Embora não haja certeza de que existam caules fósseis na posição de vida, pode-se classificar esta ocorrência como uma “Floresta Petrificada”, pois, de acordo com Dias-Brito *et al.* (2009), florestas petrificadas são áreas que apresentam grande quantidade de caules fósseis concentrados, independente do seu contexto tafonômico.

[Inserir figuras, 3, 4 5]

[Inserir figura 6]

Inserir tabela 1

Em relação à fossilização dos troncos fósseis, essa se deu pelo processo de permineralização (incorporação de minerais dentro da estrutura celular) por sílica. Por análise espectroscópica foi constatada a presença de carbono amorfo em amostras dos lenhos fósseis desse sítio (síntese em Alencar *et al.*, 2015), o que caracteriza o estado de permineralização e não petrificação propriamente dita desses fósseis, haja vista a persistência de matéria orgânica original na sua composição (Iannuzzi

& Vieira, 2005, p. 17). Porém, em alguns casos, pode-se constatar por meio de observações macroscópicas que houve recristalização parcial dos espécimes, que dificulta ou mesmo impede o reconhecimento das características anatômicas dos troncos. Diante deste fato, foram elaboradas e analisadas umas poucas seções delgadas do corte transversal de um tronco aparentemente bem preservado (*i.e.*, UFPI PAB014). Os resultados preliminares demonstraram uma boa preservação de porções do xilema secundário (Fig. 4), suficientes para suportar futuros estudos taxonômicos no material. Os troncos estão relativamente bem preservados pelo processo de permineralização por sílica (Figs. 5-6) que é um tipo de fossilização característico das madeiras da Formação Pedra de Fogo. Alguns raros troncos apresentam a medula aparentemente preservada (Figs. 5D, F, H e 6B).

4 Discussão dos resultados

4.1 Comparação com outras florestas petrificadas da Bacia do Parnaíba

Durante as etapas de mapeamento dos troncos, foi possível observar que há alguns poucos espécimes em posição vertical, no entanto, muitos sofreram algum transporte, haja vista que a maioria dos troncos não estão em posição de vida, mas sim horizontalizados e/ou inclinados. Porém, estima-se que o deslocamento dos troncos teria sido resultado da erosão do terreno nos últimos milhares de anos e incapaz de levá-los para além dos limites do sítio (*locus*) de preservação, considerando o tamanho de alguns exemplares que alcançam até 180cm de diâmetro (T26, Fig. 6B). Assim, o conjunto parece estar preservado ainda dentro de seu ambiente sedimentar original. Na Bacia do Parnaíba existem outras duas grandes ocorrências de madeiras fósseis descritas para o Permiano, a saber: o “Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins” (MNAFTO), em Filadélfia, norte do Tocantins (Coimbra & Mussa, 1984; Mussa & Coimbra, 1987; Rößler & Galtier, 2002a, 2002b; Rößler, 2006; Dias-Brito *et al.*, 2009; Kurzawe *et al.*, 2013a, 2013b; Capretz & Rohn, 2013; Tavares *et al.*, 2014; Neregato *et al.*, 2015); e a “Floresta Fóssil do Rio Poti” (FFRP), em Teresina, Piauí (Caldas *et al.*, 1989).

As pesquisas realizadas no MNAFTO mostram que nele há uma diversidade de táxons de gimnospermas (sete espécies), esfenófitas (duas) e pteridófitas (sete), este último sendo o grupo predominante na região em termos quantitativos. Não há registros de fósseis em posição de vida no MNAFTO. Já na FFRP, existem vários caules em posição de vida, o que a torna uma ocorrência excepcional para o Paleozoico na América do Sul (Caldas *et al.*, 1989). Em contraste com o MNAFTO, há em Teresina uma predominância de gimnospermas. Porém, uma única espécie de gimnosperma pteridospermófita foi descrita até o momento, *Teresinoxylon eusebioi* Mussa 1989 (Caldas *et al.*, 1989). Em recentes observações em campo, verificou-se também a presença de alguns caules fragmentados de pteridófitas, como *Psaronius* sp., os quais se encontram horizontalizados e rolados, distribuindo-se por entre as ocorrências de caules gimnospérmicos dispostos em posição de vida.

A catalogação dos fitofósseis no SPSB exibiu até o momento, apenas o registro de gimnospermas. Comparando-se as duas ocorrências da porção nordeste desta bacia, no Piauí, são perceptíveis semelhanças entre elas. Embora na FFRP haja pteridófitas, como foi aqui apontado, elas correspondem claramente a restos vegetais que foram transportados, seja no passado (parautóctones a alóctones), seja mais recentemente por meio da erosão fluvial (*ex-locus*), o que pode ser inferido pela sua raridade e modo de ocorrência. As duas florestas do Piauí apresentam semelhanças entre si no que se refere à predominância de gimnospermas e ausência ou raridade de pteridófitas. Há ainda semelhanças entre estes dois sítios quanto ao contexto tafonômico, justificadas pela possível presença de caules em posição de vida no SPSB (Fig. 5A-B) e os já conhecidos registros em Teresina (Caldas *et al.*, 1989).

Em relação ao MNAFTO, os dois sítios do Piauí apresentam dissimilaridades, pois naquele depósito fossilífero há uma associação variada. Deve-se considerar, contudo, que a aparente maior diversidade florística na ocorrência do Tocantins pode ser decorrente da maior quantidade de pesquisas realizadas nessa região e não só devido a uma real diferença na composição florística. No entanto, ressalta-se a predominância numérica de samambaias arborescentes no MNAFTO, sendo o gênero *Tietea* o de maior ocorrência (Dias-Brito *et al.*, 2009; Tavares *et al.*, 2014). Nota-se uma

escassez de gimnospermas no MNAFTO, embora haja estudos focados neste grupo (Kurzawe *et al.*, 2013a, 2013b). Isto contrasta com a predominância de gimnospermas nas florestas piauienses de Teresina e Altos. Assim sendo, percebe-se que há diferenças importantes entre as florestas do Piauí em relação à ocorrência do Tocantins, quais sejam: (i) menor diversidade florística (decorrente, em parte, de um viés de pesquisa), (ii) predominância de gimnospermas em relação às pteridófitas, e ainda, (iii) diferente contexto tafonômico, visto que no Tocantins não se conhecem registros de caules fósseis em posição de vida.

Além das diferenças listadas acima, ainda há questões estratigráficas a serem resolvidas. Os caules fósseis da Bacia do Parnaíba são tradicionalmente referidos à Formação Pedra de Fogo (Plummer, 1948; Mesner & Wooldridge, 1964; Mabesoone, 1977; Faria Jr. & Truckenbrodt, 1980; Caldas *et al.*, 1989; Santos & Carvalho, 2004). Contudo, em trabalhos recentes focados no MNAFTO, os caules daquela área têm sido considerados como provenientes da Formação Motuca (Pinto & Sad, 1986; Dias-Brito *et al.*, 2009; Kurzawe *et al.*, 2013a; Capretz & Rohn, 2013). Este modelo contrasta com o contexto geológico das florestas fósseis de Teresina e de Altos, assim como em várias ocorrências de caules fósseis presentes no sul-sudeste do Maranhão, e tem sido recentemente contestado (Andrade *et al.*, 2014; Araújo *et al.*, 2016). Tanto a FFRP, em Teresina, como o novo sítio, SPSB, em Altos, possuem características que confirmam a sua origem em depósitos vinculados à Formação Pedra de Fogo. Em Altos, os caules ocorrem associados a ooides, (Fig. 3B), os quais são registrados unicamente na Formação Pedra de Fogo e considerados um aspecto sedimentar importante na definição da referida formação geológica, conforme Plummer (1948) e Faria Jr. & Truckenbrodt (1980). Já em Teresina (Caldas *et al.*, 1989), os troncos em posição de vida estão claramente em fácies típicas da Formação Pedra de Fogo: arenitos beges com intercalações de siltitos argilosos esverdeados e microbialitos (= esteiras bacterianas). Ainda em Teresina, prospecções recentes têm revelado estromatólitos, e uma grande concentração de ooides e clastos de sílex associados aos troncos, sendo todas estas características consideradas diagnósticas da Formação Pedra de Fogo (Plummer, 1948; Mesner & Wooldridge, 1964; Mabesoone, 1977; Faria Jr. & Truckenbrodt, 1980; Caldas *et al.*, 1989; Santos & Carvalho, 2004). Além disso, em Nova Iorque, no sudeste do Maranhão, às margens da

Represa Boa Esperança, 13 km sul da seção tipo da Formação Pedra de Fogo, podem ser observados numerosos troncos gimnospérmicos e alguns caules de pteridófitas (*Psaronius* sp.) claramente ainda inseridos nas rochas (*in situ*), aflorando sobre um nível de microbialitos, em associação a uma camada de brecha intraformacional contendo clastos de sílex, todas feições típicas desta unidade (Plummer 1948; Faria Jr. & Truckenbrodt, 1980; Santos & Carvalho, 2004). As ocorrências acima mencionadas, situadas no Piauí e sudeste do Maranhão, encontram-se mapeadas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2006) como áreas aflorantes da Formação Pedra de Fogo. Ressalta-se ainda, que as ocorrências de madeiras fósseis localizadas na porção nordeste da bacia estão restritas a essa unidade (Plummer, 1948; Caldas *et al.*, 1989). Cabe destacar também, que as análises de espectroscopia realizadas por Alencar *et al.* (2015) em amostras do sítio SPSB aportaram resultados com o mesmo padrão de composição química de amostras de caules coletados em Nova Iorque e Balsas (MA), municípios onde os estratos da Formação Pedra de Fogo afloram e apresentam caules fósseis em abundância (Plummer, 1948; Faria Jr. & Truckenbrodt, 1980).

Confirma-se portanto que, de modo geral, os caules fósseis encontrados no Permiano da margem nordeste da bacia, *e.g.* regiões sul-sudeste do Maranhão e sudoeste, oeste e noroeste do Piauí, são provenientes de depósitos pertencentes à Formação Pedra de Fogo, onde se encontra, inclusive, a seção tipo desta unidade, a área do Riacho Pedra de Fogo, no município de Pastos Bons, MA (Plummer, 1948). Por outro lado, a ocorrência de uma associação dominada por pteridófitas no estado do Tocantins (MNAFTO), supostamente proveniente da Formação Motuca, poderia ser interpretada como decorrente de uma mudança faciológica lateral e não necessariamente atribuída a uma posição estratigráfica diferenciada (superior) em relação às ocorrências da margem nordeste da bacia. Neste caso, haveria uma interdigitação lateral entre os depósitos dessas duas unidades, configurando-se assim um contato transicional entre as mesmas. Entretanto, a confirmação desta hipótese depende da realização de extensos trabalhos estratigráficos que abordem a correlação entre os depósitos de ambas as unidades ao longo da porção sul da bacia, como os que foram feitos por Andrade *et al.* (2015) e Araújo *et al.* (2016). Além disso, os contrastes observados entre essas paleofloras podem, ao invés de

refletir idades e/ou níveis estratigráficos diferentes, refletir distintas condições climáticas da bacia durante o Permiano.

Coimbra & Mussa (1984), baseados em fósseis de esfenófitas (Calamitaceae, do MNAFTO), postularam um ambiente úmido para esta região. Rößler (2006) caracterizou tanto o MNAFTO quanto a floresta petrificada de Chemnitz na Alemanha, ambas de idade permiana, como ambientes de terras úmidas, dominados por clima quente e úmido, mas com variações sazonais, devido ao predomínio de samambaias arborescentes. Em contraste, a dominância de gimnospermas em Teresina e Altos sugeriria a existência de um clima menos úmido e até, possivelmente, uma topografia mais elevada para esta região na época, já que este grupo se desenvolvia mais francamente em ambientes bem drenados e mais afastados dos corpos d'água e suas cercanias (plantas de ambientes xerófilos (Remy, 1975) durante o Paleozoico.

4.2 Medidas de proteção

O Sítio Paleobotânico São Benedito, considerado uma floresta fóssil, encontra-se muito próximo a uma área onde são desenvolvidas atividades agrícolas, o que de certa forma pode vir a prejudicar a conservação dos fósseis, na medida em que tais ações avançam. Embora por lei os fósseis sejam considerados como patrimônio da União (Brasil, 1942, 1988), isso não lhes confere a proteção desejável, especialmente tendo em vista a sua relevância científica. Isto se deve ao fato de que na prática, os bens tidos como patrimônio da União, por exemplo, sítios de natureza paleontológica, só passam a ter uma fiscalização com maior rigor quando estão inseridos dentro de um modelo de preservação específico. Em muitos casos, somente após a elaboração de um plano de manejo é que de fato a fiscalização passa a acontecer.

As ações de proteção aos jazigos paleontológicos do país ainda são ineficazes, apesar de já existirem algumas poucas leis com este objetivo. Após uma análise da legislação brasileira referente ao patrimônio fóssil, principalmente em relação às categorias de unidades de conservação do Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC) (Brasil, 2000), optou-se por apresentar algumas propostas que visam a preservação do referido sítio.

A Lei Federal 9.985 de julho/2000 (Brasil, 2000) que institui o SNUC, estabelece critérios e normas para a criação, implantação e gestão das unidades de conservação. O artigo 3º inciso VII da referida lei, postula que um dos objetivos é “proteger as características relevantes de natureza geológica, geomorfológica, espeleológica, arqueológica, paleontológica e cultural”. Este objetivo aplica-se, de forma direta, ao SPBP, tendo em vista que ele apresenta “características relevantes de natureza paleontológica” pela sua grande concentração de troncos fósseis permineralizados.

Conforme o Art. 7º desta lei, as Unidades de Conservação (UC's) que integram o SNUC, dividem-se em dois grupos com características distintas: (1) Unidades de Proteção Integral, que tem como objetivo básico preservar a natureza, sendo admitido apenas o uso indireto dos seus recursos naturais, com exceção dos casos previstos nesta lei, como coloca o inciso § 1º; e (2) Unidades de Uso Sustentável, que tem como objetivo básico compatibilizar a conservação da natureza com o uso sustentável de parcela dos seus recursos naturais, como está previsto no inciso § 2º (Brasil, 2000).

Entre as categorias de UC's incluídas nos dois grupos, somente a do Monumento Natural seria uma alternativa de preservação adequada e viável a ser aplicada no referido sítio. Conforme o artigo 12 do SNUC, o Monumento Natural tem como objetivo fundamental preservar sítios naturais raros, singulares ou de grande beleza cênica e pode ser aplicado em pequenas áreas (Brasil, 2000). Esta categoria de unidade de conservação, diferentemente das demais, as quais estão voltadas de forma mais direta para locais ou áreas com características de natureza biológica (fauna e flora), apresenta atributos que se aplicam mais comumente aos sítios paleontológicos, já tendo sido, por isso mesmo, aplicada ao MNAFTO (Dias Brito *et al.*, 2009).

Entre outras possíveis alternativas legais de proteção estão: a criação de um geoparque (UNESCO, 2010), ou ainda, o tombamento da área, ao se considerar os fósseis como um patrimônio cultural (Brasil, 1988), por meio de ação do Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional - IPHAN (Brasil, 1937). Não obstante, estas alternativas estão sendo aqui consideradas como procedimentos menos adequados, no caso do SPSB, pelas razões expostas a seguir. Inicialmente, a criação de um geoparque está vinculada a uma grande área geográfica e a um conjunto de sítios geológicos (UNESCO, 2010), características ausentes na área. O geoparque deve ser autossustentável, o que, pelo menos no presente caso, parece inviável. Em relação à segunda alternativa, geralmente

quando se promove o tombamento de um patrimônio, especialmente paleontológico, as possibilidades de acesso e de estudo se tornam mais complexas e burocráticas.

As diretrizes que regem um bem tombado devem estar de acordo com o Decreto-lei 25/1937 (Brasil, 1937), que previne quaisquer ações que não visem a conservação e/ou a restauração do patrimônio. Dessa forma, em caso de um tombamento, o prosseguimento às pesquisas científicas nesse sítio, o qual necessita de escavações e coletas de amostras, tornar-se-ia inviável devido aos impedimentos supracitados pelo referido decreto-lei. Além disso, não se pode esquecer que a área de estudo se encontra dentro de um assentamento do INCRA, o que por si só seria um complicador legal para obtenção do tombamento do sítio, pois tal situação impediria o livre acesso dos assentados à área por ventura demarcada pelo IPHAN. Deste modo, a única medida legal que permite a existência pacífica entre população local (incluindo assentados) e os fósseis, é a instalação do Monumento Natural prevista no SNUC. Problema semelhante existe na área hoje abrangida pela MNAFTO, pois as ocorrências fossilíferas situam-se em sua grande maioria dentro de propriedades rurais (Dias-Brito *et al.*, 2009). A única solução legal para se estabelecer uma proteção efetiva dos fósseis, sem gerar uma desapropriação de terras ou restrição de acesso à área, foi a de se optar pela categoria de Monumento Natural.

Deve-se ressaltar que a população local tem conhecimento da existência desses fósseis, mas até o momento não reconhece o valor científico e cultural dos mesmos. Para os populares, os troncos configuram-se apenas em “pedras que se parecem com madeiras”. Portanto, quaisquer propostas de conservação a serem implementadas junto ao sítio devem vir acompanhadas de estratégias que envolvam atividades de educação ambiental/patrimonial junto à comunidade do assentamento do INCRA (por exemplo, realização de oficinas, cursos, distribuição de cartilhas, entre outros), a fim de esclarecer e sensibilizar os assentados sobre a importância científica do sítio. Estas atividades devem ser colocadas em prática o mais breve possível para que, desta forma, a população local possa valorizar e colaborar efetivamente na preservação do depósito fossilífero (Ponciano *et al.*, 2011). A educação ambiental/patrimonial também poderá preparar a comunidade para cooperar e trabalhar em uma eventual atividade que se configure no aproveitamento sustentável deste patrimônio, tal como no

caso do geoturismo (Carvalho & Da Rosa, 2008), o qual possui um grande potencial para ser aplicado no caso do SPSB.

5 Conclusões

A nova floresta fóssil do SPSB, em Altos, é caracterizada por apresentar uma abundância de troncos gimnospérmicos de grande porte, alguns medindo até 180 cm de diâmetro. Foram catalogados aproximadamente 70 lenhos gimnospérmicos na área, não tendo sido detectado nenhum espécime de outros grupos taxonômicos. Estes lenhos poderão viabilizar a realização de futuros trabalhos taxonômicos, com intuito de estabelecer determinações em nível de família e/ou gênero/espécie, a partir da análise de seções delgadas obtidas por meio da confecção de lâminas petrográficas.

As duas florestas fósseis da porção nordeste da bacia, mencionadas neste trabalho, isto é, FFRP e SPSB, apresentam semelhanças entre si no que se refere a sua composição florística (com predomínio de gimnospermas) e contexto tafonômico (fósseis em provável posição de vida no SPSB), contrastando com a floresta do MNAFTO, situada no Tocantins, na porção sudoeste da bacia, onde há a dominância das pteridófitas e faltam espécimes em posição de vida. Tais dissimilaridades podem estar relacionadas tanto a diferenças estratigráficas como aos distintos padrões paleoclimáticos, paleoambientais e tafonômicos reinantes naquele período nas distintas porções da bacia. O registro destas florestas em diferentes formações, *e.g.* Pedra de Fogo *versus* Motuca, já é em si uma boa justificativa para ocorrência das diferenças expostas acima. Em relação ao paleoclima, é provável que na margem nordeste e sudeste da bacia tenha predominado um clima mais seco que favorecia o desenvolvimento de grandes florestas de gimnospermas, enquanto na margem sudoeste predominou um regime que favoreceu o florescimento das pteridófitas, melhor adaptadas à ambientes mais úmidos.

Estudos geológicos e tafonômicos são ainda necessários para confirmar a presença de troncos em aparente posição de vida em Altos. Porém, é evidente que esse sítio oferece informações valiosas para os estudos de vegetais fósseis desta bacia necessitando, portanto, de proteção, seja no âmbito municipal, estadual ou federal. Neste sentido, sugere-se a categoria do Monumento Natural, prevista no SNUC, como unidade de conservação para o SPSB, a exemplo do que já foi aplicado na floresta

fóssil do Tocantins, ou seja, o MNAFTO. Há ainda a possibilidade futura de se desenvolver o paleoturismo nesse sítio, o que pode ser um aliado na preservação do mesmo, desde que essa atividade seja realizada mediante um planejamento adequado e consenso com a população local.

Agradecimentos - Os autores agradecem a Maria da Conceição Fernandes de Paiva Costa, Joira Mara Fernandes de Paiva Costa e Francisco José Silva pelo acesso ao “Sítio Paleontológico São Benedito”, ao INCRA, pelos dados técnicos e mapas fornecidos, e às revisoras Rosemarie Rohn-Davies (UNESP-Rio Claro) e Tatiane M.V. Tavares (UFTO-Araguaína), por suas sugestões que contribuíram para a melhoria do manuscrito original e aos editores Maria do Carmo Lima e Cunha, Paulo Alves de Souza e um anônimo pela revisão e comentários finais do manuscrito. DMC agradece à UFPI pela concessão de bolsa (processo nº CCN-067/2010), e RI e JCC agradecem ao CNPq, pelos auxílios concedidos via projeto de pesquisa e bolsa (processos nº. 483704/2010-5, 401848/2010-8 e PQ309211/2013-1). Esta pesquisa é parte integrante da dissertação de mestrado da autora sênior desenvolvida junto ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal de Pernambuco.

Referências

- Andrade, L.S., Nogueira, A.C.R. & Silva Junior, J.B.C. 2014. Evolução de um Sistema Lacustre Árido Permiano, parte Superior da Formação Pedra de Fogo, Borda Oeste da Bacia do Parnaíba. *Geologia USP, Série científica*, 14(4): 3-60.
- Alencar, W.J., Santos, F.E.P., Cisneros, J.C., Silva, J.H., Freire, P.T.C. & Viana, B.C. 2015. Spectroscopic analysis and X-ray diffraction of trunk fossil from the Parnaíba Basin, Northeast Brazil. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 135: 1052-1058.
- Araújo, R.N., Nogueira, A.C.R., Bandeira, J., Angélica, R.S. 2016. Shallow lacustrine system of the Permian Pedra de Fogo Formation, Western Gondwana, Parnaíba Basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 67: 57-70.
- Brasil. 1937. *Decreto-Lei 25 de novembro de 1937. Organiza a proteção do patrimônio histórico e artístico nacional*. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/_03/decreto-lei/del0025.htm>. Acesso em: 08 dez. 2012.
- Brasil. 1942. *Decreto-lei nº 4.146, de março de 1942. Dispõe sobre a proteção de depósitos fossilíferos*. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1937-1946/De4146.htm>. Acesso em: 05 dez. 2012.
- Brasil. 1988. *Constituição da República Federativa do Brasil de 1988*. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constitui%C3%A7ao.htm>. Acesso em: 06 dez. 2012.
- Brasil. 2000. *Lei nº 9.985, de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências*. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/Leis7L9985.htm>. Acesso em: 07 dez. 2012.

- Brongniart, A. 1872. Notice sur le *Psaronius brasiliensis*. *Bulletin de la Société Botanique de France*, 19: 3-10.
- Caldas, E.B., Mussa, D., Lima Filho, F.P.G. & Rösler, O. 1989. Nota sobre a ocorrência de uma floresta petrificada de idade permiana em Teresina, Piauí. *Boletim IG-USP, Publicação Especial*, 7: 69-87.
- Capretz, R.L. & Rohn, R. 2013. Lower Permian stems as fluvial paleocurrent indicators of the Parnaíba Basin, northern Brazil. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 45: 69-82.
- Carvalho, I.S. & Da Rosa, A.A.S. 2008. Paleontological tourism in Brazil: examples and discussion. *Arquivos do Museu Nacional*, 66(1): 271-283.
- Coimbra, A. & Mussa, D. 1984. Associação lignitaoflorística na Formação Pedra de Fogo (Arenito Cacunda), Bacia do Maranhão-Piauí, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., 1984, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, SBG, v. 2, p. 591-605.
- Cox, C.B. & Hutchinson, P. 1991. Fishes and amphibians from the Late Permian Pedra de Fogo Formation of northern Brazil. *Palaeontology*, 34: 561-573.
- CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2006. *Mapa Geológico do Estado do Piauí*. Teresina, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2 v., escala 1:1.000.000.
- Dias-Brito, D., Rohn, R., Castro, J.C., Dias, R.R. & Rößler, R. 2009. Floresta petrificada do Tocantins Setentrional - O mais exuberante e importante registro florístico tropical-subtropical permiano no Hemisfério Sul. In: Winge, M., Schobbenhaus, C., Souza, C.R.G., Fernandes, A.C.S., Berbert-Born, M., Queiroz, E.T. & Campos, D.A. (Eds.). *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. Brasília, CPRM/SIGEP, 2: 337-354.
- Dolianiti, E. 1954. A flora do Carbonífero Inferior de Teresina, Piauí. *Boletim do Departamento Nacional de Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia*, 148: 1-56.
- Faria Jr., L.E.C. 1979. *Estudo sedimentológico da Formação Pedra de Fogo - Permiano Bacia do Maranhão*. Pará, 56p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Ciências Geofísicas e Geológicas, Universidade Federal do Pará.
- Faria Jr., L.E.C. & Truckenbrodt, W. 1980. Estratigrafia e petrografia da Formação Pedra de Fogo – Permiano da Bacia do Maranhão, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., 1980, Balneário Camboriú. *Anais...* Balneário Camboriú, SBG, v. 2, p. 740-754.
- Goés, A.M.O. & Feijó, F.J. 1994. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 8(1): 57-67.
- Iannuzzi, R. & Vieira, C.E.L. 2005. *Paleobotânica*. Porto Alegre, Editora da UFRGS, 167p.
- Kurzawe, F., Iannuzzi, R., Merlotti, S., Rößler, R. & Noll, R. 2013a. New gymnospermous woods from the Permian of the Parnaíba Basin, Northeastern Brazil, Part 1: *Ductoabietoxylon*, *Scleroabietoxylon* and *Parnaiboxylon*. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 195: 37-49.
- Kurzawe, F., Iannuzzi, R., Merlotti, S. & Rohn, R. 2013b. New gymnospermous woods from the Permian of the Parnaíba Basin, Northeastern Brazil, Part 2: *Damudoxylon*, *Kaokoxylon* and *Taeniopitys*. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 195: 50-64.

- Mabesoone, J.M. 1977. Paleozoic- Mesozoic Deposits of the Piauí-Maranhão Syneclyse (Brazil): Geological History of a Sedimentary Basin. *Sedimentary Geology*, 19: 7-38.
- Mesner, J.C. & Wooldridge, L.C. 1964. Maranhão Paleozoic Basin and Cretaceous Coastal Basins, Northern Brazil. *Bulletin of the American Association Petroleum Geologist*, 48(9): 1475-1512.
- Mussa, D. & Coimbra, A.M. 1987. Novas Perspectivas de Comparação entre as taofloras permianas (de lenhos) das Bacias do Parnaíba e do Paraná: In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 10., 1987, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, SBP, v. 2, p. 901-923.
- Neregato, R., Rößler, R., Rohn, R. & Noll, R. 2015. New petrified calamitaleans from the Permian of the Parnaíba Basin, central-north Brazil. Part I. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 215: 23-45.
- Pinto, C.P., Sad, J.H.G., 1986. Revisão da Estratigrafia da Formação Pedra de Fogo, borda sudoeste da Bacia do Parnaíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 34., 1986, Goiás. *Anais...* Goiás, SBP, p. 346-358.
- Oliveira, E. 1934. Ocorrência de plantas carboníferas da flora Cosmopolita no Estado do Piauhy. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 6: 113-118.
- Pelourde, F. 1912. Observations sur le *Psaronius brasiliensis*. *Annales des Sciences Naturelles Botanique*, 9: 337-352.
- Ponciano, L.C.M.O., Castro, A.R.S.F., Machado, D.M.C., Fonseca, V.M.M. & Kunzler, J. 2011. Patrimônio Geológico-Paleontológico *In Situ* e *Ex Situ*: Definições, Vantagens, Desvantagens e Estratégias de Conservação. In: Carvalho, I.S., Srivastava, N.K., Strohschoen Jr., O. & Lana, C.C. (Eds.). *Paleontologia: Cenários de Vida*. Rio de Janeiro, Interciência, v. 4, p. 853-870.
- Plummer, F.B. 1948. *Estados do Maranhão e Piauí*. Rio de Janeiro, Conselho Nacional do Petróleo, 47p. (Relatório Interno).
- Price, L.I. 1948. Um anfíbio labirintodonte da Formação Pedra-de-Fogo, Estado do Maranhão. *Boletim do Departamento Nacional de Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia*, 124: 1-32.
- Remy, W. 1975. The floral changes at the Carboniferous-Permian boundary in Europe and North American. In: Barlow, J.A. (Ed.). *The Age of the Dunkard*. Morgantown, West Virginia Geological and Economic Survey, p.305-355.
- Rößler, R. 2006. Two remarkable Permian petrified forests: correlation, comparison and significance. In: Lucas, S.G., Cassinis, G., Schneider, J.W. (Eds.). Non-marine Permian Biostratigraphy and Biochronology. *Geological Society of London Special Publications*, 265: 39-63.
- Rößler, R. & Galtier, J. 2002a. First *Grammatopteris* tree ferns from the Southern Hemisphere e new insights in the evolution of the Osmundaceae from the Permian of Brazil. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 121: 205-230.
- Rößler R. & Galtier, J. 2002b. *Dernbachia brasiliensis* gen nov. et sp. nov. a new small tree fern from the Permian of NE Brazil. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 122: 239-263.

Santos, M.E.C.M. & Carvalho, M.S.S. 2004. *Paleontologia das bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís: Reconstituições Paleobiológicas*. 2a. ed. Rio de Janeiro, CPRM Serviços Geológicos do Brasil, 194p.

Silva, A.P.J., Lopes, R.C., Vasconcelos, A.M. & Bahia, R.B.C. 2003. Bacias Sedimentares Paleozoicas e Meso-Cenozoicas Interiores. In: Bizzi, L.A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R.M. & Gonçalves, J.H. (Eds.). *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Texto, mapas & SIG*. Brasília, CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, p. 55-85.

Tavares, T.M.V., Rohn, R., Rößler, R. & Noll, R. 2014. Petrified Marattiales pinnae from the Lower Permian of North-Western Gondwana (Parnaíba Basin, Brazil). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 201: 12-28.

UNESCO. 2010. *Guidelines and Criteria for National Geoparks seeking UNESCO's assistance to join the Global Geoparks Network*. Disponível em: <<http://www.unesco.org/science/earthsciences/geoparks/geoparks.htm>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

Legenda das Figuras

Figura 1. Área de distribuição dos fitofósseis. A) Mapa de Localização do Sítio Paleobotânico São Benedito (SPSB), município de Altos, Piauí; B) Imagem do programa *Google Earth* mostrando o Sítio Paleobotânico São Benedito e os troncos georreferenciados dentro da mata de cacaís.

Figura 2. Troncos fósseis do SPSB. Espécimes: A) T64; B) T18. Ambos casos evidenciam o estado de preservação bastante fragmentário e irregular dos espécimes, o que impossibilitou a medida da maioria dos exemplares presentes no sítio. As setas indicam a medula e os anéis de crescimento em A e B, respectivamente.

Figura 3. Troncos fósseis do SPSB. Espécimes: A) T9, fragmento de tronco de gimnosperma polido, em corte transversal (UFPI PAB013); B) Ooides encontrados junto a base do tronco T62. Escalas: 10 cm para A, 5 cm para B. A seta em A, indica os possíveis anéis de crescimento.

Figura 4. Troncos fósseis do Sítio Paleobotânico São Benedito, Altos, Piauí. Espécimes: A) T12, seção delgada em lâmina petrográfica, feita a partir de corte transversal do tronco de gimnosperma polido (UFPI PAB014); B) Detalhe de A, mostrando a preservação de traqueídeos (t) do xilema secundário e raios do xilema (r). Escalas: 500 µm para A, 100 µm para B.

Figura 5. Troncos fósseis do Sítio Paleobotânico São Benedito, Altos, Piauí. Espécimes: A) T31; B) T23, dois troncos em provável posição de vida; A); D); F); H) Mostram a medula relativamente bem preservada (setas); D) T66; C) T61; E) T15, troncos rolados; G) Concentração de troncos fragmentados próximo ao T48; H) T60, em posicionamento inclinado, sugerindo possível posição de vida. Escala: 10 cm.

Figura 6. Troncos fósseis de grande porte no Sítio Paleobotânico São Benedito, Altos, Piauí. Espécimes: A) T18, medula não preservada, mas possíveis anéis de crescimento bem visíveis (seta); B) T26, maior tronco catalogado no sítio, com diâmetro de 180 cm e a medula possivelmente preservada (seta); C) T4 e D) T50, troncos de grande porte, rolados.

Tabela 1. Georreferenciamento dos troncos fósseis do Sítio Paleobotânico São Benedito, Altos, Piauí.

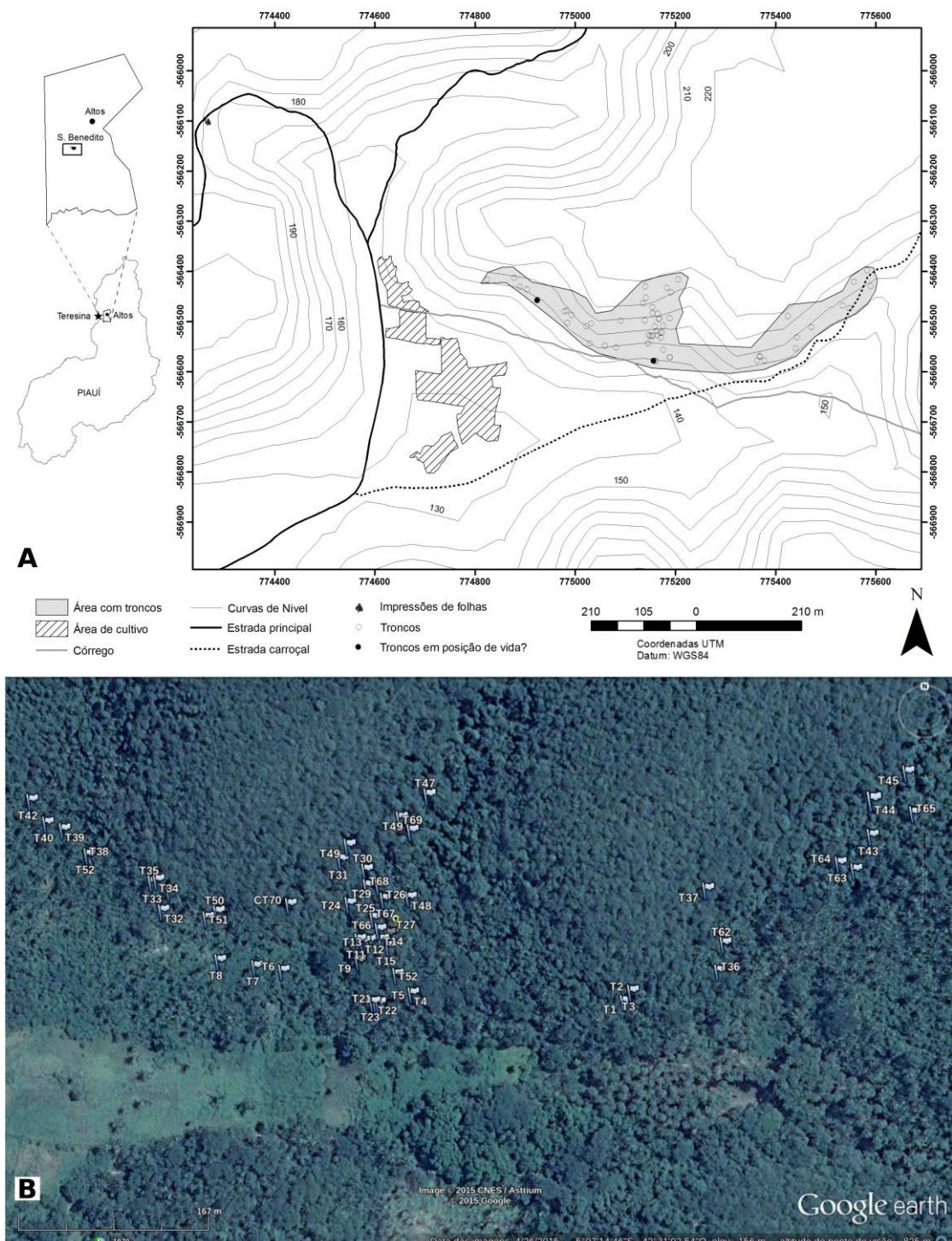


Figura 1.

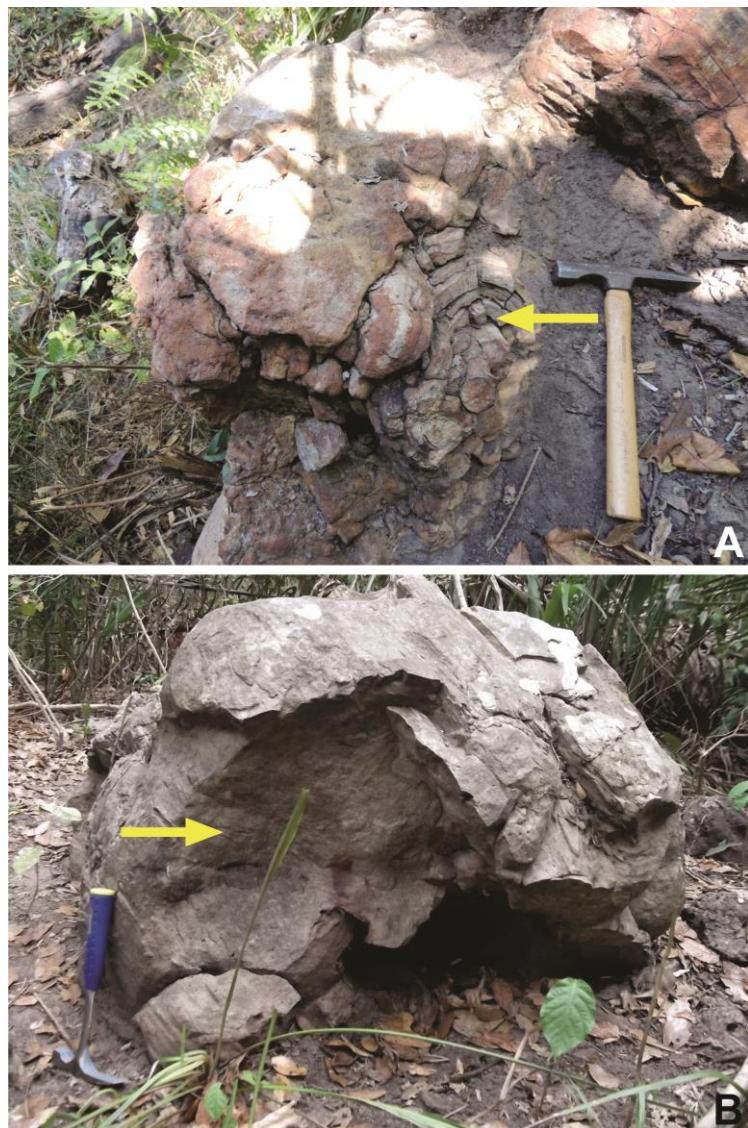


Figura 2.

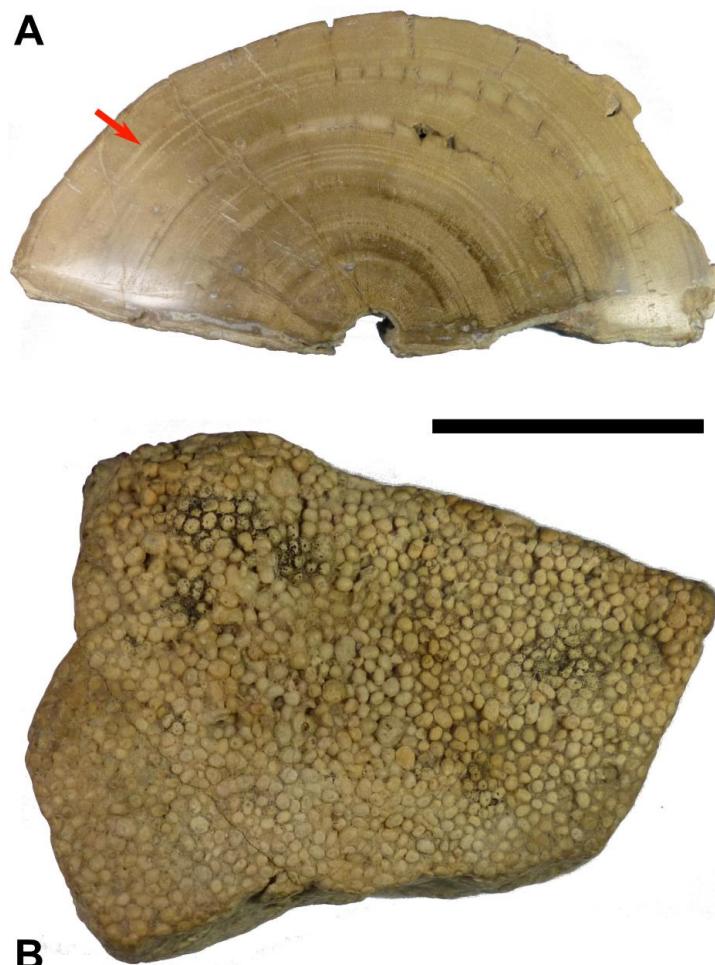


Figura 3.

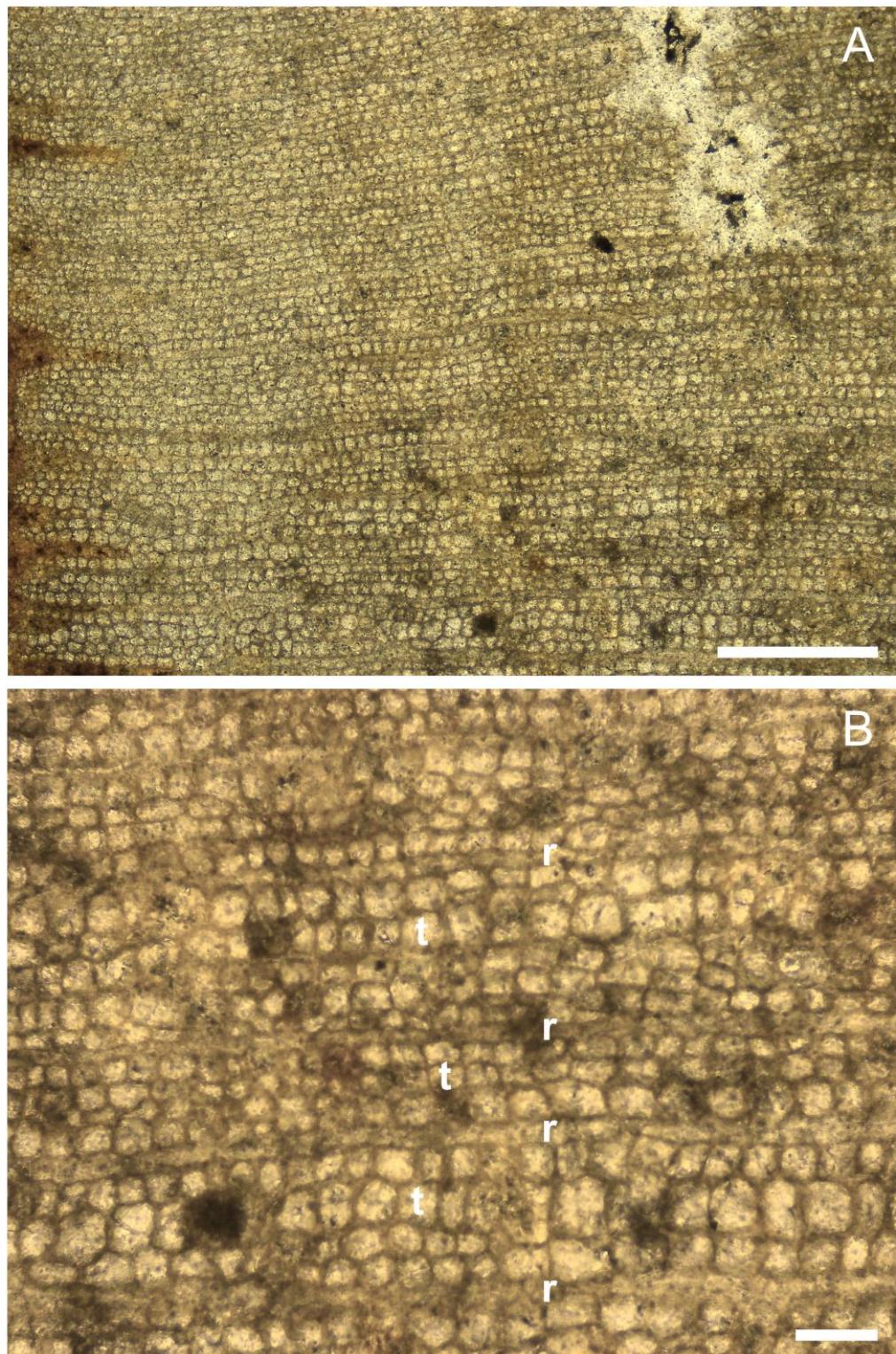


Figura 4.



Figura 5.



Figura 6.

Tabela 1.

Troncos	Latitude	Longitude	Altitude	Diâmetro	Observações
T1	S 05° 07' 15,8"	O 42° 30' 58,7"	140 m	30 cm	Horizontalizado a 3,70 m e aprox. 13, 5° SO do T2.
T2	S 05° 07' 15,5"	O 42° 30' 58,5"	154 m		Levemente inclinado, parcialmente recoberto por solo.
T3	S 05° 07' 15,5"	O 42° 30' 58,5"	155 m		Levemente inclinado e de pequeno porte.
T4	S 5° 7'15.57"	O 42°31'4.34"	141 m		Levemente inclinado, com três fragmentos associados, 50 cm de distância entre eles.
T5	S 05° 07' 15,6"	O 42° 31' 04,3"	146 m		Horizontalizado, comprimento aproximado de 70 cm.
T6	S 05° 07' 15,0"	O 42° 31' 07,8"	139 m		Horizontalizado, próximo à trilha.
T7	S 05° 07' 14,8"	O 42° 31' 08,5"	136 m		Rolado a 17,10 m distância a SE do caule T6.
T8	S 05° 07' 14,8"	O 42° 31' 08,5"	136 m	1,60 m	Horizontalizado, aproximadamente 90 cm de comprimento, elevado grau de compactação.
T9	S 05° 07' 14,8"	O 42° 31' 08,5"	143 m		Horizontalizado, fragmento pequeno de 40 cm de comprimento, 12 m de distância do caule T8. Coletado.
T10	S 05° 07' 14,7"	O 42° 31' 05,8"	123 m	1,70 m	Fragmento rolado, grande porte (aproximadamente 80 cm de comprimento) e com anéis parcialmente visíveis.
T11	S 05° 07' 14,1"	O 42° 31' 05,7"	132 m		Próximo a uma grande concentração de outros horizontalizados ou rólados.
T12	S 05° 07' 14,7"	O 42° 31' 05,6"	123 m		Fragmento pequeno rolado com 40 cm de comprimento. Amostra coletada.
T13	S 05° 07' 14,1"	O 42° 31' 05,7"	132 m		Próximo a uma grande concentração de outros troncos horizontalizados.
T14	S 05° 07' 14,2"	O 42° 31' 05,6"	133 m		Fragmentos grandes e pequenos a 3,5 m de distância do T11.
T15	S 05° 07' 14,1"	O 42° 31' 05,5"	133 m	> 75 cm	Levemente inclinado, e vários fragmentos associados, a 6,80 m do T12.
T16	S 05° 07' 14,1"	O 42° 31' 05,1"	133 m		Fragmento horizontalizado, comprimento aproximado de 60 cm, vários fragmentos pequenos associados, a 7,85 m de distância do caule T13.
T17	S 05° 07' 14,3"	O 42° 31' 04,9"	134 m	1,60 m	Muito fragmentado, encontra-se à 8,5 m do T14. Amostras coletadas.
T18	S 05° 07' 14,0"	O 42° 31' 04,9"	142 m	1,60 m	Concentração de três troncos horizontalizado com largura aproximada de 75 e 50 cm, grande porte, medula não preservada, 2,90 m de distância do T17.
T19	S 05° 07' 14,0"	O 42° 31' 04,8"	144 m		Horizontalizados com vários fragmentos associados, a 4,40 m de distância do caule T15.
T20	S 5° 7'14.18"	O 42°31'5.62"	155 m		Junto ao um aglomerado de troncos menores, 12,30 m de distância a N do Tronco 17. Amostras coletadas.
T21	S 05° 07' 15, 8"	O 042° 31'05,2"	151 m		Vários fragmentos em níveis acima dos troncos T20 e T21.
T22	S 05° 07' 15, 8"	O 05° 07' 15, 8"	151 m		Horizontalizado, comprimento aproximado 70 cm.
T23	S 05° 07' 15, 8"	O 042° 31'05,4"	152 m		De grande porte, posição de vida?
T24	S 05° 07' 13,2"	O 042° 31' 06,0"	143 m		Fragmento, rolado a 6,30 m 20° NO do T23.
T25	S 05° 07' 13,1"	O 042° 31' 05,1"	150 m		Na horizontal, relativamente bem preservado.
T26	S 05° 07' 13,1"	O 042° 31' 05,0"	149 m		Horizontalizado, de grande porte com a medula preservada.
T27	S 05° 07' 13,5"	O 042° 31' 04,8"	152 m		Fragmento rolado próximo ao caule T26.
T28	S 05° 07' 14,2"	O 42° 31' 05,5"	143 m	30 cm	Talvez, parte de um ramo que está aflorando?
T29	S 05° 07' 12,7"	O 42° 31' 05,1"	159 m		Horizontalizado, talvez com a medula preservada.
T30	S 05° 07' 12,3"	O 42° 31' 05,5"	150 m		Na horizontal, fragmentado e com intercalações de quartzo.
T31	S 05° 07' 12,1"	O 42° 31' 06,1"	153 m	70 cm	Em posição de vida? Coletado um fragmento rolado próximo a ele.
T32	S 05° 07' 13,4"	O 42° 31' 11,0"	127 m		Levemente inclinado, comprimento 90 cm.
T33	S 05° 07' 12,8"	O 42° 31' 10,7"	134 m		Levemente Inclinado, parcialmente coberto por solo.
T34	S 05° 07' 12,6"	O 42° 31' 11,0"	138 m		Horizontalizado ou rolado? Bastante coberto por solo.
T35	S 05° 07' 12,6"	O 42° 31' 11,2"	141 m		Com a medula visível?
T36	S 05° 07' 15"	O 42° 30' 56,2"	194 m		Rolado com quatro fragmentos associados.
T37	S 05° 07 12,9"S	O 42° 30' 56,7"	183 m		Rolado com a medula preservada.
T38	S 05° 07' 9"	O 42° 31' 12,9"	140 m		Aglomeração de fragmentos de Troncos com comprimentos aproximados de 30 cm.
T39	S 05° 07' 11,2"	O 42° 31' 13,6"	139 m		Fragmento rolado, de pequeno porte.
T40	S 05° 07' 11"	O 42° 31' 14,1"	137 m		Dois troncos horizontalizados, pequenos com a medula preservada, provavelmente da mesma árvore.
T41	S 05° 07' 10,4"	O 42° 31' 14,5"	131 m		Concentração de troncos grandes.
T42	S 05° 07' 10,6"	O 42° 31' 16,2"	122 m		Fragmento pequeno, rolado.
T43	S 5° 7' 11,5"	O 42° 30' 52"	126 m		Horizontalizado, de médio porte, no meio da trilha, e como a medula preservada?
T44	S 5° 7' 9,9"	O 42°30 51,6"	140 m		Rolados de pequeno porte.
T45	S 5°7' 3,6"	O 42° 30' 51,6"	149 m		Fragmento rolado, com a medula parcialmente preservada.
T46	S 5° 7' 10,5"	O 42° 31' 3,8"	173 m		Vários fragmentos associados.
T47	S 5° 7' 11,4"	O 42° 31' 4,3"	175 m		Concentração de fragmentos grandes em comprimento, alguns com a medula parcialmente preservada.
T48	S 5° 7'13.04"S	O 42° 31'4. 36"	157 m	80 cm?	Na horizontal? Com a medula preservada; comprimento mínimo: 1,78 m.
T49	S 5° 7'11.73"S	O 42°31'5.91"	157 m		Fragmento pequeno, com anéis visíveis.
T50	S 5° 7'13.40"	O 42°31'9.45"	161 m		Apresenta grande porte com outros associados, inseridos em

T51	S 5° 7'13.56"	O 42°31'9.75"	161 m		um afloramento de arenito.
T52	S 5° 7'15.06"	O 42°31'4.75"	154 m		Encontra-se associados a vários fragmentos, 8,0 m do T50.
T53	S 5° 7'14.83"	O 42°30'57.97"	163 m	94 cm	Levemente inclinado, medula fragmentada.
T54	S 5° 7'14.64"	O 42°30'57.92"	163 m	90 cm	Inclinado, na horizontal com a medula parcialmente preservada.
					Vários fragmentos a 10 cm do T73. Alguns com anéis visíveis.
T55	S 5° 7'14.64"	O 42°30'57.73"	150 m	>80 cm	Fragmento rolado, comprimento aprox. 80 cm.
T56	S 5° 7'14.08"	O 42°30'57.80"	157 m		Fragmento grande com mais de três fragmentos menores associados.
T57	S 5° 7'14.09"	O 42°30'57.70"	161 m		Dois fragmentos rolados, comprimentos aproximados: 60 e 70 cm. .
T58	S 5° 7'13.04"	O 42°30'56.37"	169 m		Fragmento pequeno soterrado no solo, 30 m de distância do caule T55.
T59	S 5° 7'12.14"	O 42°30'56.73"	170 m	90 cm	Cinco fragmentos grandes, relativamente bem preservados; tronco ferrificado próximo?
T60	S 5° 7'14.25"	O 42°30'56.65"	159 m		Fragmentos grandes horizontalizados muito próximos. Medula preservada?
T61	S 5° 7'14.16"	O 42°30'56.93"	159 m		Fragmento horizontalizado, com a medula parcialmente preservada.
T62	S 5° 7'14.24"	O 42°30'56.11"	162 m	50 cm	Levemente inclinado, com vários fragmentos associados; anéis de crescimentos visíveis e presença de oólitos próximo a ele.
T63	5° 7'12.33"	O 42°30'52.73"	162 m		Horizontalizado? No meio da trilha.
T64	S 5° 7'12.16"	O 42°30'53.15"	169 m		Muito fragmentado, parte da medula parcialmente preservada.
T65	S 5° 7'10.91"	O 42°30'51.34"	174 m		Horizontalizado? Parcialmente coberto por solo.
T66	S 5° 7'13.87"	O 42°31'5.19"	155 m	40 cm	Levemente inclinado, medula e anéis de crescimento parcialmente preservados.
T67	S 5° 7'13.56"	O 42°31'5.32"	158 m		Associação de caules grandes horizontalizados.
T68	S 5° 7'12.73"	O 42°31'5.46"	166 m		Levemente inclinado e semi-imerso no solo.
T69	S 5° 7'11.06"	O 42°31'4.54"	183 m		De grande porte rolado sem medula preservada.
T70	S 5° 7'13.21"	O 42°31'7.54"	160 m		Horizontalizados, levemente inclinado com a medula preservada.

New petrified forest in Maranhão, Permian (Cisuralian) of the Parnaíba Basin, Brazil

Domingas Maria da Conceição^{a*}, Luiz Saturnino de Andrade^b, Juan Carlos Cisneros^{a,c}, Roberto Iannuzzi^d, Agostinha Araújo Pereira^e, Francisco Carlos Machado^f

^aCentro de Tecnologia e Geociências, UFPE, Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n Cidade Universitária, 50740-530, Recife, PE, Brazil. *domingasmary@hotmail.com*.

^bInstituto de Geociências, UFPA, Rua Augusto Correa 1, 66075-110, Belém, PA, Brazil.
saturnino@ufpa.br.

^cCentro de Ciências da Natureza, UFPI, Ininga, 64049-550, Teresina, PI, Brazil.
juan.cisneros@ufpi.edu.br.

^dDepartamento de Paleontologia e Estratigrafia, UFRGS, Avenida Bento Gonçalves 9.500, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brazil. *roberto.iannuzzi@ufrgs.br.*

^eCentro de Pesquisa de História Natural e Arqueologia do Maranhão, CPHNAMA, Rua do Giz 59, Praia Grande, 65010-680, São Luís, MA, Brazil. *agostinhap@yahoo.com.br*

^fPrograma de Pós-Graduação em Sociedade, Tecnologia e Meio Ambiente, UniEVANGÉLICA, Av. Universitária, Km 3,5, Anápolis, GO, 75070-290, CP 122 e 901; and Associação Bacelarense de Proteção ao Meio Ambiente, Duque Bacelar, MA, Brazil.
fcarlosmachado@gmail.com

*Corresponding author

ABSTRACT

This work presents a new fossil plant-bearing area located in the municipalities of Duque Bacelar and Coelho Neto, Maranhão State, Brazil, recovered from lower Permian (Cisuralian) strata of the Pedra de Fogo Formation, northeastern portion of the Parnaíba Basin. The area comprises more than five exposures with assemblages formed mostly by large gymnosperm woods, a number of them in life-position (reaching up to ~2,30 m in height and 1,15 m in diameter) and, in lesser degree, by horizontal tree-fern stems (up to 5 m in length), some of

them being referable to *Psaronius* sp. The fossils are recorded in sedimentary beds of continental origin that accumulated in shallow, nearshore areas of large lakes, which eventually were affected by rapid burial episodes generated by non-channelized, high energy fluvial systems. The new fossil assemblages are included within lacustrine rocks placed at the base of the Pedra de Fogo Formation, i.e., Sílex Basal Member, near the contact with the underlying Piauí Formation (Pennsylvanian). This observation contrasts with previous studies at the southwestern portion of the basin, where the stratigraphic position of plant fossils is referred to the upper Pedra de Fogo Formation (Trisidela Member) or even to the overlying Motuca Formation. The new sites currently suffer damage from human activities and require urgent actions in order to protect them. Based on the current laws, some measures of protection for these sites are discussed and proposed herein.

Keywords: Fossil forest, gymnosperms, tree-ferns, Pedra de Fogo Formation, Parnaíba Basin, geoconservation.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma nova área fitofossilífera localizada nos municípios de Duque Bacelar e Coelho Neto, no Maranhão, Brasil, e posicionada em estratos do Permiano inferior (Cisuraliano) da Formação Pedra de Fogo, na porção nordeste da bacia do Parnaíba. A área apresenta mais de cinco afloramentos com associações formadas, principalmente, por lenhos gimnospérmicos de grande porte, alguns em posição de vida (atingindo até ~2,30 m de altura e 1,15 m de diâmetro) e, secundariamente, por caules de samambaias arborescentes horizontalizados (de até 5 m de comprimento), com espécimes atribuíveis a *Psaronius* sp. Os fósseis ocorrem em camadas sedimentares interpretadas como de origem continental, depositadas em regiões marginais e rasas (*nearshore*) de grandes lagos continentais, os quais eram eventualmente afetados por episódios de rápida deposição gerados por sistemas fluviais não canalizados de alta energia. As novas associações encontram-se inseridas em rochas lacustres posicionadas na base da Formação Pedra de Fogo, i.e., Membro Sílex Basal, próximas ao contato com a subjacente Formação Piauí (Pensilvaniano). Esta observação contrasta com estudos anteriores na margem sudoeste da bacia, que referem o posicionamento estratigráfico dos fitofósseis à parte superior da Formação Pedra de Fogo (Membro Trisidela) ou, ainda, à sobrejacente Formação Motuca. Os novos sítios vêm sendo impactados por atividades antrópicas e precisam de medidas urgentes de proteção. Com base nas leis vigentes, algumas medidas de proteção são discutidas e sugeridas aqui.

Palavras-chave: Floresta fóssil, gimnospermas, samambaias arborescentes, Formação Pedra de Fogo, Bacia do Parnaíba, geoconservação.

1. Introduction

Plant fossils are frequently found in Permian sedimentary strata of the Parnaíba Basin. Studies on fossilized plants, however, are mostly restricted to tree-ferns and other pteridophytes (Brongniart, 1872; Pelourde, 1912; Oliveira, 1934; Dolianiti, 1954; Coimbra and Mussa, 1984; Herbst, 1985, 1986, 1992, 1999; Rößler and Galtier 2002a, 2002b, 2003; Neregato et al., 2015) which predominate in the southwestern portion of the basin. Although fossil plant-bearing outcrops remain poorly explored, these remains have been the subject of studies in recent years, mostly focused on taxonomy, based also on fossils from the southwestern portion of the Parnaíba Basin (Kurzawe et al., 2013a, 2013b; Tavares et al., 2014; Neregato et al., 2015). Among them, the works by Kurzawe et al. (2013a, 2013b) contributed considerably to the construction of a reference framework for studies of gymnosperm stems in the basin, which are predominant in the northeastern portion and are still poorly known. The study of gymnosperms is important for our understanding of the complexity of Palaeozoic fossil plant relationships and the depositional environments present during the Permian.

At present, few published studies deal with fossil plant-bearing sites in the northeastern portion of the Parnaíba Basin, despite of the abundance of these fossiliferous exposures. Only one pteridophyte species has been reported from this area, i.e., *Psaronius brasiliensis*, originally described in the 19th century by Brongniart (1872), based on samples from deposits that crop out between the municipalities of Amarante and Oeiras southern in the state of Piauí. Apart from this study, only reports of the genus *Psaronius* (Lisboa 1914) and a (pteridospermic) gymnosperm, i.e., *Teresinoxylon eusebioi* Mussa 1989 (in Caldas et al., 1989) from the “Poti River Fossil Forest”, have been published, both from the municipality of Teresina, also in the Piauí state.

The aim of this contribution is to present preliminary information regarding a new fossil forest that comprises portions of the municipalities of Duque Bacelar and Coelho Neto, in Maranhão State (Fig. 1), northeast Parnaíba Basin, where sedimentary rocks of the Piauí and Pedra de Fogo Formations (Pennsylvanian and Cisuralian, respectively [Santos and Carvalho, 2009; Iannuzzi and Langer, 2014; Cisneros et al., 2015]) are exposed. The study

area includes five sites, here referred to as: “Ladeira do Olho d’Água”, “Morro das Pedras Brancas”, “Fazendinha”, “Olho d’Água”, and “Morro da Pandora”. The fossil assemblages are formed by an expressive number of large gymnosperm stems and, in lesser numbers, tree-fern stems (*Psaronius* sp.). Finally, considering the serious anthropogenic impacts observed in the fossils at some of the new outcrops, measures of protection for these sites, based on the current laws, are discussed and proposed.

2. Geology

The Parnaíba Sedimentary Basin (Fig. 1), essentially of Palaeozoic strata, comprises a wide area (approx. 300.000 km²) mostly placed within the states of Piauí, Maranhão and Tocantins in northeastern Brazil, and minor portions in the states of Ceará and Pará. This basin holds rocks with ages spanning from the Silurian to the Triassic (Santos and Carvalho, 2004). The studied exposures are included in sedimentary strata referable to the Pedra de Fogo Formation which, is characterized by rocks with predominance of silicified sandstone and siltstone, abundant layers of chert and limestone, and also silicified fossil stems and microbialites (oids, pisoids, bacterial mats and stromatolites). This formation is also home to a marine and continental fauna (Price, 1948; Plummer, 1948; Cox and Hutchinson, 1991; Cisneros et al., 2015) and, eventually, marine invertebrate traces (personal observation in Pastos Bons, Maranhão). The Pedra de Fogo Formation is divided in three members (*sensu* Faria Jr., 1979) being named, from base to top, Sílex Basal Member, Médio Member, and Trisdela Member. The Sílex Basal Member includes siltstone strata interbedded with carbonatic rocks (referred to carbonatic banks), associated to silica concretions. In the eastern portion of the basin, this member is represented by fine sandstone and siltstone, alternated by chert beds and, frequently, silica concretions. In the Médio Member, cross-stratification sandstone sequences predominate, being overlain by fine sediments (siltstones and shales), ending at the top with carbonatic banks associated to silica concretions. Finally, the Trisdela Member, being more represented in the middle and western portion of the basin, is formed by carbonatic shale laminations and interrupted chert strata, sometimes bearing cyclical fine sandstone and siltstone deposits, and plant fossils (Plummer, 1948; Faria Jr., 1979).

The age of the Pedra de Fogo Formation has been the source of debate by different authors although it has always being considered of Permian age. The palynological content was regarded as indicative of an early Permian age (Petri and Fulfaro, 1983). However, a more recent analysis dated the upper part of unit as Guadalupian (Dino *et al.*, 2002). Concerning plant fossils, Iannuzzi and Langer (2014) reported the occurrence of the species

R. schenkii (Heyer) Kerp which has been referred in central Europe to the Moscovian (middle Pennsylvanian) – Rotliegendes (early Permian) interval (Kerp, 1988). Controversial ages also came from vertebrate studies. The temnospondyli archegosaurid *Prionosuchus plummeri* (Price, 1948) was considered as evidence for a Cisuralian age (Petri and Fulfaró, 1983), although more recently, Cox and Hutchinson (1991) interpreted that its very long snout would represent an evolutionary grade more typical of a late Permian age (at that time, including the Guadalupian). Furthermore, the chondrichthyan *Itapyrodus*, previously known in this unit, was recorded in the Irati Formation of the Paraná Basin (Chahud et al., 2010), which was dated to 278.4 ± 5 Ma ago (Santos et al., 2006), i.e., earliest Kungurian age in current geologic time scale. Also, the stratigraphic range of the ctenacanth shark *Glikmanius* indicates an age between the Carboniferous and the Guadalupian (Ginter et al., 2005). A Kungurian age for the Pedra de Fogo Formation is further supported by recent discovery of *Captorhinus aguti*, a reptile species whose last appearance is in strata attributed to the mid-Kungurian in North America (Cisneros et al., 2015). The Pedra de Fogo palaeoflora has also been correlated with the Chemnitz fossil forest of Germany (Rößler, 2006) which has been dated to 278 ± 5 Myr ago (Kungurian, Rößler, 2006) but more recently dated to 290.6 ± 1.8 Ma (Cisuralian: late Asselian–early Sakmarian, Rößler et al., 2012). This unit has a broad distribution, especially in the central portion of the basin *sensu stricto* (i.e., excluding the overlaying Mesozoic Grajaú Basin), overlaying rocks of the Piauí Formation (early-to-middle Pennsylvanian; in Campanha and Rocha-Campos, 1979) and followed by the Motuca Formation (of probable early Permian age as well; in Cisneros et al., 2015) and the Sambaíba Formation (Triassic?, in Santos and Carvalho, 2009). Taking into account all above-mentioned probable fossil ages, a Cisuralian age for the Pedra de Fogo Formation can be accepted.

3. Study area

The fossiliferous outcrops reported herein are located in the vicinity of the towns of Duque Bacelar and Coelho Neto, eastern Maranhão State (Fig. 1), and are included within the protected Área de Preservação Ambiental dos Morros Garapenses (“Garapenses Hills Environmental Protection Area”, Maranhão, 2008). Although already known by local environmentalists, there are no published studies regarding these fossil plant assemblages. The main access route to the outcrops is the MA-34 highway, although most of these sites are not easily reachable, being located at the top of the hills (known as the “Morros Garapenses”). The autochthonous fossil assemblages crop out at slopes covered by dense palm forest (e.g.,

Afloramento Olho d'Água and Morro das Pedras Brancas), making the georeference work difficult in those areas.

It should be noted that the fossil stems present in the Morro das Pedras Brancas outcrop are very fragmented due to the existence of a local road that was constructed over fossil areas, including the life-position trees. In addition, the area is still used for agricultural purposes, e.g., sugar-cane crops, evincing a high impact of human-made damage (see Discussion).

4. Material and methods

The fieldwork activities that georeferenced the studied outcrops were carried out aiming to include the largest possible amount of plant fossils present in the area of the municipalities of Duque Bacelar and Coelho Neto. The following methodology was employed through this study: (1) analysis of satellite images of the region acquired through the program *Google Earth*; (2) prospection by land and register (cleaning, photograph, attribution of field numbers and identification at macroscopic level) of fossil specimens at the exposures; (3) georeferencing (acquisition of latitude, longitude and altitude) the fossils found; (4) gathering of sedimentologic profiles; (5) compiling of a data sheet (Table 1) including catalogue information for the specimens, following Conceição et al. (in press); (6) polishing and producing thin-sections in order to check the preservation level of internal tissues.

Measurement acquiring (diameter and length) of some specimens was not possible, due to the high degree of fragmentation, especially along transverse sections. This damage was produced either by modern weathering or by human activities the later being visible mostly in the stems that apparently rolled and/or are exposed in soil. In several cases, fossil concentrations were georeferenced as a single unit, due to the short distances (a few meters) existing between stems.

A microscopic analysis was performed through thin sections of transverse and longitudinal cuts of a gymnosperm trunk (specimen CPHNAMA PL122) in order to reveal the state of preservation of the internal tissues. Section and polishing was done in one of the tree-ferns stem (i.e., specimen UFPI PAB081) in order to reveal anatomical details in transverse section. The goal of these preparations was to assess the potential of the specimens from this area for future taxonomical studies.

4.1 Abbreviations

Fossil collections: **CPHNAMA**, Centro de Pesquisa de História Natural e Arqueologia do Maranhão, São Luís, Maranhão state, Brazil; **UFPI**, Universidade Federal do Piauí, Laboratório de Paleontologia, Teresina, Piauí state, Brazil. Fossil forests: **MNAFTO**, *Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins* (“Tocantins Fossil Forest National Monument”), Filadélfia, Tocantins state, Brazil; **FFRP**, *Floresta Fóssil do Rio Poti* (“Rio Poti Fossil Forest”), located in Teresina, Piauí state, Brazil; **SPSB**, *Sítio Paleobotânico São Benedito* (“São Benedito Palaeobotanical Site”), Altos, Piauí state, Brazil.

5. Results

5.1 Regional geological setting

The rocks studied herein are exposed discontinuously along road-cuts and hill slopes up to 40 m height, which are part of the dominant physiographic features of the relief in the area. Based on lithology (Fig. 2), the fossil content, and especially, the presence of chert and the stratigraphic placement of the studied rocks, it was possible to refer them to the Piauí (Pennsylvanian) and Pedra de Fogo (Cisuralian) formations.

Overall, the lower succession that belongs to the Piauí Formation (Fig. 3) consists of medium to fine sandstones, being mainly quartzose, yellowish, well selected and very rounded, forming small to medium tabular and festooned cross-stratification sets. These sets thin upwards, usually having flat topsets, which laterally have a low angle and mostly planar-stratification, and evincing some adhesion warts. Some intercalation between light-grey and reddish pelitic layers is observed, each one measuring a few centimetres, showing wavy to massive bedding. The top of this section is frequently marked by intense bioturbation characterized by paired perforations with a diameter ranging between 4–6 mm, here identified as the *Arenicolites* trace-fossil (Fernandes et al., 2002) (Fig. 3B).

The overlying succession represents the basal portion (Sílex Basal Member) of the Pedra de Fogo Formation (Fig. 4), which crops out unconformably over the Piauí Formation sandstone. This unconformity is related to the flooding surface that resulted from rising of the stratigraphic base level. Overall, the rocks of this unit are mainly orange-reddish to mottled mudstones. Wavy lamination prevails, grading upwards to asymmetric ripple marks and climbing cross-lamination. These mudstones intercalate with fine sandstone tabular beds (ranging from a few centimetres to some decimetres) which are massive or show planar-parallel lamination, and they are overlain by truncated undulating laminae (microhummocky) and pinch-and-swell stratification. Levels of both massive chert and chert breccia mark the base of this succession and are associated to probable bacterial mats and/or stromatolites (Fig.

5A). *Arenicolites* trace-fossils persist for less than one metre through the Piauí-Pedra de Fogo interface or transition within fine-grained sandstones (Fig 4F). Silicified gymnosperm stems occur along this succession, both horizontal or in life-position. Occasional trace fossils (cf. *Planolites*) are found (Fig. 5B).

5.2 Taphonomy and preservation mode of the fossils

More than 70 plant fossils (Table 1) were recognized, measured and georeferenced. They form assemblages dominated by large (up to 2.3 m long and 1.15 m in diameter, see Table 1) gymnosperm stems, tree-fern stems (i.e., *Psaronius* sp.; Fig. 6F, see Table 1) in lesser numbers also occurring. Plant fossils are usually found *ex situ* or partially within the sedimentary rocks, in horizontal position (allochthonous/parautochthonous specimens; Fig. 6A, B, C, D and G) or in life-position (autochthonous specimens, Fig. 7). They are generally well preserved, especially the stems with largest diameters, and despite considerable fragmentation of several specimens it is possible to recognize certain anatomical features, such as growth ring-like structures and medullae (Fig. 6E and 7C). Gymnosperm woods and assemblages considered to be allochthonous frequently occur at the top of the hills, in areas of higher weathering, and rarely in vertical position. Stems in life-position are commonly found associated to mudstone levels, whereas horizontal stems are usually *ex situ* or within sandstone beds bearing quartz lags and silex nodules. Life-position stems are also occasionally recorded in lowlands, partially covered by soil (e.g., Olho d'Água Outcrop, Fig. 6C, D). Tree-fern specimens are less representative in the exposures, showing a higher degree of fragmentation, however, it is still possible to recognize basic diagnostic anatomical features (e.g., vascular bundles and root mantle, Fig. 4B, 6F). These are found within mudstone dominated facies showing planar-parallel laminae and, occasionally, small ripples.

Regarding fossilization, the specimens have been preserved through the petrification (adding minerals within the cell structure *sensu* Schopf (1975) by silica (silicification), a frequent process in plants from this geological unit (Faria Jr., 1979; Alencar et al., 2015). However, given the small amount of residual amorphous carbon found in the composition of the stem chemically analyzed from the study area (pers. comm. João H. Silva), it can be said that the process of fossilization essentially has reached herein the stage of petrification, in which all the organic material is replaced by mineral matter, since only a minimum of organic matter remained. Occasionally, fossil stems are found compressed, recrystallized, and fragmented (Fig. 4A, B and Fig. 8) but having its parts still associated (aligned) (Fig. 6G and Fig. 8). This fragmentation results from recent weathering affecting the exposed fossils, a

condition that may hamper or even preclude recognition of the macroscopic anatomical features in the specimens *in loco*.

5.3 Preliminary Identification of plant fossils

5.3.1 Psaroniaceae

The Psaroniaceae tree-fern stems are characterized by a polycyclic dictyostele endarch xylems, peripheral sclerenchyma sheaths, leaf traces in spiral different arrangements (varying from two vertical rows up to spiral type) and a thick mantle of roots surrounding the stem. Considering the specimen here analysed, one can certainly say that it is a representative of the Family Psaroniaceae, since it displays all these features (Fig. 9A, B). Amongst the known genera of Psaroniaceae undoubtedly *Psaronius* is the most widely geographically and stratigraphically distributed genus during the late Paleozoic (Rößler, 2000). There are only two genera of Psaroniaceae described from Permian deposits in the Parnaíba Basin: *Psaronius* Cotta 1832 and *Titea* Solms-Laubach 1913. One of the basic differences distinguishing both is the fact that the vascular bundles and leaf traces in *Psaronius* show themselves as radially and loosely arranged strips, and are C-or broadly U-shaped in the central stele (Rößler, 2000). In *Titea*, especially the vascular bundles show up a more compact arrangement, and are smaller and kidney- or bean-shaped in the central stele (Herbst, 1999; Tavares et al., 2011). Based on that, it seems adequate to identify our specimen as *Psaronius*.

5.3.2 Gymnospermaceae

Based on the distribution pattern of tracheids of the secondary xylem, features of xylem rays and pitting on the radial walls of tracheids, the gymnospermous wood preliminarily analyzed herein (Fig. 3C–F) is similar to some species already described in assemblages from MNAFTO, southwestern part of the Parnaíba Basin, such as:

Ductoabietoxylon solis Kurzawe, Merlotti, Rößler et Iannuzzi 2013, *Scleroabietoxylon chordas* Kurzawe, Merlotti, Rößler et Iannuzzi 2103, *Damudoxylon buritiranaense* Kurzawe, Merlotti, Rohn et Iannuzzi 2013 and *Kaokoxylon punctatum* Kurzawe, Merlotti et Iannuzzi 2013 (in Kurzawe et al., 2013a, 2013b). It is likely that the fossil gymnosperm stems present in the eastern margin of the basin belong essentially to the same genera, and very possibly the same species. However, only a more detailed anatomical analysis of all available material with recognition of key characters of the involved tissues (including the xylem, the parenchyma, the pith, secretory ducts, etc.) will allow reaching conclusions about the

identification of wood assemblages from this side of the basin. As this identification remains highly speculative, we can only say that is an "unidentified gymnospermous wood".

6. Discussion

6.1 Parnaíba Basin assemblages

As previously mentioned, studies related to fossil floras from this basin are still rare, especially in the Pedra de Fogo Formation, and even rarer on gymnosperm stems. Three important fossil forests from the Permian of this basin (Fig. 1B) have been described in the literature, being named: *Monumento Natural das Árvores Fossilizadas do Tocantins* (MNAFTO), located in Filadélfia, Tocantins State, southwestern margin of the basin (Coimbra and Mussa, 1984; Mussa and Coimbra, 1987; Rößler and Galtier, 2002a, b; Rößler, 2006; Dias-Brito et al., 2009; Kurzawe et al., 2013a,b; Capretz and Rohn, 2013 Tavares et al., 2014; Neregato et al., 2015); *Floresta Fóssil do Rio Poti* (FFRP), located in Teresina, Piauí State, (Caldas et al., 1989); and *Sítio Paleobotânico São Benedito* (SPSB), located in Altos, Piauí State (Conceição et al., in press); FFRP and SPSB being located in the northeastern portion of the basin.

Anatomically well preserved, silicified specimens are recorded in the exposures within MNAFTO, these fossils form allochthonous/parautochthonous assemblages that comprise a considerable diversity of taxa including several groups (i.e., ferns, sphenophytes and gymnosperms), but dominated by tree-ferns. Plant fossils are found within sandstone facies originated from fluvial channels or in sandstone-mudstone intercalations produced in flood plains, referred to the Motuca Formation (Capretz and Rohn, 2013; Tavares et al., 2014, but see below). By contrast with MNAFTO, the plant-fossiliferous strata exposed at the northeastern margin of the basin are dominated by assemblages of autochthonous gymnosperm stems (FFRP, Caldas et al., 1989) to ?autochthonous/parautochthonous gymnosperm stems (SPSB, Conceição et al., in press), both referred to the Pedra de Fogo Formation.

As discussed in Conceição et al. (*in press*), the fossil plant assemblages exposed in the southwestern Parnaíba Basin show clear differences when compared to the records in the northeast, especially regarding the taxonomical composition and the taphonomical aspects: (1) plant diversity (in part resulting from sampling and research bias compared to recent efforts in the southwest); (2) the predominance of different taxonomical groups (tree-ferns versus gymnosperms); (3) the taphonomical context, as in MNAFTO there are up to now no records of autochthonous trees (in life-position); and, (4) a probable different stratigraphic placement

(see ahead), as the plant fossils of MNAFTO have been referred to the Motuca Formation, whereas the stems in FFRP and SPSB are regarded to be in the Pedra de Fogo Formation.

The fossil assemblages from the new sites addressed in this study are comparable in many aspects (e.g., taxonomical composition, and taphonomical and geological context) to the other two fossil forests hitherto known in the northeastern portion of the basin (i.e., FFRP and SPSB). All of them evince less compression, morphology of the fossil woods, is still cylindrical.

On the other hand, some specimens preserved horizontally and partially exposed on the rock surface keep their alignment despite of their fragmentary condition (Fig. 8), which can be an indication of recent exposition to weathering, *sensu* Capretz (2012). They show fractures with 5–10 cm spacing, and parts of these specimens were transported over small distances. A similar condition occurs in the plant fossils at MNAFTO, according to Capretz and Rohn (2013), this resulted from modern weathering such as heavy rain which would produce dislocations of the fossils or even complete removal of smaller fragments producing the observed spaces between them.

6.2 Palaeoenvironmental and biostratinomic interpretation

The sedimentation at the lower succession corresponds to the Piauí Formation and is regarded to continental deposition, with predominance of aeolian processes that made possible migration of asymmetrical, small to mid-size, 2D and 3D bedforms. These were produced in association to subenvironments of increasing humidity in interdune areas represented by thin sandstone sets with low-angled planar-parallel stratification, adhesion warts and, especially, up to 40 cm, massive to laminar mudstone beds that are usually found in the upper portion of the Piauí Formation (Lima Filho and Rocha Campos, 1992).

On the other hand, the upper succession corresponds to the basal portion (Sílex Basal Member) of the Pedra de Fogo Formation, interpreted as continental, being deposited in nearshore regions of large continental lakes that eventually were affected by high energy, non-channelized, flows generated by associated fluvial systems. They formed suspension lobes after reaching the flat bottom of the receptor basins (lakes), developing extensive splay and producing tabular bed successions with sheet-like geometry, being posteriorly covered by suspension-deposited mudstones, following an aggradational arrangement after reduction of the event energy (Andrade et al., 2014). The presence of silicified gymnosperm stems in horizontal position within the sandstone beds represents compelling evidence of high energy events in the associated fluvial systems. Planar-parallel laminae, microhummocky and pich-

and-swell stratification, formed by oscillation fluxes, are an indication of the large extension of the lakes that possessed wide areas (fetch) capable of developing oscillatory ripples (Dumas and Arnott, 2006). Autochthonous fossil assemblages were probably located on the lake-shores areas that, fortunately, allowed rapid burial of these plants by eventual episodic sedimentation originated from permanent and/or ephemeral fluvial energy dynamics.

6.3 Stratigraphic context

The silicified trunk assemblages of this basin have been historically referred to the Pedra de Fogo Formation (Plummer, 1948; Mesner and Wooldridge, 1964; Mabesoone, 1977; Caldas et al., 1989), and more specifically to the superior Trisidela Member (upper portion of this unit *sensu* Faria Jr., 1979), hence being considered part of the diagnostic features of the top of this formation. However, based on stratigraphic work in the southwestern part of the basin, i.e., in the MNAFTO area, other researchers (Pinto and Sad, 1986; Dias-Brito et al., 2009) did not confirm an assignment of the fossil plant assemblages to the Pedra de Fogo Formation, and proposed that these would originate from the overlying Motuca Formation.

A recent sedimentological study in the same area of the basin (Andrade et al., 2014), on the other hand, has mostly endorsed the traditional proposals, referring the fossilized plants to the Trisidela Member of the Pedra de Fogo Formation. These authors highlight a considerable increase in the quantity and diversity of silicified trunk shapes and sizes to the top of Pedra de Fogo Formation, and possibly to the base of the Motuca Formation. These authors associated cores with higher density of plant fossils distributed randomly on the current surface of that area as a result of vertical displacements caused by erosive events at the base of the Motuca Formation (Faria Jr. and Truckenbrodt, 1980). This interpretation is basically similar to that of Barbosa and Gomes (1957). However, a sedimentological and stratigraphic study by Abrantes and Nogueira (2013) on the Motuca Formation in the same area does not mention the presence of silicified stems. The divergence of ideas about the real stratigraphic position of the assembly of silicified stems within the Pennsylvanian-Triassic sequence of the Parnaíba Basin (Vaz et al., 2007) is probably related to the problematic contact relationship between the Pedra de Fogo and Motuca formations in the MNAFTO area, where these contacts are either absent or concordant (Abrantes and Nogueira 2013; Andrade et al., 2014).

As previously referred, in the exposures here studied the fossil plants in life-position are clearly placed within the base of the Pedra de Fogo Formation, i.e., Sílex Basal Member, just above the Piauí Formation. These are included in facies that evince the typical features of

the Pedra de Fogo Formation, e.g., silicified sandstone, expressive chert breccia (Fig. 7C), chert nodule layers and, in minor degree, stromatolites and bacterial mats (Plummer, 1948). We can infer, therefore, that regardless of the stratigraphic placement of the fossil stems at the southwestern portion of the basin (either upper Pedra de Fogo Formation or base of the Motuca Formation) the fossil plants here studied are within another fossiliferous horizon, at the base of the Pedra de Fogo Formation, hence, being placed in lower position relative to those at the southwest.

Based on the stratigraphic placement inferred in this study, the predominance of large gymnosperm woods in the fossil forests located at the northeastern portion of the basin (Caldas et al., 1989; Conceição et al., in press; this work) in contrast with the pteridophyte-dominated (sphenophytes and ferns) fossil forest in the southwest (Herbst, 1985, 1992, 1999; Rößler and Galtier, 2002a,b, 2003; Tavares et al., 2014; Neregato et al., 2015), could be regarded, tentatively, as being related to different climatic episodes and not necessarily to palaeogeographical and/or palaeoenvironmental/palaeoecological factors. The record of these climatic changes is well represented in the sedimentary succession of the Pedra de Fogo Formation (*sensu* Andrade et al., 2014). Future work should analyse in detail the hypotheses that may explain the floral differences across the basin.

6.4 Conservation activities and their effectiveness

The Brazilian fossil heritage, being part of the cultural heritage (e.g., Brazil, 1988), is protected by legal devices (Brazil, 1985, 1991, 1998). However, there is only one specific enactment that deals with “protection” of fossiliferous sites, the 4.146/42 Enactment, which establishes its responsibility to DNPM (*Departamento Nacional de Produção Mineral*/National Mineral Production Department) however, in practice, it only rules the access to palaeontological sites.

We understand that both IPHAN (*Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional*/National Historic and Artistic Heritage Institute), being responsible for applying administrative and legal devices in order to protect the Brazilian cultural heritage (Brazil, 1937), and DNPM (institution that controls research and production of mineral goods), are constitutionally responsible for the protection of the Brazilian fossil heritage.

Regarding the fossil plant sites in Duque Bacelar, being already within a natural reserve APA(*Área de Proteção Ambiental*/Environmental Protection area) known as *Area de Proteção Ambiental dos Morros Garapenses*, they are, in theory, protected both by cultural heritage laws and by the guidelines proposed by SNUC (*Sistema Nacional de Unidades de*

Conservação/“Protected Areas National System”). The Federal Law 9.985 from July/2000 (Brazil, 2000), which creates SNUC, defines, in Article 15, that an APA is a generally large area, with certain degree of human occupation, biotic, non-biotic or aesthetic features, and/or cultural features especially important for the quality of life and the welfare of human populations, having as basic goals to preserve the biological diversity, to organize the inhabiting process and to certify the sustainability of the use of natural resources.

Complementing the guidelines proposed by SNUC, the constitution of the state of Maranhão, in article 228, section II, places fossils as objects under protection of the state (Maranhão, 1989). Furthermore, Decree 25.087 from December 31st of 2008, which creates the natural reserve *Área de Proteção Ambiental dos Morros Garapenses* includes, as one of its goals, the protection of fossilized plant sites in the municipality of Duque Bacelar, Maranhão.

Nevertheless, even with the existence of these legal devices for protection of the fossils in the area, and despite of being located within a natural protection area, some sites that hold life-position fossil trees have been seriously damaged by several anthropogenic activities, e.g., farming, burning (for farming), road constructions inside the sites, and plain vandalism (Fig. 10). No practical actions for enforcing the effective protection of the local fossil heritage have been undertaken by the public organs in charge.

The two other Permian fossil forests of the Parnaíba Basin currently published in the scientific literature have been included in specific legal protection models: FFRP, in Teresina (Caldas *et al.*, 1989), declared as a municipal park and a federal cultural-historical monument by IPHAN; and MNAFTO, in Filadélfia, Tocantins (Dias-Brito *et al.*, 2009), included within the category of natural monuments in SNUC. It has to be noted, however, that although these legal actions have mitigated the impacts on these sites, specially at MNAFTO, the FFRP currently constitutes a situation of major concern, due to its location in an urban area and lacking an efficient policing structure and, consequently, being target of constant anthropogenic damage.

It is possible to note that the problem of protection of these sites and fossil heritage as a whole it is not due to the absence of laws or conservation models, but to the absence of practical activities from the public organs that are responsible for these sites, at municipal, state or federal level for enforcing the current laws. The lack of actions is often a result of the absence of knowledge about the scientific value of the fossil sites which leads the government to treat the fossil heritage as a secondary priority. On the other hand, it is important to mention that the lack of knowledge by the responsible authorities is also related to the few

studies developed in the area. The continuity of these studies will be important to draw attention of local authorities regarding these fossils.

Public awareness about the importance of all kinds of heritage is directly linked to the state of knowledge regarding its various applications (e.g., for research, education tool, tourism, etc.). In this way, it is essential to develop tools together with IPHAN and DNPM in order to propose outreach actions about these fossil sites. Therefore, it is recommended that outreach programs, such as workshops, booklets distribution, curses, among others, that engage the local communities and the local players directly linked to the protection areas (in this case, Secretaria de Estado de Meio Ambiente de Recursos Naturais do Maranhão, and municipal organs at Duque Bacelar and Coelho Neto), in order to clarify and raise awareness in the community about the importance and scientific relevance of the fossil sites. This seems to be the best way to promote conservation of the sites presented in this study.

7. Conclusions

A new fossiliferous area in Duque Bacelar-Coelho Neto, northwesernt of the Parnaíba Basin, is presented. It holds more than 70 fossil stems, mostly relatively well-preserved, large gymnosperm woods, which show taxonomical affinities with species identified in the southwestern portion of the basin. Psaroniaceous tree-fern stems, preliminary identified as *Psaronius* sp., occur in a smaller number. These fossilized plants form autochthonous (life-position stems), parautochthonous and allochthonous assemblages. Autochthonous assemblages crop out in continental faces, accumulated in marginal regions of large lakes, occasionally affected by non-channelized, high energy fluvial systems.

All study assemblages are stratigraphically placed at the base of the Pedra de Fogo Formation, in contrast with previous works carried out in the southwest of the basin that referred the rich petrified plant assemblages to the upper part of this formation (Trisidela Member) or to the overlying Motuca Formation. Hence, comparing the results obtained herein with those available on Permian strata in the basin (northeast versus southwest), it is inferred the likely presence of more than one fossiliferous interval/horizon with plants, i.e., in the Sílex Basal Member, in the Trisidela Member or even at the base of the Motuca Formation. This may account, in part, for the taxonomical discrepancies noted among the fossil areas of both margins of the basin, which, in turn, could be related to different climatic conditions, as referred for these intervals in different areas of the basin. However, environmental or habitat differences within the basin are also a possible explanation for the observed differences, and sampling/research bias cannot be discarded. Broader stratigraphic studies are necessary to

further elucidate this question, especially research that focus the correlation between rocks from southwestern and northeastern portions of the basin. More detailed stratigraphic and taxonomic work on the plant assemblages at the northeast is also needed.

In this way, we emphasize the scientific importance of the new fossil sites here presented for studies on plant associations in the Permian of South America. From a geoconservation viewpoint, however, the severe damage due to anthropogenic activities currently taking place on these sites calls for urgent actions that must include outreach activities that engage local communities and enforcement of the law by public organs.

Conflict of interest section

No conflict of interest declared.

Acknowledgements

DMC acknowledges CAPES, for financial support through a M.Sc. bursary. RI and JCC thank CNPq for grants (483704/2010-5, PQ309211/2013-1, 401848/2010-8, 456608/2014-1). We thank Rosemarie Rohn (UNESP, Rio Claro) for help on stromatolites, and CPRM (Serviço Geológico do Brasil) in Teresina for preparation of samples. We acknowledge Ronny Rößler (Natural History Museum of Chemnitz), Rodrigo Neregato (UNESP, Rio Claro) and an anonymous reviewer for suggestions that improved this study.

References

- Abrantes Júnior, F. R., Nogueira, A. C. R. (2013). Reconstituição paleoambiental das formações Motuca e Sambaíba, Permo-Triássico da Bacia do Parnaíba no sudoeste do Estado do Maranhão, Brasil. *Geologia USP. Série Científica*, 13(3), 65-82.
- Alencar, W.J., Santos, F.E.P., Cisneros, J.C., Da Silva, J.H., Freire, P.T.C., Viana, B.C., 2015. Spectroscopic analysis and X-ray diffraction of trunk fossils from the Parnaíba Basin, Northeast Brazil. *Spectrochimica Acta. Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 135, 1052-1058.
- Andrade, L.S, Nogueira, A.C.R, Silva Junior, J.B.C., 2014. Evolução de um Sistema Lacustre Árido Permiano, parte Superior da Formação Pedra de Fogo, Borda Oeste da Bacia do Parnaíba. *Geologia USP, Série científica*, 14, 39-60.

Barbosa, O., & Gomes, F.A., 1957. Ministério da Agricultura - Departamento de Produção Mineral - Divisão de Geologia e Mineralogia. Boletim n. 174: Carvão mineral na Bacia Tocantins - Araguaia. Rio de Janeiro: Serviço Gráfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (38p).

Benício, J.R.W., Spiekermann, R., Manfroi, J., Uhl, D., Pires, E.F., Jasper, A. 2015. Palaeoclimatic inferences based on dendrological patterns of permineralized wood from the Permian of the Northern Tocantins Petrified Forest, Parnaíba Basin, Brazil. *Palaeobiology and Palaeoenvironment*, DOI 10.1007/s12549-015-0218-8.

Brazil. 1937. Decreto-Lei nº 25, de 30 de novembro de 1937. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, p. 24056.

Brazil. 1942. Decreto-lei nº 4.146, de 04 de março de 1942. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, p. 3533.

Brazil. 1985. Lei nº 7.347, de 24 de julho de 1985. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, p. 10649.

Brazil. 1991. Lei n. 8.176/1991. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, p. 2805.

Brazil. 1998. Lei n. 9.605/1998. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, p.1.

Brazil. 1988. Constituição, 1988. Constituição: República Federativa do Brasil. Senado Federal, Centro Gráfico, 292p.

Brongniart, A. 1872. Notice sur le *Psaronius brasiliensis*. Bulletin de la Société Botanique de France, 19, 3-10.

Caldas, E.B., Mussa, D., Lima Filho, F.P.G., Rösler, O., 1989. Nota sobre a ocorrência de uma floresta petrificada de idade permiana em Teresina, Piauí. Boletim IG-USP: Publicação Especial, 7, 69-87.

Campanha, V.A., Rocha-Campos, A.C., 1979. Alguns microfósseis da Formação Piauí (Neocarbonífero) da bacia do Parnaíba. Boletim do Instituto de Geociências, 10, 57-67.

- Capretz, R.L., 2012. Paleoecologia e Tafonomia da Floresta Petrificada do Tocantins Setentrional (Bacia do Parnaíba, Permiano). Ph.D. thesis, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP.
- Capretz, R.L., Rohn, R., 2013. Lower Permian stems as fluvial paleocurrent indicators of the Parnaíba Basin, northern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 45, 69-82.
- Chahud, A., Fairchild, T.R., Petri, S., 2010. Chondrichthyans from the base of the Irati Formation (Early Permian, Paraná Basin), São Paulo, Brazil. *Gondwana Research*, 18, 528-537.
- Cisneros, J.C., Marsicano, C., Angielczyk, K.D., Smith, R.M.H., Richter, M., Fröbisch, J., Kammerer, C.F., Sadleir, R.W. 2015. New Permian fauna from tropical Gondwana. *Nature Communications*, 6, 8676.
- Coimbra, A., Mussa, D., 1984. Associação lignitaoflorística na Formação Pedra de Fogo (Arenito Cacunda), Bacia do Maranhão-Piauí, Brasil. *Anais do Congresso Brasileiro de Geologia*, 33 (1984), pp. 591-605.
- Conceição, D.M., Cisneros, J.C., Iannuzzi, R., in press. Novo registro de uma floresta petrificada em Altos, Piauí: relevância e estratégias para a geoconservação. *Pesquisas em Geociências*.
- Cotta, B., 1832. Die Dendrolithen in Bezug auf ihren inneren Bau. Leipzig und Dresden, Arnoldische Buchhandlung, 89 pp.
- Cox, C.B., Hutchinson, P., 1991. Fishes and amphibians from the Late Permian Pedra de Fogo Formation of northern Brazil. *Palaeontology*, 34, 561-573.
- Dias-Brito, D., Rohn, R., Castro, J.C., Dias, R.R., Rössler, R., 2009. Floresta petrificada do Tocantins Setentrional — O mais exuberante e importante registro florístico tropical–subtropical permiano no Hemisfério Sul. In: Winge, M., Schobbenhaus, C., Souza,

- C.R.G., Fernandes, A.C.S., Berbert-Born, M., Queiroz, E.T., Campos, D.A., (Eds.).
Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. Brasília, CPRM/SIGEP, 2, 337-354.
- Dino, R., Antonioli, L., Braz, S.M.N., 2002. Palynological data from the Trisidela Member of Upper Pedra de Fogo Formation (“Upper Permian”) of the Parnaíba Basin, Northeastern Brazil. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 3, 24-35.
- Dolianiti, E. 1954. A flora do Carbonífero inferior de Teresina, Piauí. *Boletim do Departamento Nacional de Produção Mineral*, 148, 1-56.
- Dumas, S., Arnott, R.W.C., 2006. Origin of hummocky and swaley cross-stratification – The controlling influence of unidirectional current strength and aggradation rate. *Geology*, 34, 1073-1076.
- Faria Júnior, L.E.C. 1979. Estudo sedimentológico da Formação Pedra de Fogo - Permiano Bacia do Maranhão. Ph.D. thesis, Universidade Federal do Pará.
- Faria Júnior, L.E.C., Truckenbrodt, W., 1980. Estratigrafia e petrografia da Formação Pedra de Fogo – Permiano da Bacia do Maranhão. *Anais do Congresso Brasileiro de Geologia*, 31 (1980), pp. 740-754.
- Fernandes, A.C.S., Borghi, L., Carvalho, I.S., Abreu, C.J., 2002. Guia dos Icnofósseis de Invertebrados do Brasil. Editora Interciência: Rio de Janeiro.
- Ginter, M., Ivanov, A., Lebedev, O., 2005. The revision of “*Cladodus*” *occidentalis*, a late Palaeozoic ctenacanthiform shark. *Acta Palaeontologica Polonica*, 50, 623-631.
- Herbst, R., 1985. Nueva descripción de *Psaronius arrojadoi* (Pelourde) (Marattiales), del Pérmico de Brasil. *Ameghiniana*, 21, 243-258.
- Herbst, R., 1986. Studies on Psaroniaceae. I. The Family Psaroniaceae (Marattiales) and a redescription of *Titea singularis* Solms-Laubach, from the Permian of Brazil. *Actas Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía*, 4 (1986), pp. 163-171.

Herbst, R., 1992. Studies on Psaroniaceae. III. *Titea derbyi* n. sp., from the Permian of Brazil. Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 147, 155-161.

Herbst, R., 1999. Studies on Psaroniaceae. IV. Two species of *Psaronius* from Araguaina, state of Tocantins, Brazil. Facena, 15, 9-17.

Iannuzzi, R., Langer, M.C., 2014. The presence of Callipterids in the Permian of Northeastern Brazil: stratigraphic and phytogeographical implications. In: Rocha, R., Pais, J., Kullberg, J.C., Finney, S., (Eds.). STRATI 2013 - First International Congress on Stratigraphy: at the Cutting Edge of Stratigraphy. Springer Geology Series. 403-406.

Kerp, J.H.F., 1988. Aspects of Permian palaeobotany and palynology. X. The West and Central European species of the genus *Autunia* Krasser emend. Kerp (Peltaspermaceae) and the form-genus *Rhachiphyllum* Kerp (callipterid foliage). Review of Palaeobotany and Palynology, 54, 249-360.

Kurzawe, F., Iannuzzi, R., Merlotti, S., Rössler, R., Noll, R., 2013a. New gymnospermous woods from the Permian of the Parnaíba Basin, Northeastern Brazil, Part 1: *Ductoabietoxylon*, *Scleroabietoxylon* and *Parnaiboxylon*. Review of Palaeobotany and Palynology, 195, 37-49.

Kurzawe, F., Iannuzzi, R., Merlotti, S., Rohn, R., 2013b. New gymnospermous woods from the Permian of the Parnaíba Basin, Northeastern Brazil, Part 2: *Damodoxylon*, *Kaokoxylon* and *Taeniopitys*. Review of Palaeobotany and Palynology, 195, 50-64.

Lima Filho, F.P., Rocha Campos, A.C., 1992. Sedimentos desérticos da Formação Piauí (Pensilvaniano), Bacia do Parnaíba. Boletim IG-USP, Publicação especial, 12, 67-68.

Lisboa, M.A., 1914. The Permian Geology of Northern Brazil. American Journal of Science, 37, 425-443.

Mabesoone, J.M., 1977. Paleozoic-mesozoic deposits of the Piauí-Maranhão syneclyse (Brazil): geological history of a sedimentary basin. Sedimentary Geology, 19, 7-38.

- Maranhão. 1989. Constituição do Estado do Maranhão. Diário Oficial do Estado do Maranhão. Atos do Poder Executivo, São Luís.
- Maranhão. 2008. Decreto no 25.087 de 31 de dezembro de 2008. Diário Oficial do Estado do Maranhão, 17-18.
- Mesner, J.C., Wooldrige, L.C. 1964. Maranhão Paleozoic Basin and Cretaceous Coastal Basins, Northern Brazil. Bulletin of the American Association Petroleum Geologist, 48, 1475-1512.
- Mussa, D., Coimbra, A.M., 1987. Novas Perspectivas de Comparação entre as tafloras permianas (de lenhos) das Bacias do Parnaíba e do Paraná. Anais do Congresso Brasileiro de Paleontologia, 10 (1987), pp. 901-923.
- Neregato, R., Rößler, R., Rohn, R., Noll, R., 2015. New petrified calamitaleans from the Permian of the Parnaíba Basin, central-north Brazil. Part I. Review of Palaeobotany and Palynology, 215, 23-45.
- Oliveira, E., 1934. Ocorrência de plantas carboníferas da flora Cosmopolita no Estado do Piauhy. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 6, 113-118.
- Pelourde, F., 1912. Observations sur le *Psaronius brasiliensis*. Annales des Sciences Naturelles, Botanique, 9, 337-352.
- Petri, S., Fulfaro, V.J., 1983. Geologia do Brasil (Fanerozóico). T.A.Queiroz, EDUSP, São Paulo, 631 p.
- Pinto, C.P., Sad, J.H.G., 1986. Revisão da Estratigrafia da Formação Pedra de Fogo, borda sudoeste da Bacia do Parnaíba. Anais do Congresso Brasileiro de Geologia, 34 (1986), pp. 346-358.
- Plummer, F.B., Price, L.I., Gomes, F.A., 1948. Estados do Maranhão e Piauí. In: Brasil, Conselho Nacional do Petróleo, Relatório de 1946. Rio de Janeiro, pp. 87-134.

Price, L.I., 1948. Um anfíbio labirintodonte da Formação Pedra-de-Fogo, Estado do Maranhão. Boletim do Departamento Nacional de Produção Mineral, 124, 1-32.

Rößler, R., 2000. The late Palaeozoic tree fern *Psaronius* – an ecosystem unto itself. Review of Palaeobotany and Palynology, 108, 55-74.

Rößler, R., 2006. Two remarkable Permian petrified forest: correlation, comparison and significance. In: Lucas, S.G., Cassinis, G., Schneider, J.W., (Eds.). Non-marine permian biostratigraphy and biochronology. Geological Society, London, Special Publications, 265, 39-63.

Rößler, R., Galtier, J., 2002a. 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.

Rößler R., Galtier, J., 2002b. *Dernbachia brasiliensis* gen. nov. et sp. nov. -a new small tree fern from the Permian of NE Brazil. Review of Palaeobotany and Palynology, 122, 239-263.

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

Rößler, R., Zierold, T., Feng, Z., Kretzschmar, R., Merbitz, M. Annacker, V., Schneider, J. W. A. 2012. snapshot of an early Permian ecosystem preserved by explosive volcanism: New results from the Chemnitz Petrified Forest, Germany. *Palaios*, 27, 814–834.

Santos, M.E.C.M., Carvalho, M.S.S., 2004. Paleontologia das bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís: Reconstituições Paleobiológicas. 2^a ed. CPRM Serviços Geológicos do Brasil: Rio de Janeiro.

Santos, R.V., Souza, P.A., Alvarenga, C.J.S., Dantas, E.L., Pimentel, M.M., Oliveira, C.G., Araújo, L.M., 2006. SHRIMP U-Pb zircon dating and palynology of bentonitic layers

from the Permian Irati Formation, Paraná Basin, Brazil. *Gondwana Research*, 9, 456-463.

Schopf, J.M., 1975. Modes of fossil preservation. *Review of Paleobotany and Palynology*, 20, 27-53.

SNUC. Sistema Nacional de Unidades de Conservação. 2000. Texto da Lei 9.985 de 18 de Julho de 2000 e vetos da presidência da República ao P.L. aprovado pelo Congresso Nacional. Caderno 18, Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica: São Paulo, 76p.

Solm-laubach, H. 1913. *Tietea singularis*. Ein neuer Pteridinenstamm aus Brasilien. *Zeitschrift für Botanik*, Jena, 5, 673–700.

Tavares, T.M.V., Rohn, R., Merlotti, S., 2011. Caules permineralizados de *Tietea* e *Psaronius* na Bacia do Paraná (Formação Corumbataí, Permiano). *Pesquisas em Geociências*, 38, 114-131.

Tavares, T.M.V., Rohn, R., Rößler, R., Noll, R., 2014. Petrified Marattiales pinnae from the Lower Permian of North-Western Gondwana (Parnaíba Basin, Brazil). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 201, 12-28.

Vaz, P.T.; Rezende, N.G.A.M.; Wanderley Filho, J.R.; Travassos, W.A.S. 2007. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 15 (2), 253-263.

Table 1. Permian fossilized plant georeference of Duque Bacelar and Coelho Neto, Maranhão, Brazil.

Trunk/Stem	Latitude and Longitude	Length (cm)	Diameter (cm)	Altitude (m)	Taxonomy	Observations
Morro das Pedras Brancas						
T1	4°7'39.34"S 43°0'40.06"W	-	115	58	Gymnosperm	In life-position.
T2	4°7'39.96"S 43°0'40.19"W	68	58	58	Gymnosperm	In life-position?
T3	4°7'39.45"S 43°0'39.68"W	-	-	58	Gymnosperm	Fragment, bad preservation.
T4	4°7'34.63"S 43°0'34.03"W	-	-	57	Gymnosperm	<i>Ex situ</i> .
T5	4°7'39.51"S 43°0'39.01"W	92	60	57	Gymnosperm	Slightly tilted.
T6	4°7'37.84"S 43°0'37.66"W	37	73	57	Gymnosperm	<i>Ex situ</i> .
Olho d'Água						
T7	4°9'40.14"S 43°0'7.96"W	230	100	59	Gymnosperm	In life-position.
T8	4°9'39.88"S 43°0'8.67"W	155	60	59	Gymnosperm	In life-position.
Sítio Fazendinha						
T9	4°10'14.93"S 42°58'49.70"W	-	-	60	Gymnosperm	<i>Ex situ</i> , recrystallized.
T10	4° 9'50.06"S 42°58'44.64"W	-	-	61	Gymnosperm	Concentration formed by a number of fragments.
T11	4°9'49.59"S 42°58'44.08"W	60	56	-	Gymnosperm	Apex and base are clearly visible.
T13	4°9'51.70"S 42°58'48.26"W	50	30	63	Gymnosperm	<i>Ex situ</i> , near the hill's top.
T14	4°9'51.49"S 42°58'48.33"W	18	15	63	Gymnosperm	Concentration of five <i>ex situ</i> stems.
T15	4°9'54.67"S 42°58'49.84"W	18	20	67	Gymnosperm	UFPI-PAB (<i>ex situ</i>).
C16	4°9'55.30"S 42°58'50.52"W	-	-	70	Gymnosperm and Tree-fern	<i>Ex situ</i> stems.
T17	4°9'59.07"S 42°58'54.70"W	36	30	72	Gymnosperm	Small, well preserved stems.
T18	4°9'59.88"S 42°58'54.03"W	40	-	68	Gymnosperm	<i>Ex situ</i> .
T19	4°9'59.99"S 42°58'53.70"W	14	36	67	Gymnosperm	<i>Ex situ</i> .
T20	4°9'59.99"S 42°58'53.26"W	65	85	67	Gymnosperm	Well preserved anatomical features.
T21	4°10'39.51"S 42°58'38.76"W	150	-	57	Gymnosperm	Within the matrix rock.
T22	4°10'39.67"S 42°58'38.51"W	-	60	57	Gymnosperm	Within the matrix rock.
T23	4°10'39.00"S 42°58'38.73"W	70	50	60	Gymnosperm	Highly replaced by silica.
C24	4°10'42.29"S 42°58'35.79"W	10	12	47	Tree-fern	<i>Psaronius</i> sp., root mantle visible (UFPI-PAB081)

T25	4°10'0.13"S 42°58'52.98"W	70	21	66	Gymnosperm	<i>Ex situ.</i>
T26	4°10'1.26"S 42°58'52.54"W	130	60	72	Gymnosperm	<i>Ex situ.</i>
T27	4°10'1.28"S 42°58'52.41"W	80	40	71	Gymnosperm	Basal portion.
T28	4°10'2.18"S 42°58'51.50"W	58	30	71	Gymnosperm	Concentration of seven stems.
T29	4°10'2.86"S 42°58'51.34"W	100	40	71	Gymnosperm	Life-position.
T30	4°10'0.45"S 42°58'52.19"W	78	52	65	Gymnosperm	<i>Ex situ.</i>
T31	4°10'1.91"S 42°58'51.18"W	80	60	69	Gymnosperm	Concentration of four stems.
T32	4°10'1.91"S 42°58'51.18"W	75	60	69	Gymnosperm	Concentration of three compressed stems.
T33	4°10'1.91"S 42°58'51.18"W	60	40	69	Gymnosperm	Concentration of two compressed stems.
T34	4°10'1.91"S 42°58'51.18"W	40	40	69	Gymnosperm	One in life-position? And three horizontalized, compressed stems.
T35	4°10'1.91"S 42°58'51.18"W	80	60	69	Gymnosperm	Compressed.
T36	4°10'1.78"S 42°58'51.09"W	60	70	68	Gymnosperm	<i>Ex situ</i> , marrow partially recrystallized.
T37	4°10'2.00"S 42°58'50.87"W	70	30	68	Gymnosperm	<i>Ex situ.</i>
T38	4°10'2.00"S 42°58'50.87"W	40	80	68	Gymnosperm	<i>Ex situ.</i>
T39	4°10'2.09"S 42°58'50.93"W	87	60	69	Gymnosperm	<i>Ex situ.</i>
T40	4°10'2.09"S 42°58'50.93"W	60	70	69	Gymnosperm	<i>Ex situ.</i>
T41	4°10'2.35"S 42°58'50.59"W	80	-	69	Gymnosperm	Concentration of seven stems.
T42	4°10'2.88"S 42°58'50.36"W	80	-	71	Gymnosperm	Within the matrix rock.
43	4°10'3.37"S 42°58'50.99"W	-	-	75	Gymnosperm	<i>Ex situ.</i>
T51	4°10'0.15"S 42°58'54.15"W	-	-	-	Gymnosperm	Within the matrix rock.
T52	4°10'0.89"S 42°58'53.17"W	-	-	73	Gymnosperm	Life-position.
T53	4°10'0.16"S 42°58'53.84"W	60	10	71	Gymnosperm	<i>Ex situ.</i>
T54	4°10'1.39"S 42°58'52.69"W	10	5	87	Gymnosperm	UFPI-PAB085
C56	4°10'39.15"S 42°58'40.93"W	10	4	53	Tree-fern	UFPI-PAB086
C57	4°10'27.97"S 42°58'46.64"W	-	-	53	Tree-fern	<i>Ex situ.</i>

Ladeira do Olho D'água

C44	4° 9'17.24"S 42°58'28.13"W	230	-	62	Tree-fern	Within the matrix rock.
C45	4° 9'15.73"S 42°58'28.04"W	50	15	64	Tree-fern	Within the matrix rock.
C49	4° 9'27.80"S 42°58'32.42"W	-	-	68	Tree-fern	Within the matrix rock.

C50	4° 9'28.51"S 42°58'30.69"W	-	-	55	Tree-fern	<i>Ex situ</i> fragments.
Morro da Pandora						
T46	4°10'9.72"S 42°57'49.81"W	30	-	54	Gymnosperm and Tree-fern	Horizontalized?
T47	4°10'10.66"S 42°57'50.28"W	48	-	59	Gymnosperm	<i>Ex situ</i> .
T48	4°10'23.42"S 42°57'54.96"W	535	-	56	Gymnosperm	<i>Ex situ</i> .
T59	4°10'23.01"S 42°57'55.23"W	20	15	63	Gymnosperm	Life-position?
C60	4°10'23.01"S 42°57'55.53"W	15	5	63	Tree-fern	<i>Ex situ</i> (UFPI-PAB072)
T61	4°10'23.01"S 42°57'55.53"W	10	6	63	Gymnosperm	<i>Ex situ</i> (UFPI-PAB084)

Figure 1. Location map of the georeferenced outcrops bearing plant fossil associations from the Pedra de Fogo Formation. **A**, Location of the Parnaíba Basin in northeastern Brazil; **B**, Location of the Municipality of Duque Bacelar in northwestern of Parnaíba Basin; **C**, Municipality of Duque Bacelar, state of Maranhão, the rectangles represent the studied outcrops (D-H); **D**, Morro das Pedras Brancas outcrop; **E**, Olho d'Água outcrop; **F**, Ladeira do Olho d'Água outcrop; **G**, Morro da Pandora outcrop; **H**, Fazendinha outcrop. **Abbreviations**, MA, Maranhão state; PI, Piauí state; TO, Tocantins state; MNAFTO, Tocantins Fossil Forest National Monument; FFRP, Rio Poti Fossil Forest; SPSB, São Benedito Palaeobotanical Site.

Figure 2. Stratigraphic log of Pedra de Fogo and Piauí formations exposed at Fazendinha, Morro da Pandora and Ladeira do Olho d'Água outcrops, in Duque Bacelar and Coelho Neto municipalities of Maranhão.

Figure 3. General characteristics of upper part of Piauí Formation in Morro da Pandora outcrop. **A**, Geological contact (traced line) between Piauí Formation sandstone and Pedra de Fogo Formation siltstone; **B**, *Arenicolites* sp. (arrows) in medium-grained sandstone; **C, D**, Fine to medium-grained sandstone with trough cross-bedding, note the thinning-upward tendency of sets, with planar cross-bedding near the transition between Pedra de Fogo and Piauí formations.

Figure 4. General features of Pedra de Fogo Formation. **A-B**, medium to coarse-grained sandstone containing a horizontalized and compressed silicified fern stem, arrow indicates root mantle; **C**, 30 cm thick medium-grained massive sandstone; **D**, fine to medium-grained sandstone, with pinch-and-swell tendency showing parallel lamination interbedded with slightly wavy lamination; **E**, fine-grained sandstone with wave ripple cross lamination; **F**, *Arenicolites* sp. (arrows) in fine-grained sandstone at the base of the Pedra de Fogo succession. **A, B** and **E**, Ladeira do Olho d'Água outcrop; **C**, Morro da Pandora outcrop; **D** and **F**, Fazendinha outcrop.

Figure 5. **A**, semi-columnar stromatolite (UFPI PIC064) from Ladeira Olho d'Água outcrop. **B**, cf. *Planolites* (UFPI PIC063) from Fazendinha outcrop. Scale bars: 10 mm.

Figura 6. Gymnosperm and tree-fern stems. **A-D**, Gymnosperm stems in horizontal position (T27, T20, T26, T57, respectively), and **E**, in ?life-position (T34), showing growth ring-like

structures (arrow); **F**, Transverse-section view of *Psaronius* sp. stem (unnumbered specimen), longer arrow indicates the root mantle and shorter arrow shows the stele; **G**, Gymnosperm trunk concentration, slightly aligned stem fragments, probably once belonging to the same individual. **A–E**, **G**, Fazendinha outcrop. **F**, Ladeira do Olho d'Água outcrop.

Figure 7. Large gymnosperm stems in life-position. **A**, trunk T7, (nicknamed “Grande Diva” by locals, being the largest life-position trunk hitherto known in Brazil), and **B**, trunk T8, detail showing preserved growth ring-like structures (arrow); both from Olho d'Água outcrop. **C**, trunk T29 (arrows indicate chert breccia layer) and **D**, trunk T52, both from Fazendinha outcrop.

Figure 8. Horizontalized gymnosperm and tree-fern stems. **A**, Horizontalized gymnosperm trunk (T48). **B**, two gymnosperm stems (T21 and T22, respectively) indicated by the arrows (the dashed line shows a silicified sandstone below the stems. **C**, Fragmented gymnosperm trunk on recent soil (T51). **D–E**, gymnosperm trunk cropping out in transverse section (T42). **A**, Morro da Pandora outcrop; **B**, **C** and **E**, Fazendinha outcrop.

Figura 9. A–B, *Psaronius* sp., UFPI PAB081. **A**, General view of the transverse-section showing the central stele (cs) and root mantle (rm); **B**, Detail of **A** showing the central stele with C-shaped vascular bundles (arrows). **C–F**, Gymnospermae incertae sedis, CPHNAMA PL122. **C**– Transverse-section showing thick-walled tracheids of the secondary xylem; **D**, Transverse-section showing tracheids (t) of the secondary xylem and the xylem rays (r), note a growth ring-like structure (arrow) represented by a reduction in the size of cells similar to growth zones described by Benício et al. (2015); **E**, tangential section showing uniseriate to partly biserrate xylem rays (arrows); **F**, longitudinal radial section showing cross-fields with the radial tracheid walls. Scale bars: **A**, **B**, 2 cm; **C**, **D**, **E**, **F**, 100 µm.

Figure 10. Anthropogenic impact. **A**, **B**, Gymnosperm trunk in life-position, damaged during construction of a ground road, the arrows indicate agricultural crops (sugar-cane) at Morro das Pedras Brancas outcrop; **C**, severe damage caused by a failed attempt of cutting the base of a life-position gymnosperm trunk (T7) at Olho d'Água outcrop (it is the same trunk depicted in Fig. 7A, where the damage can be seen at the base of the photograph, behind the hammer). **D**, burned area containing gymnosperm stems (arrow) at Fazendinha outcrop, a result from out-of-control fires used in agricultural practice.

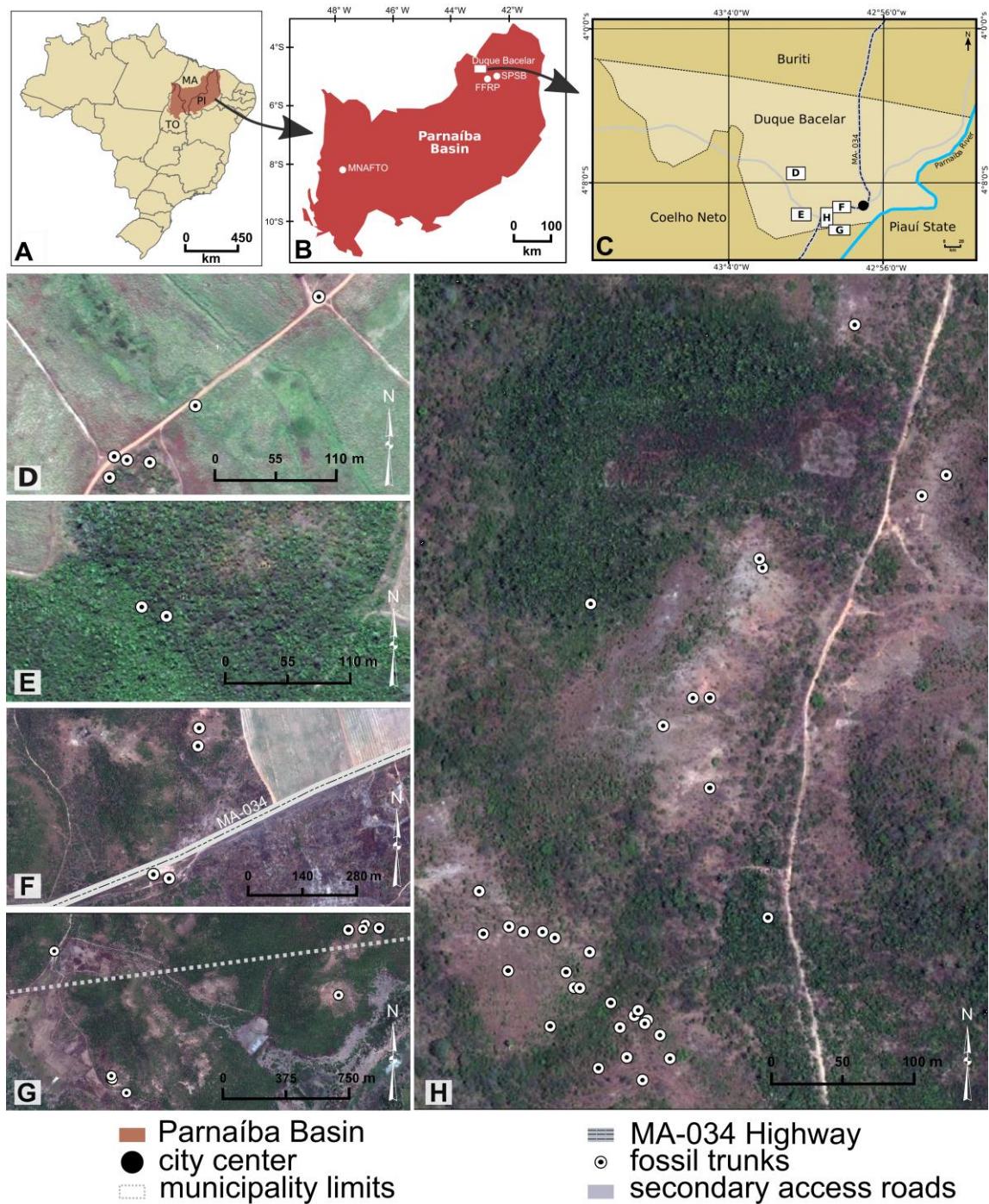


Figure 1.

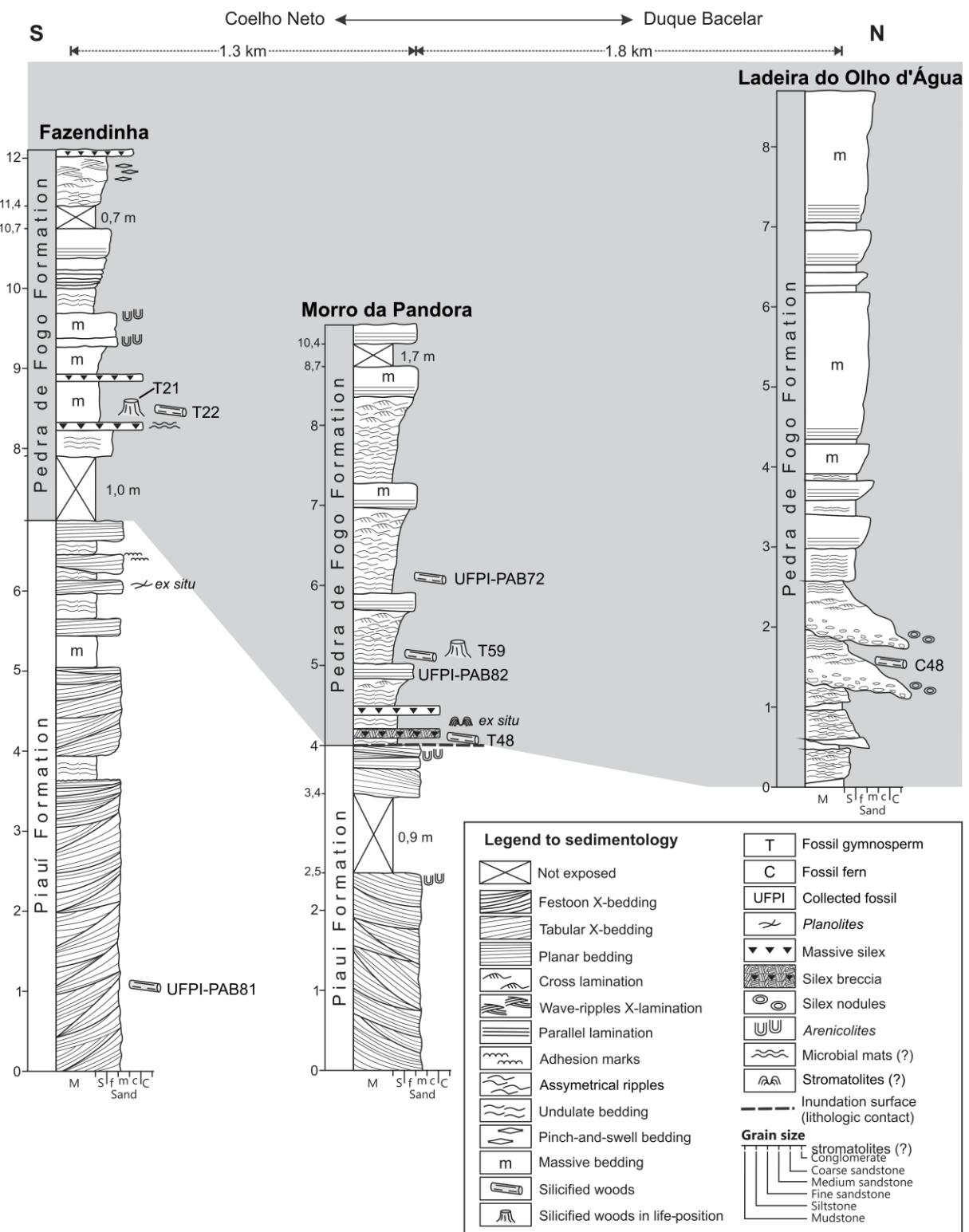


Figure 2.

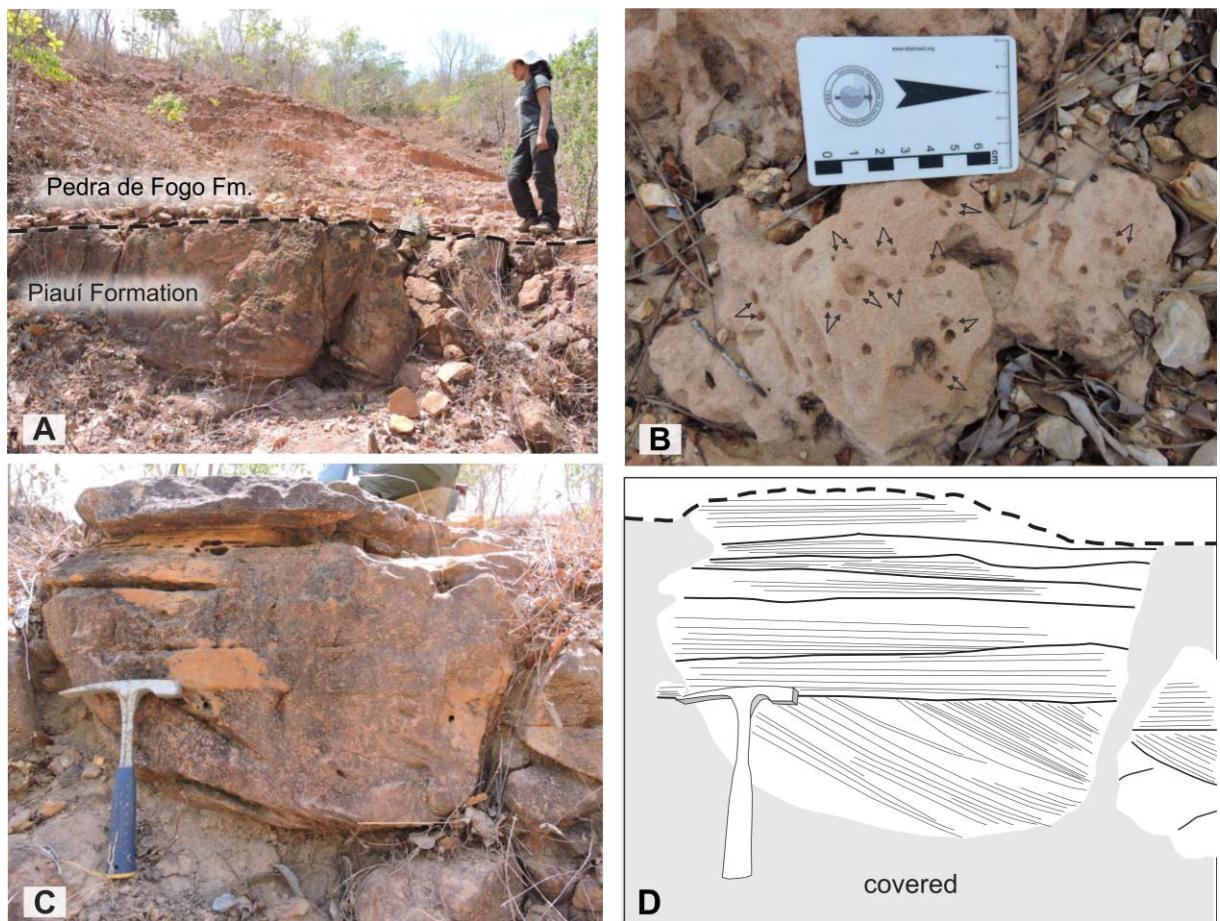


Figure 3.

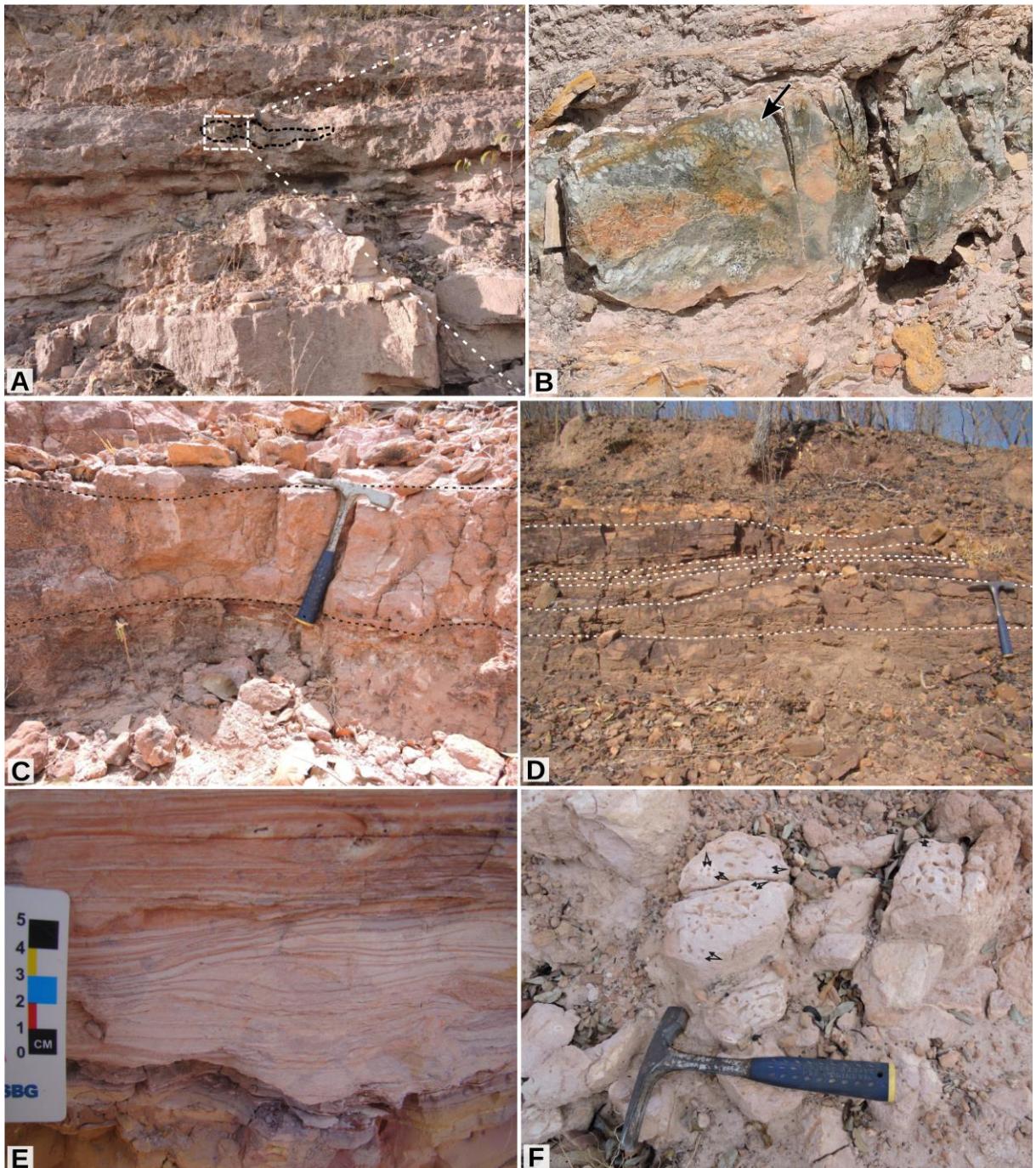


Figure 4.

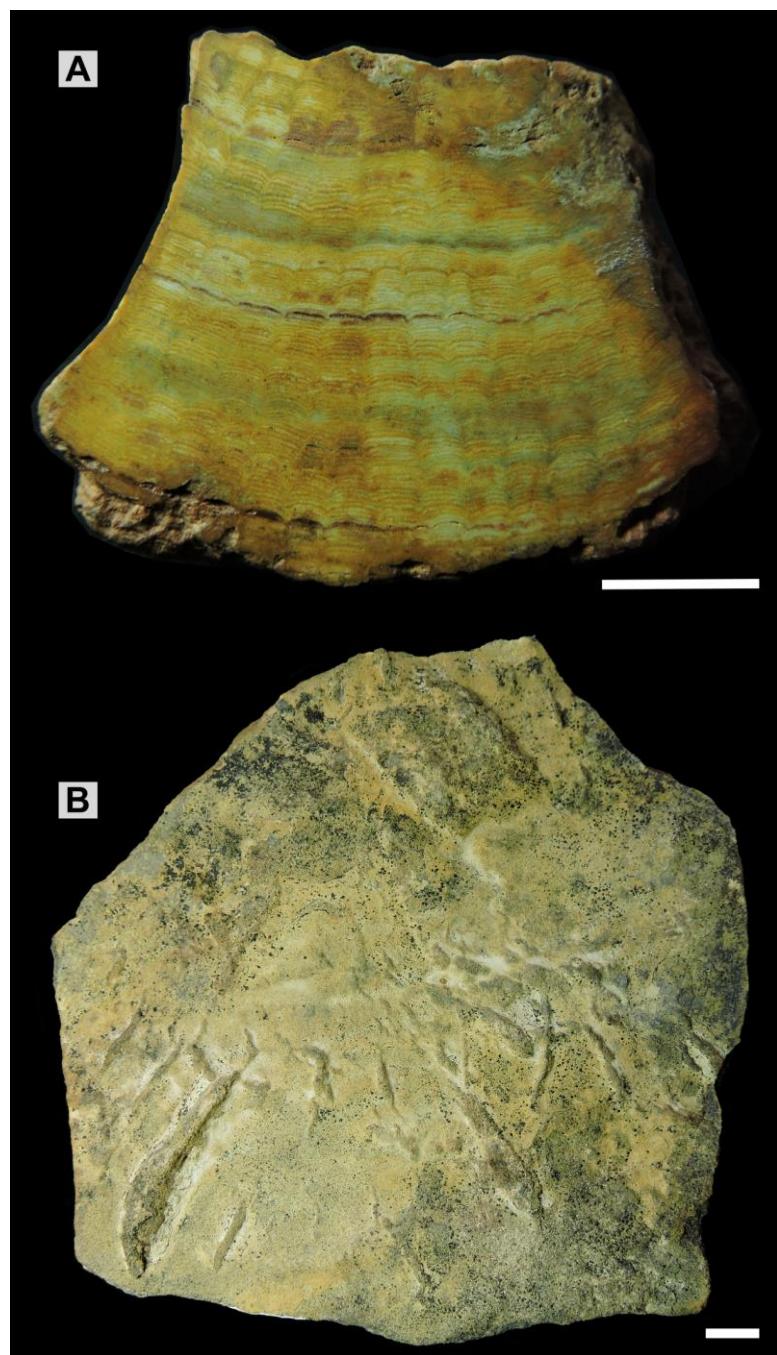


Figure 5.

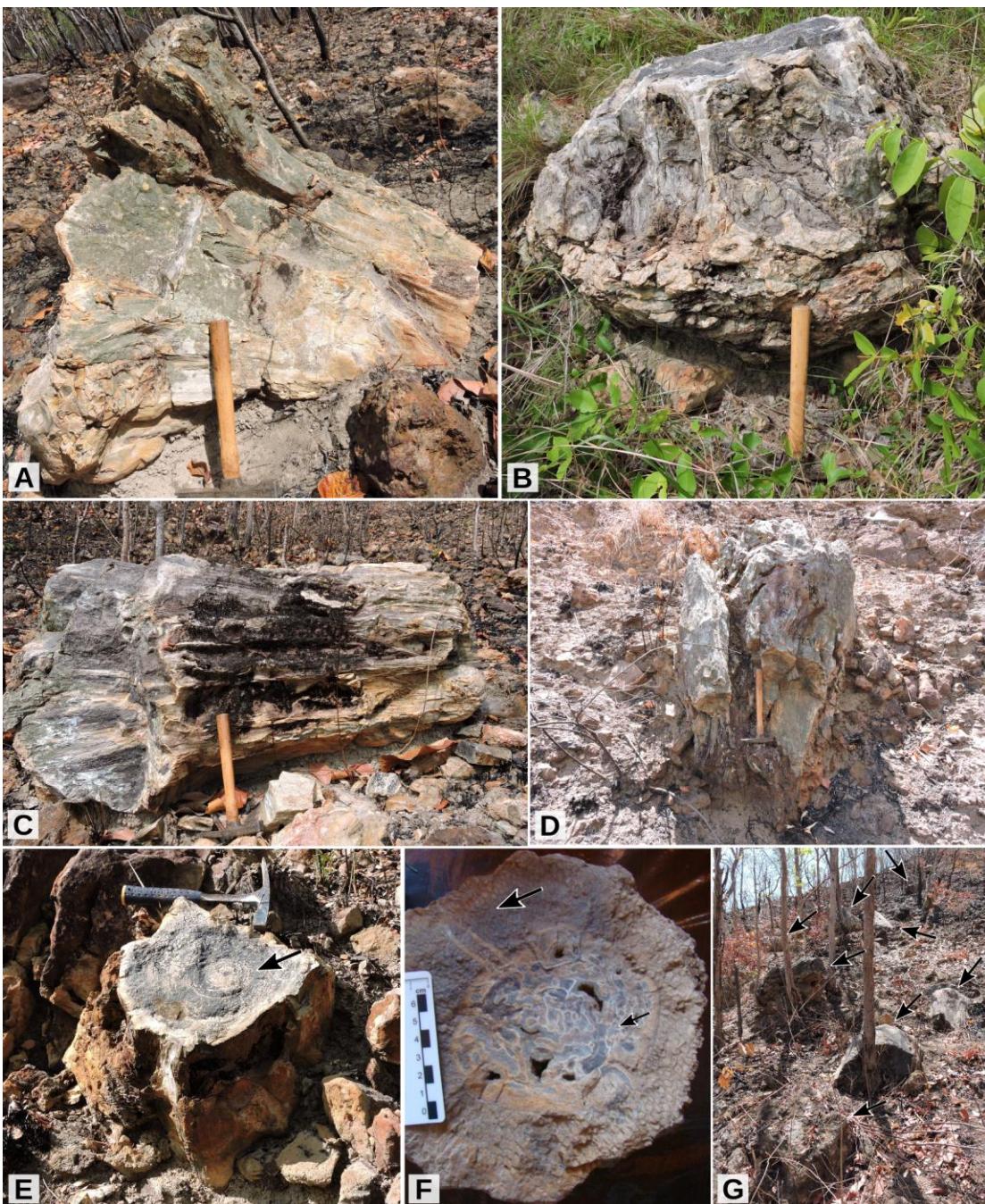


Figura 6.



Figure 7.

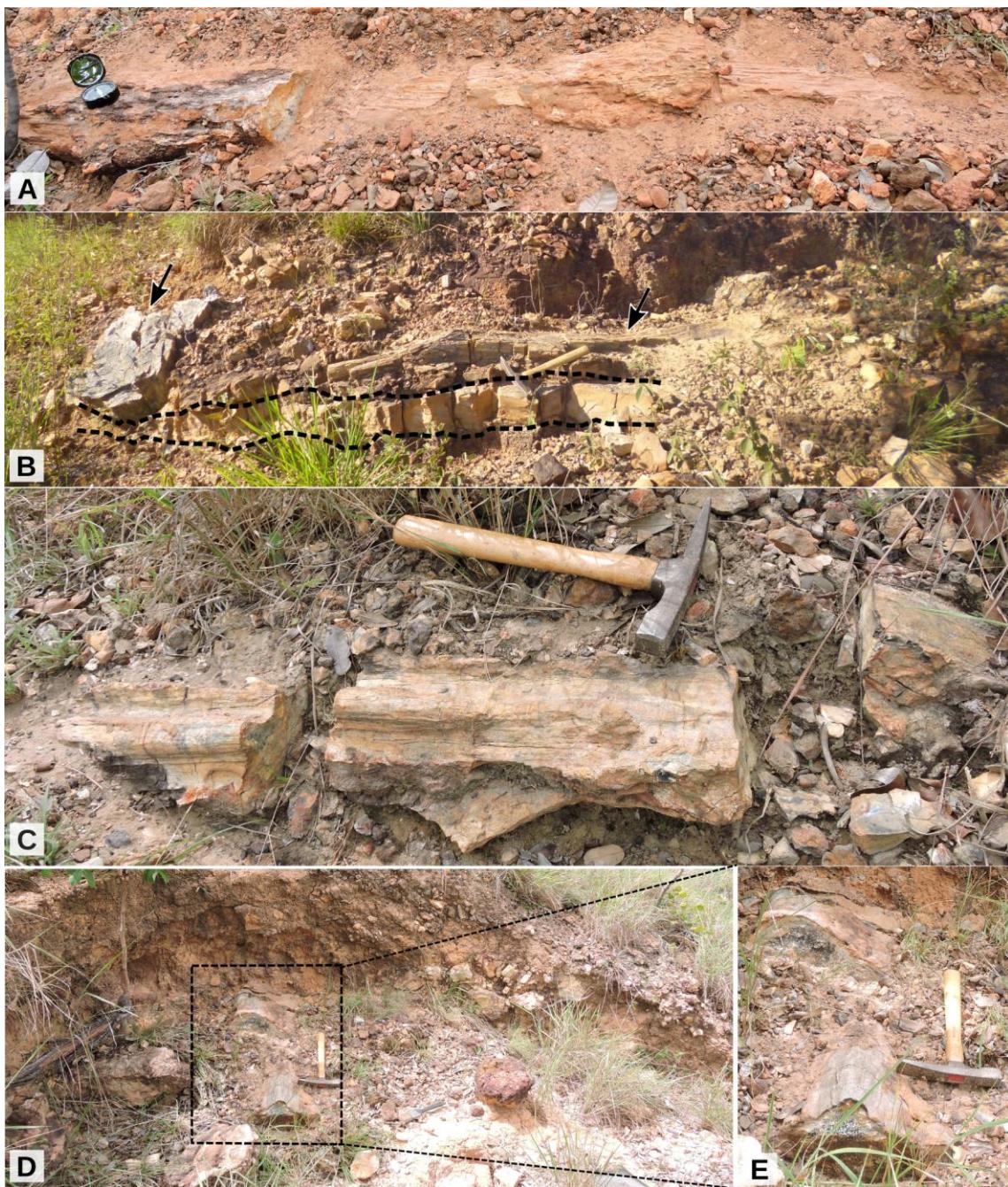


Figure 8.

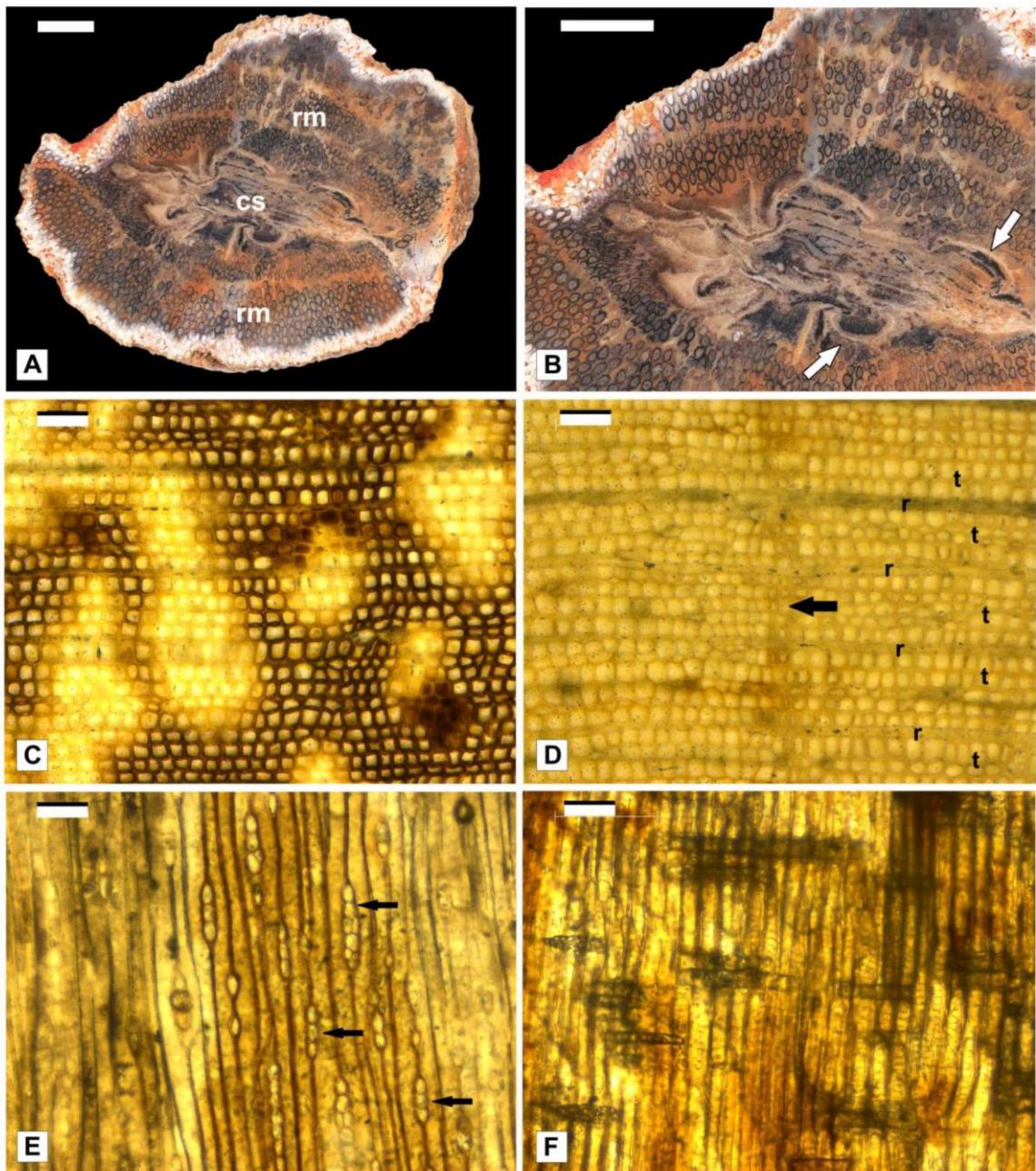


Figure 9.



Figure 10.

Spectroscopic studies on Permian plant fossils of the Pedra de Fogo Formation from the Parnaíba Basin, Brazil

D. M. da Conceição¹, J. H. da Silva², J. C. Cisneros³, R. Iannuzzi⁴, B. C. Viana⁵, G. D. Saraiva⁶, J. P. Sousa⁷, P.T.C. Freire^{8*}

¹*Programa Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 50670-901, Recife – PE, Brazil.*

²*Campus de Juazeiro do Norte – Universidade Federal do Cariri, 63000-000, Juazeiro do Norte – CE, Brazil.*

³*Centro de Ciências da Natureza – Universidade Federal do Piauí, 64049-550, Teresina – PI, Brazil.*

⁴*Departamento de Paleontologia e Estratigrafia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 91509-900, Porto Alegre – RS, Brazil.*

⁵*Departamento de Física, Universidade Federal do Piauí, 64049-550, Teresina – PI, Brazil.*

⁶*Faculdade de Educação Ciências e Letras do Sertão Central, Universidade Estadual do Ceará, CEP 63.900-000, Quixadá – CE, Brazil.*

⁷*Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará Campus do Pici - Bloco 912 - Fortaleza – CE, Brazil*

⁸**Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará, 60455-970, Fortaleza – CE, Brazil.*

Abstract

The Pedra de Fogo Formation dated from the Permian period (approximately 280 million years ago), belongs to the sedimentary Parnaíba Basin, northeastern of Brazil. It is recognized by their good fossil contents and it is notable for having several fossilized trunks in the growing position. Specimens from different localities were selected in order to perform spectroscopic studies and X-ray diffraction analysis, as well, to identify and to characterize compounds related to fossilized materials. These different techniques allowed obtaining information from molecular spectra of organic and inorganic substances which are present in these fossils, the atomic elements and crystalline phases. These mentioned studies have

revealed promising in paleoenvironmental interpretations about their depositional strata. Regarding the techniques, they have enabled inferences with respect to fossil diagenetic events and allowed a better understanding of the fossilized process and mineralogical characteristics of the living environment where the plants were buried. This study presents physical/chemical properties of the fossilized plants through vibrational spectroscopies, SEM/EDS spectroscopy and X-ray diffraction techniques. Based on the results obtained, we were able to identify the presence of silica and to confirm that the dominant process of the fossilized specimens investigated has occurred through quartz silicification, with contribution of persistence of amorphous carbon.

Keywords: Vibrational spectroscopies; Fossil plants; Permian Period

1. INTRODUCTION

The study of fossils allows understanding the complex interactions verified between living organisms and the physical environments in the past, and, furthermore, it can evince the emergence, development and decline of some species. As consequence, the fossil records reveal the ongoing evolution of life on Earth [1]. Fossils can help to infer the age of the rock strata serving for the reconstruction of the form and position of the continents during the past ages, as well as to elucidate ancient environments, climate changes and extinction events. Some processes of fossilization can preserve biological structures or features of organic mark activities during million of years.

Sedimentary rocks from the Parnaíba Basin contain preserved fossils of the Paleozoic Age, recording a history of the diversification and extinction of biota influenced by the movements of tectonic plates during that geological time, as well as related to geological processes and the supercontinent of the Gondwana changes [2].

The study of fossil plants is important because it allows understanding the mechanisms of various paleo-ecosystems in the geological history of the Earth. This furnishes insights about the paleo-climates, because the plants are very sensitive to climate changes [3].

The fossilization of plant remains, as well as those of other lifeforms, consists of burial of an organism followed by a series of physical, chemical and even biological processes that occur

in the sedimentary environment. Physical and chemical agents can continue after a sedimentary rock is formed (diagenesis). The results of all these agents and/or the interaction of plant remains with the surrounded sediments along the matrix diagenesis may lead to a fossil formation [3]. In particular, the study of the main aspects related to the plant fossilization process is growing in recent years due, to the application of physico-chemical techniques for the fossil characterization.

The spectroscopic characterization of fossils [4] may contribute to understand the various fossilization mechanisms, conditions and processes that have enabled the preservation of animals and plant remains in the sedimentary Parnaíba Basin. The present study deals with the fossilization processes related to the plants of the Paleozoic Era (Permian Period), through various physico-chemical techniques [5]. Analyses were performed aiming to determine the chemical and composition in the fossilized logs, therefore, inferring the sequence of chemical events and the main mechanisms of the fossilization process that produced the fossils.

2. EXPERIMENTAL:

2.1. Samples:

The four fossils studied in the present work are shown in the optical image of the Figure 1. This picture presents four kinds of trunk fossil samples surrounded by their sediments. Samples are characterized as gymnosperm and pteridophyte which came from outcrops belonging to Pedra de Fogo Formation, in the sedimentary Parnaíba Basin. This basin is situated in the northeastern region of Brazil (from the cities of Teresina and Monsenhor Gil, located in the State of Piauí and the city of Duque Bacelar, located in the State of Maranhão). The sample A corresponds to the fossil of a gymnosperm, collected from Duque Bacelar municipality. The sample B corresponds to a pteridophyte fossil also collected from Duque Bacelar. The sample C belongs to a gymnosperm fossil from Teresina municipality and, finally, the sample D, originated from Monsenhor Gil municipality, corresponds to a pteridophyta fossil specimen.

2.2. Characterization:

2.2.1 X-ray diffraction

The X-ray diffraction (XRD) patterns were obtained using a Rigaku powder diffractometer with the Bragg–Brentano geometry. The Co-K α radiation was used and operated at 40 kV and 25 mA. The XRD measurements were taken in the 2 θ range of 10–100°, using step scan procedures (0.02°) in counting times of 5 s. To perform the XRD measurements, we have used 1 g of powder samples and for data treatment, we have used the Xpert High score software with powder diffraction files (PDFs) included.

2.2.2 Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR)

The FTIR measurements were performed using a Bruker spectrometer, model Vertex 70. The spectral region analyzed spanned from 400 up to 4000 cm $^{-1}$. The attenuated total reflectance (ATR) technique was used in the measurements of the sample.

2.2.3 Energy dispersive spectroscopy (EDS) and scanning electron microscopy (SEM) analysis

The SEM/EDS analysis were performed using an equipment Hitachi TM-3000 tabletop increase of up to 30,000 times, at 15 kV with EDS coupled Swift ED 3000 with solid state detector.

2.2.4 Raman spectroscopy

Fourier transform (FT)-Raman spectra were collected with a Bruker RAM II FT-Raman module coupled with the VERTEX FT-IR spectrometer with a liquid nitrogen cooled high-sensitivity Ge detector with the samples excited through the 1064-nm line of an Nd: YAG laser. The resolution was 4 cm $^{-1}$ with accumulation of 60 scans per spectra and a nominal laser power of 120 mW.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Analytical data

Figure 2 shows the X-ray diffractograms for the four previously mentioned samples. According to the analysis of the XRD diffractograms (Figure 2), all aforementioned fossilized samples have presented quartz as the major crystalline constituent. Such results need to be

confirmed and expanded by the infrared and Raman spectroscopic studies, because the amorphous phase amount which may be into the samples cannot be detected by XRD.

Figure 3 shows the FTIR spectra of the four kinds of fossil trunks (samples A, B, C and D), collected from the Pedra de Fogo Formation. Regarding the profile of the FTIR spectra of these fossils, we observed the presence of SiO_2 vibrations associated with quartz [6], confirming the previously results shown by XRD results. The characteristics infrared bands associated with quartz are described in Table 2. The bands located at 462 cm^{-1} and 517 cm^{-1} , are due to the bending vibrations of the Si-O, whereas the bands observed at 694, 779, can be assigned as Si – Si stretching and bands at 1085 and 1164 cm^{-1} , correspond to the stretching vibration of the Si-O bonds [6,7]. The doublet near 800 cm^{-1} confirmed the presence of quartz in relation to other polymorphs of silica, such as the cristobalite and the tridymite [8]. This is an important point because in certain fossilization processes, as we will discuss below, quartz is the final product of a long chemical chain having cristobalite and tridymite as intermediate substances.

Figure 4 shows the Raman spectra of the fossils corresponding to the samples A, B, C and D. We observed two intense bands around 201 cm^{-1} and 464 cm^{-1} in the spectrum of sample D, which were assigned, respectively, as Si–O stretching/O–Si–O bending/Si–O torsion and Si – O stretching/-Si–O bending from the quartz compound [9]. Yet, related to the Raman spectra, three samples (A, B and C) present the band centered at 201 cm^{-1} with low intensity but the band at 464 cm^{-1} remains relatively intense. It is interesting to note that the peaks associated with the quartz have large bandwidths, which were supposed to be related with the distortion of the quartz crystal structures, due to the changes during the process of fossilization [10]. Furthermore, two other broad bands observed around 1350 and 1600 cm^{-1} also appeared in the Raman spectra of the three samples. They are very intense bands and can be associated with carbon of carbonaceous material present in the fossil (hybridizations sp^3 and sp^2 , respectively). These bands can be assigned respectively, as D and G bands corresponding to the amorphous carbon [11]. It is interesting to note that, in a previous work, the bands D and G were observed in the Raman spectrum of a wood fossil collected from Crato Formation, belonging to the Cretaceous Period, being associated with amorphous carbon contained in the sample, as well [5]. In the fossil from Crato Formation, the presence of the amorphous carbon and the additional presence of oxygen were interpreted – as one possible explanation – as consequence of natural fire. Additionally, recently the presence of carbon was interpreted as

originated from the plant remain (cellulose or lignin from the life plant) [4]. It is probable that this last interpretation should explain the presence of carbon in the fossils analyzed in the present work.

Figure 5(a-d) shows the scanning electron microscopy images of the four samples (A –D) previously analyzed by infrared and Raman spectroscopy and X-ray diffraction (a complete set of images is given in Supplementary Materials). The analysis of the EDS spectroscopy of the different points on the sample surfaces was used to give a semiquantitative determination of the chemical composition. The use of this technique allowed us to understand that the most of the samples are not perfectly homogeneous. For example, in Figure 5(a), from the white region studied we noted the presence of 39% weight of Si and 49% of oxygen, while in the black region (see Supplementary Material), silicon corresponds to 46% and oxygen, 53%. Related to sample B in Figure 5(b), it is possible noting a certain homogeneity regarding silicon and oxygen in different parts of the fossil. However, if we look at the concentration of iron, for example, a difference in 3% weight in different regions of the sample is verified. For the sample C appearing in Figure 5(c) an impressive non-homogeneity was observed: the quantity of silicon varies from 24% to 45% and the quantity of oxygen varies from 53% to 62% of weight. Similarly, the sample D in Figure 5(d) presents silicon varying from 20% to 26% weight and oxygen varying from 38% to 54%. Beyond this, in the sample D analysis showed iron with weight of 5% in certain parts and up to 35% in other parts. Such non-homogeneity is not exclusivity of the fossils studied in the present paper. In other studies, e.g. that performed in the plant *Brachyphyllum castilhoi* from the Cretaceous Period different quantities of pyrite were recorded at different points of the sample [12]. Regarding the four samples of the Pedra de Fogo Formation we note that SEM and EDS techniques allowed us to realize in a clear way the non-homogeneity of the fossils.

The analysis of the micromorphological patterns are characterized by microporous on the surface of the samples. The images (Figure 5), showed the silica occurring primarily as masses corresponding to the microgranular quartz [13]. Additionally, it was observed the presence of the chemical elements found in smaller quantities such as aluminum, iron (except for sample D) and potassium.

3.2 Fossilization process and silica source:

In the *Pedra de Fogo* Formation, the silica supply involved in the fossilization process of the plant remains, could be interpreted as originated from an external source, comprised of terrigenous alkaline materials present in typical arid climate conditions. This should promote the solubility of the silica and its transference to the deposited areas [14] because they are volcanic rocks and particularly known source of silica [15]. Related to the quartz found in a previous work, this was observed in the form of large crystals, contained in fine-grained matrix or glass. In these cases it is found as combined crystalline forms, constituted of bipyramidal prisms [16].

An important parameter to be considered during the silicification is the pH value, as this can present substantial changes during the process [15]. It is generally accepted that in order to occur silicification of wood, it must be rapidly buried in sediments and stay not exposed to oxygen, avoiding in this way decomposition by bacteria and fungi. The environment where this occurs generally is a fluvial one with the pH of water varying from 6 to 9; if the ambient is acid, fungi can be developed and if the ambient is exaggeratedly basic, it can destroy the molecules of the wood itself. Ideally, dissolved silica must be found in the environment, which is readily available where volcanic ash is present [13, 17]. It is believed the volcanic ash in glass or amorphous form absorbs water, releasing silica and producing a solution with monosilicic acid $[Si(OH)_4]$. According to Ref. [15] when concentration of the solution increases, the monosilicic acid polymerizes producing siloxane bonding and releasing water. The pivotal point in the process is that polymerized silicic acid form hydrogen bonds with organic molecules in the tissue of the wood. As consequence, layers of silicic acid are formed on the woody tissue. Continuing the polymerization process a coating of silica gel is produced on the cells (or filling voids of the wood). When gel loses water, solidifies in amorphous opal $[SiO_2 \cdot nH_2O]$. Successive crystallizations and loses of water form cristobalite, trydomite, chalcedony and, finally, quartz. Therefore, an eventual silification process is a complex event extending over several years.

Spectroscopic analysis used in this study showed a high prevalence of silica levels in all plant fossil samples checked. The results corroborate the work done by Alencar et al [4] with wood fossils originated from the same geological unit, e.g. *Pedra de Fogo* Formation. Therefore, it is possible to infer that the fossilization process that acted on the phytofossils record in the eastern portion is the same as the northern shore of the basin. However, the source of silica present in these fossils is still a matter of debate. In the *Pedra de Fogo* Formation, as already

commented, the silica source should be external [14]. In addition, Matysová *et al.* [18] suggested a similar climatic-driven process to explain the silicification of plant stems recovered from the Permian Motuca Formation strata located in Filadélfia municipality, northern Tocantins State, southwestern Parnaíba Basin. For these authors, the presumed silica source for the initial stage of silicification in that case was weathering of labile minerals, mostly feldspars in the alluvium. In this way, they excluded the volcanic influence on silicification mode of plant stems from Motuca Formation and interpreted it as a process occurred in fluvial sediments of basin fills, under a seasonally dry, warm climate, perhaps during a relatively fast tectonic basinal development.

In the case of phytophiliferous outcrops present in the northeastern and eastern portion of the basin, some of them are associated with autochthonous assemblages, i.e., fossil woods are in life position. It is worth noting that in the Pedra de Fogo Formation some trunks in vertical position reach up to 2,3 meters long, whereas others trunks in horizontal position have more than 180 centimeters in diameter. Both instances imply that there was a sizable burial of paleo flora caused by some catastrophic event. As suggested by Alencar *et al.* [4], possibly the event which enabled the permineralization of these macrophytosemblages could have been one or more pyroclastic depositional events in the presence of aqueous streams. However, Matysová *et al.* [18] noted, based on observations in Australian modern environments, that trees from the riparian vegetation are prone to survive in semiarid climatic conditions and that they are predisposed to be rapidly buried after seasonally extreme river discharges and later silicified. As consequence, some of the trunks at these deposits are found not far from their sites of growth and so must have also belonged to the original riparian vegetation, being preserved in vertical position. These flash fluvial regimes could be easily considered as catastrophic events. Finally, there is no other source of evidence, besides the abundance of silica over a wide geographic area, that supports the occurrence of contemporary volcanic events during the lifetime of plants studied here, i.e., during the accumulation of the sedimentary deposits of Pedra de Fogo Formation [14].

4. CONCLUSIONS

This study reported the characterization of four fossil trunks by X-ray diffraction measurements, SEM-EDS spectroscopy, as well as Raman and infrared spectroscopy. The

samples of the trunk fossils were obtained from sedimentary Parnaíba Basin in the Permian Pedra de Fogo Formation. These afore mentioned results suggested that during the fossilization process, the fossils in question, were affected by the environment and also suffered a process of permineralization with a partial substitution of its original composition by quartz. In addition, the results indicate that all plant remains have undergone similar diagenetic processes, which would be expected if they belong to the same lithostratigraphic unit. Quartz is the most abundant mineral in all the analyzed samples. However, the origin of the significant amount of silica, available in the depositional settings that gave origin to microcrystalline quartz available in the original depositional settings is still controversy. Further, analysis should be carried out in order to characterize signatures of other materials present in silicified plant stems and also in the surrounding rocky matrices. Only a detailed study of fossils and associated sedimentary deposits can in the future clarify the source of silica and, consequently, explain the way initially took place the fossilization process of plant remains in the Permian strata from Parnaíba Basin.

Acknowledgments

G.D. Saraiva, Ph.D, acknowledges the support from the MCTI/CNPQ/Universal 14/2014 (Grants#449471/2014-4) and the PQ – 2014 (Grants#306631/2014-8), R. Iannuzzi thanks CNPq for the grants (PQ 309211/2013-1) and PTCF thanks CNPq. The authors also wish to thank the following Brazilian institutions CAPES, FAPESPI and FUNCAP.

References:

- [1] Grotzinger J, Jordan T. 2013. Para Entender A Terra-6^a Ed. Editora Saraiva
- [2] Santos MEC, Carvalho MSS. 2004. Paleontologia das Bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís: Reconstituições Paleobiológicas. Rio de Janeiro: CPRM/ Serviços Geológicos do Brasil
- [3] Iannuzzi R, Vieira CEL. 2005. Paleobotânica. Porto Alegre, Ed. 5°, UFRGS
- [4] Alencar WJ, Santos FEP, Cisneros JC, Silva JH, Freire PTC, Viana BC, 2015. Spectroscopic analysis and X-ray diffraction of trunk fossils from the Parnaíba Basin, Northeast Brazil. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy **135**: 1052-1058

- [5] **Silva JH, Freire PTC, Abagaro BTO, Silva JAF, Saraiva GD, Lima FJ, Barros OA, Bantim RA, Saraiva AAF, Viana BC.** 2013. Studies of wood fossils from the Crato Formation, Cretaceous Period. *Spectrochimica Acta. Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy (Print)* **115**: 324-329
- [6] **Lippincott ER, Valkenburg AV, Weir CE, Bunting EN.** 1958. Infrared studies of polymorphs of silicon dioxide and germanium dioxide. *J. Res. Natl. Bur. Stand.* **61**: 61-70
- [7] **Saikia B, Parthasarathy G, Sarmah N.** 2008. Fourier transform infrared spectroscopic estimation of crystallinity in SiO₂ based rocks. *Bull. Mater. Sci.* **31**: 775–779. © Indian Academy of Science
- [8] **Russell JD, Fraser AR.** 1994. Infrared methods. *Clay Mineralogy: Spectroscopic and Chemical Determinative Methods*. London. Springer Netherlands 11-67
- [9] **Schmidt C, Ziemann MA.** 2000. In-situ Raman spectroscopy of quartz: A pressure sensor for hydrothermal diamond-anvil cell experiments at elevated temperatures. *Am. Mineral.* **85**: 1725–1734
- [10] **Legodi MA, de Waal D.** 2007. Raman spectroscopic study of ancient South African domestic clay pottery. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy Spectrosc. Acta A* **66**: 135–142
- [11] **Ferrari AC, Robertson J,** 2001. Resonant Raman spectroscopy of disordered, amorphous, and diamondlike carbon. *Phys. Rev. B* **64**: 75414- 75423.
- [12] **Sousa Filho FE, Silva JH, Saraiva AAF, Brito DDS, Viana BC, Abagaro BTO, Freire PTC.** 2011. Combination of Raman, Infrared, and X-Ray Energy-Dispersion Spectroscopies and X-Ray Diffraction to Study a Fossilization Process. *Braz. J. Phys.* **41**: 275–280
- [13] **Landmesser M.** 1984. Das problem der achatgenese. *Mitt. Pollichia* **72**: 5-137.
- [14] **Faria JR.** 1979. Estudo Sedimentológico da Formação Pedra de Fogo – Permiano da Bacia do Maranhão. Dissertação de Mestrado 70f. Universidade Federal do Pará
- [15] **Leo RF, Barghoon ES.** 1976. Silicification of wood, Botanical Museum leaflets, Harvard University 25: 1-49
- [16] **Tröger EW.** 1979. Optical determination of rock-forming minerals. Part 1, determination tables. E. Content Free Trial, Stuttgart, Germany, 188 p.
- [17] **Landmesser M.** 1994. Versteinertes Holz. *ExtraLapis* **7**: 1-174
- [18] **Matysová P, Rössler R, Götze J, Leichmann J, Forbes G, Taylor EL, Sakala J, Grygar T.** 2010. Alluvial and volcanic pathways to silicified plant stems (Upper

Carboniferous-Triassic) and their taphonomic and palaeoenvironmental meaning. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **292**: 127-143.

Caption for the figures:

Figure 1: Optical images of the fossil samples. A: gymnosperm, from Duque Bacelar municipality; B: pteridophyte, from Duque Bacelar; C: gymnosperm, from Teresina; D: pteridophyte, from Monsenhor Gil municipality.

Figure 2: X-ray diffractograms of samples A (in black), B (in red), C (in blue) and D (in green) showing the crystalline phase of the samples.

Figure 3: Infrared spectra of fossilized logs in the spectral range from 400 – 1400 cm⁻¹: A (in black), B (in red), C (in blue) and D (in green).

Figure 4: Raman spectra of the fossils A, B, C and D for the spectral ranges (a) from 150 to 700 cm⁻¹ and (b) from 950 to 1650 cm⁻¹. The identification of the four fossils is given in Table 2.

Figure 5: SEM images of four trunk fossils: a) fossil A, b) fossil B, c) fossil C, d) fossil D (see text) showing the localize of where the EDS spectra were performed.

Table 1: Identification of the four log fossils, with taxonomy and localization where samples were collected.

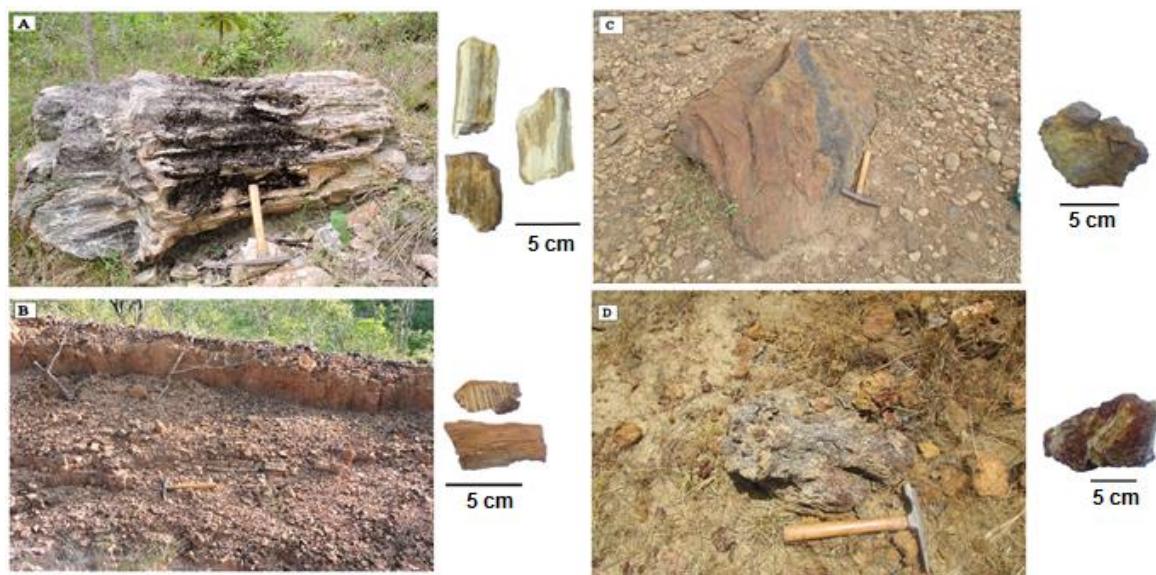
Samples	taxonomic identification	Localization	Geological unity and Period
A	Gymnosperm	APA dos Morros Garapenses, Duque Bacelar, MA	Pedra de Fogo Formation, Permian
B	<u>Pteridophyte</u>	APA dos Morros Garapenses, Duque Bacelar, MA	Pedra de Fogo Formation, Permian
C	Gymnosperm	Floresta Fóssil do Rio Poti, Teresina, PI	Pedra de Fogo Formation, Permian
D	<u>Pteridophyte</u>	Monsenhor Gil, PI	Pedra de Fogo Formation, Permian

MA = Maranhão State; PI = Piauí State

Table 2: Infrared and Raman modes assignments of the four fossils samples

IR modes					
Sample	A	B	C	D	Assignment*
Wavenumber (cm^{-1})	-	-	-	-	Quartz
	461	462	455	462	(Si-O bending)
	520	502	518	517	(Si-O bending)
	694	694	694	694	(Si stretching)
	778	779	778	778	(Si stretching)
	797	797	797	797	(Si stretching)
	1087	1087	1085	1087	(Si-O stretching)
	1164	1164	1164	1164	(Si-O stretching)
	Raman modes				
Sample	A	B	C	D	Assignment**
Wavenumber (cm^{-1})	201	200	201	201	Quartz
	464	464	464	462	Quartz
	1350	-	1350	1370	Carbon
	1575	-	1595	1600	Carbon

*[6, 7] **[11-20]

**Figure 1.**

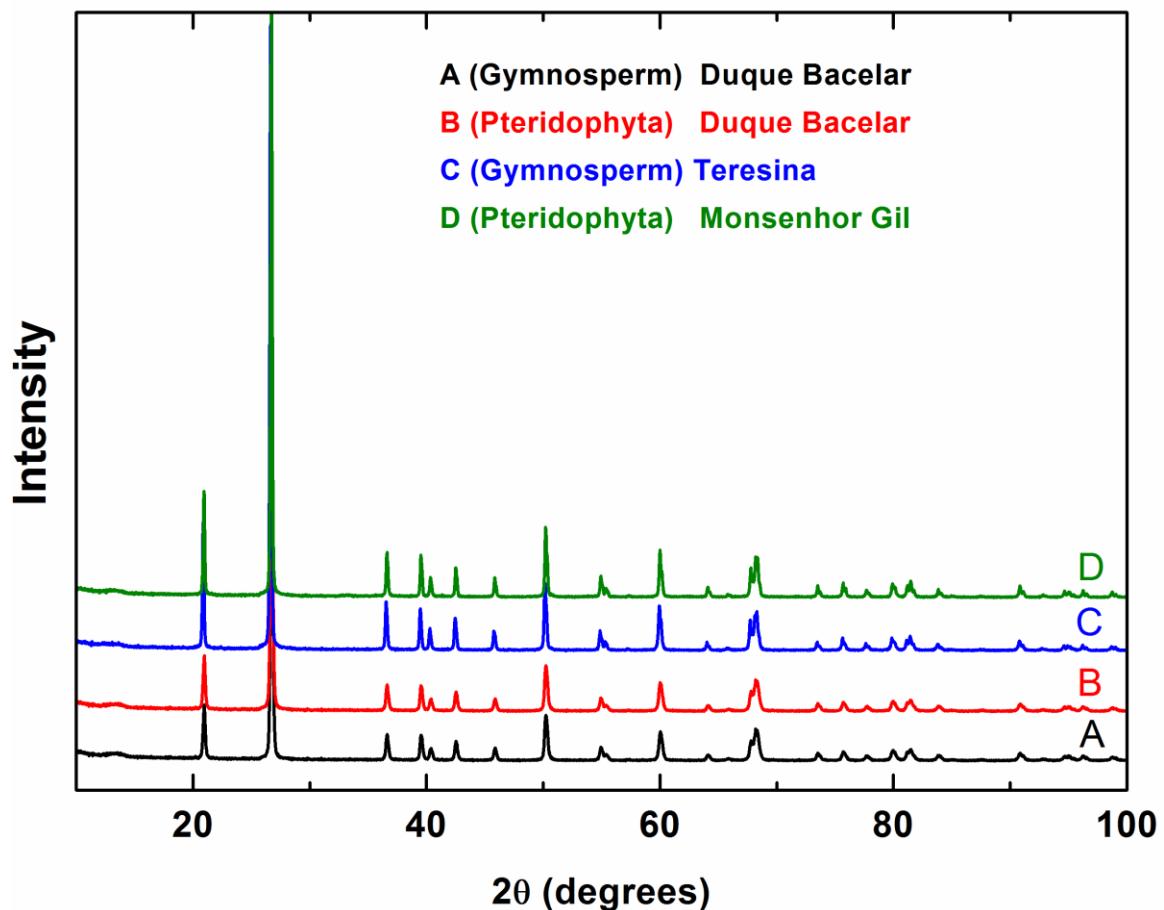


Figure 2.

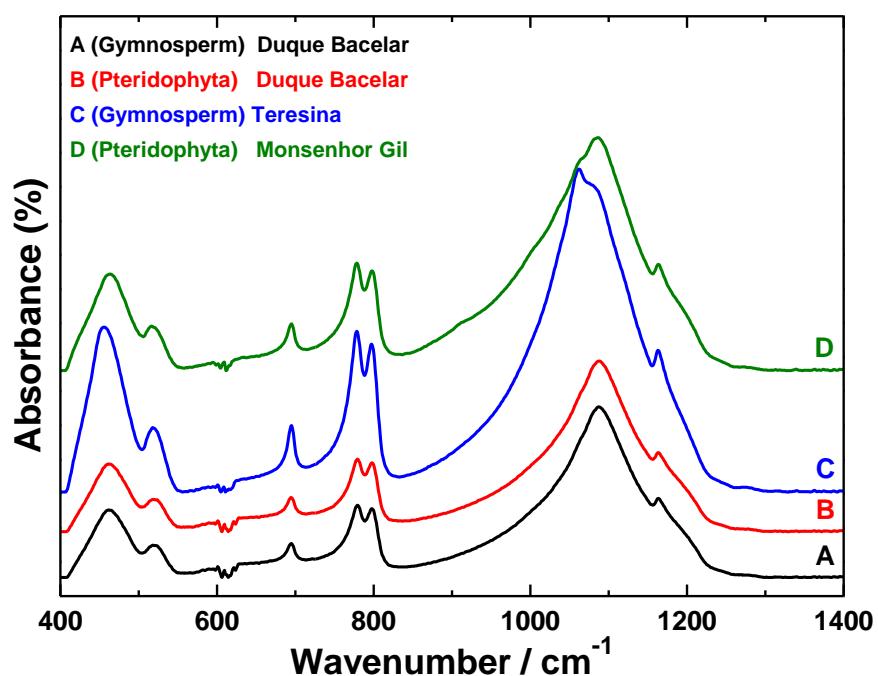


Figure 3.

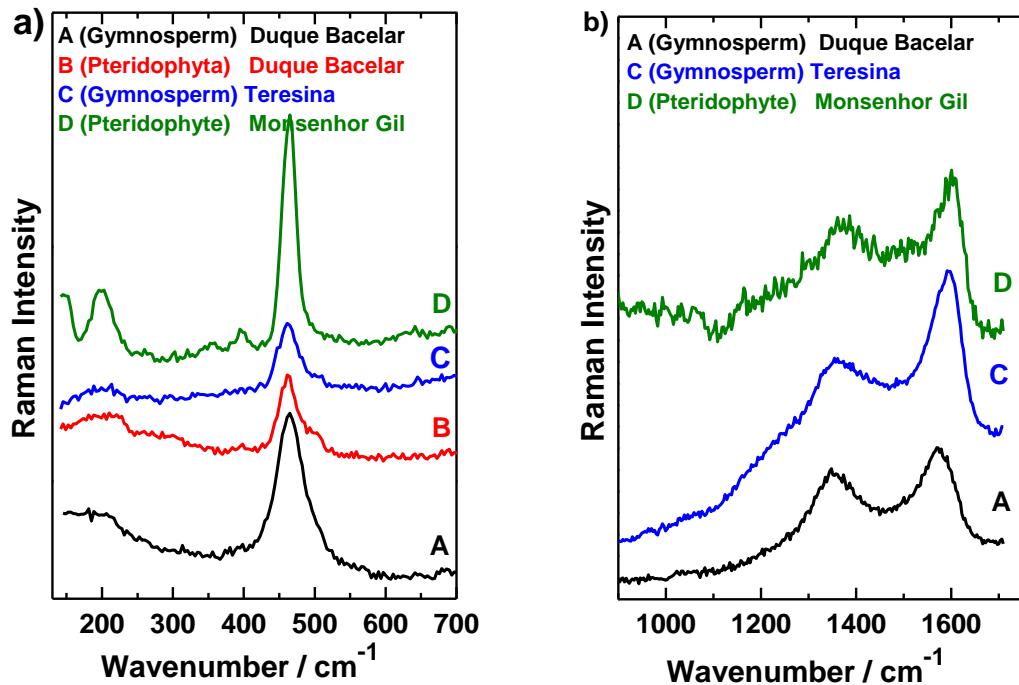


Figure 4.

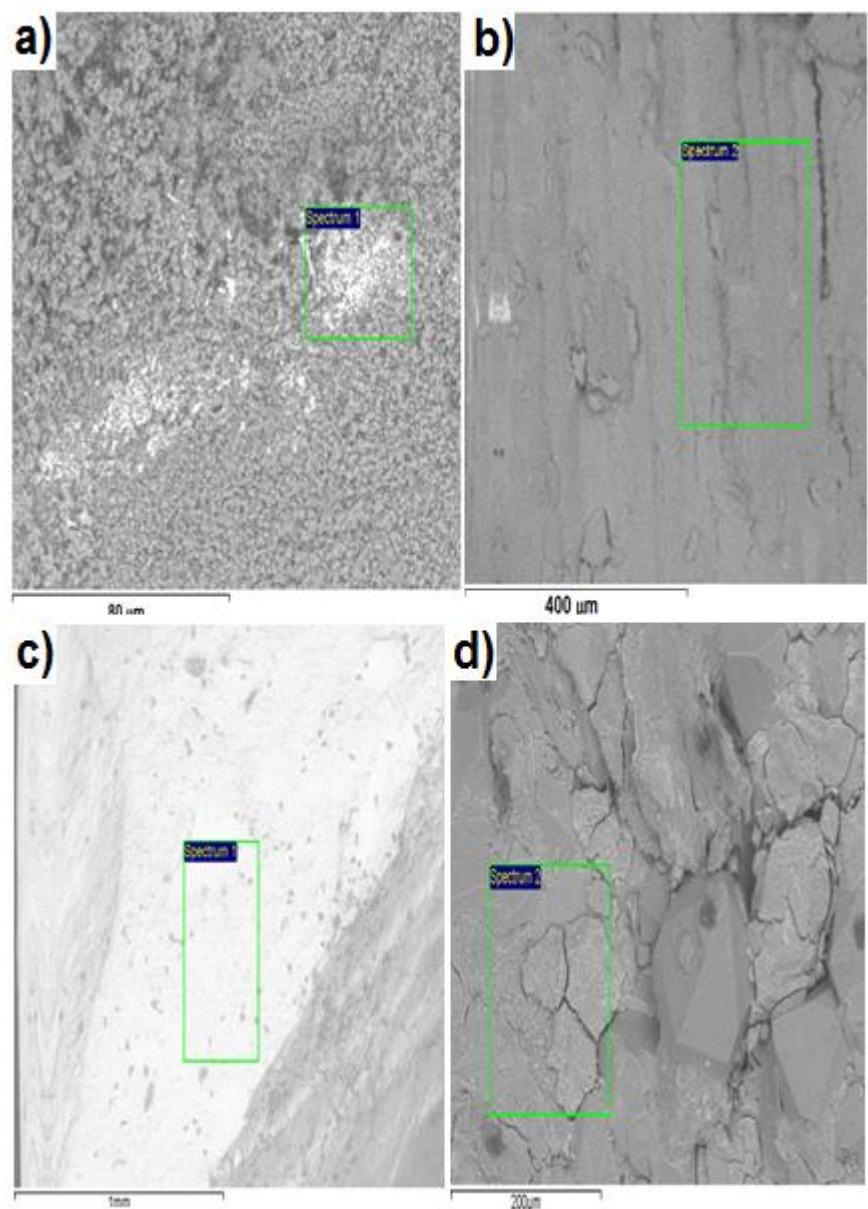


Figure 5.

4. CONCLUSÕES

4.1 Prospecção e georreferenciamento

As atividades de prospecção desenvolvidas na margem nordeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba possibilitaram o reconhecimento e georreferenciamento de duas novas “florestas petrificadas”, inseridas em estratos do Permiano (Cisuraliano), na porção inferior (*i.e.* Membro Sílex Basal) da Formação Pedra de Fogo, a saber:

- Sítio Paleobotânico São Benedito (SPSB): situado na área rural do município de Altos, no Estado do Piauí, e caracterizado por apresentar abundância de troncos gimnospérmicos de grande porte, alguns medindo até 1,80 m de diâmetro; nesse afloramento foram catalogados aproximadamente 70 troncos fósseis relativamente bem preservados pelo processo de permineralização por sílica que formam associações autóctones (?) a parautóctones.
- Afloramentos “Ladeira do Olho d'Água”, “Morro das Pedras Brancas”, “Fazendinha”, “Olho D'Água” e “Morro da Pandora”: situados na área rural dos municípios de Duque Bacelar e Coelho Neto, no Estado do Maranhão, apresentam associações autóctones a parautóctones, formadas predominantemente por lenhos gimnospérmicos de grande porte, tridimensionalmente bem preservados, e, em menor quantidade, por caules de samambaias arborescentes dispostos horizontalmente nas camadas, com até 5 m de comprimento. Os fitofósseis encontram-se rolados ou parcialmente inseridos nas camadas sedimentares (espécimes parautóctones/ alóctones), porém deve-se destacar que alguns exemplares foram encontrados em posição de vida (espécimes autóctones).

4.2 Caracterização geológica-sedimentar

A análise geológica-sedimentar dos afloramentos de Duque Bacelar e Coelho Neto revelou que as associações de vegetais fósseis em posição de vida ocorrem em camadas de níveis pelíticos, logo acima da zona de contato com a subjacente Formação Piauí, enquanto os troncos dispostos horizontalmente encontram-se rolados, fora da posição estratigráfica original ou, por vezes, imersos em camadas de arenito fluviais da Formação Piauí, ou ainda

associados a camadas de arenitos silicificados e nódulos de sílex. Verificou-se, ainda, que os macrorrestos vegetais *in situ* encontram-se inseridos em pacotes sedimentares de fácies lacustres situados na porção inferior da Formação Pedra de Fogo (FP), *i.e.* do Membro Sílex Basal, acima da zona de contato com a Formação Piauí (pensilvaniana). O conjunto geral dos dados obtidos neste trabalho trouxe nova luz ao conhecimento desses jazigos fitofossilíferos da FPF, pois contrasta com informações coletadas em estudos anteriores, realizados na margem sudoeste da bacia, que referem o posicionamento dos vegetais fósseis na parte superior dessa unidade geológica, *i.e.* no Membro Trisdela, ou, ainda, na sobrejacente Formação Motuca. O resultado aqui obtido é inédito na literatura e ilustra a necessidade do desenvolvimento de maior número de pesquisas nessa bacia sedimentar. O mais provável é que a maioria ou todos os pesquisadores estejam corretos e que exista mais de um intervalo estratigráfico contendo os vegetais fósseis nas sequências sedimentares do Permiano da Bacia do Parnaíba.

Deve-se ressaltar que a caracterização mais precisa, em termos geológicos, no SPSB, foi inviabilizada, haja vista, a falta de exposição de rochas sedimentares no local, as quais estão cobertas por solo e/ou vegetação. Entretanto, deduz-se que se trata de uma ocorrência inserida na FPF, devido ao mapeamento prévio da região pela CPRM e a presença das madeiras fósseis normalmente restritas a essa formação nesta porção da bacia. Somando a isso, ainda a presença no sítio de microbialitos (oides), considerados uma característica diagnóstica dessa unidade.

4.3 Análises espectroscópicas

As análises espectroscópicas realizadas em amostras representativas dos afloramentos fitofossilíferos de Duque Bacelar e Coelho Neto revelaram níveis elevados de sílica, mas também algum carbono amorfo residual. Esses resultados são concordantes com as medidas experimentais efetuadas por Alencar *et al.* (2014), que investigaram fósseis de madeira também oriundos de afloramentos da Formação Pedra de Fogo na porção nordeste (*e.g.* SPSB). A partir desses dados, inferiu-se que o processo de fossilização que agiu nos afloramentos fitofossilíferos de Duque Barcelar e Coelho Neto é similar ao que atuou nas madeiras analisadas pelos pesquisadores supracitados. No entanto, a fonte da sílica presente nos fósseis da Bacia Sedimentar do Parnaíba ainda é uma questão em debate, podendo inclusive estar relacionada a fatores climáticos, uma vez que, até o momento, não foram

detectadas evidências contundentes de influências vulcânicas em nenhum afloramento fossilífero dessa bacia.

4.4 Investigações taxonômicas

Com base na análise dos caracteres anatômicos da amostra de samambaia da região de Duque Bacelar, pôde-se classificar o exemplar como pertencente ao gênero *Psaronius*. Em relação às análises dos lenhos gimnospérmicos, com base no padrão de distribuição de traqueídeos do xilema secundário, nas características de raios do xilema e das paredes radiais dos traqueídeos do exemplar analisado e na comparação com os dados obtidos por Kurzawe et al. (2013a, 2013b), para o MNAFTO, a princípio, presume-se que se trate de alguns dos seguintes táxons: *Ductoabietoxylon solis* Kurzawe, Merlotti, Rößler et Iannuzzi 2013, *Scleroabietoxylon chordas* Kurzawe, Merlotti, Rößler et Iannuzzi 2103, *Damudoxylon buritiranaense*, Kurzawe, Merlotti, Rohn et Iannuzzi 2013 ou *Kaokoxylon punctatum* Kurzawe Merlotti et Iannuzzi 2013. No entanto, apenas estudos anatômicos mais detalhados poderá afirmar tal hipótese, assim, só podemos dizer que são lenhos gimnospérmicos não identificados.

A análise das lâminas petrográficas do SPSB revelou a boa preservação de porções do xilema secundário, suficientes para suportar futuros estudos taxonômicos do material investigado. No entanto, de modo geral, os espécimes da região de Duque Bacelar e Coelho Neto apresentaram melhor grau de preservação dos tecidos, mostrando maior potencial para futuros estudos anatômicos.

4.5 Geoconservação e medidas de proteção

Os espécimes de vegetais fósseis dos afloramentos aqui investigados encontram-se em um estado considerável de degradação antrópica, sobretudo, em decorrência de queimadas e realização de atividades agrícolas em suas áreas de ocorrências, entre outras. O SPSB localiza-se dentro de um assentamento do INCRA, porém, sem nenhum enquadramento legal de proteção. Desta forma, após elencar uma série de medidas de proteção cabíveis, em termos constitucionais, para essa área, acredita-se que a alternativa mais adequada seja transformar o sítio em um Monumento Natural, categoria unidade de conservação de proteção integral prevista no SNUC, a exemplo do que já foi aplicado na floresta fóssil do Tocantins, o MNAFTO, cujos sítios fitofossilíferos ocorrem dentro de propriedades rurais.

Na região de Duque Bacelar e Coelho Neto, problemas de conservação similares foram observados, porém em maiores proporções. Por outro lado, todos os afloramentos dessa região já estão legalmente amparados, na medida em que estão inclusos na Área de Proteção Ambiental dos “Morros Garapenses”, unidade de conservação de uso sustentável, prevista pelo SNUC. Assim sendo, acredita-se que o problema de conservação dos depósitos fossilíferos dessa região consiste especialmente na fragilidade da fiscalização, para aplicação do dispositivo legal já existente. Deste modo, nesse momento, as alternativas mais indicadas para essa região são: a implementação de atividades de educação patrimonial e ambiental para os moradores das comunidades do entorno da APA e, principalmente, a fiscalização efetiva, por parte dos órgãos públicos responsáveis pela proteção dos fósseis da região, visando a aplicação dos rigores da lei àqueles que degradam ou destroem o patrimônio existente nesses afloramentos.

4.6 Propostas para continuidade das pesquisas na área

De modo geral, os dados obtidos neste trabalho apontam para a necessidade do desenvolvimento de pesquisas mais aprofundadas nos afloramentos fitofossilíferos do Permiano na Bacia do Parnaíba, entre as quais podem ser elencadas as seguintes sugestões:

- Estudos geológicos, tafonômicos e taxonômicos no SPSB, visando obter dados sobre as associações fossilíferas e buscando responder se as madeiras ali existentes ocorrem em concentrações autóctones a parautóctones, ou parautóctones a alóctones.
- Efetuar de forma rigorosa e estatística a identificação taxonômica dos espécimes da margem nordeste da Bacia Sedimentar do Paranaíba, para obter dados que permitam inferências úteis em termos fitoestratigráficos e/o paleoecológicos e paleoambientais.
- Realizar análises estratigráficas da maior quantidade possível de afloramentos fitofossilíferos, tanto na FPF quanto na Formação Motuca, que possam fornecer mais dados sobre o posicionamento dos fitofósseis inseridos em sequências sedimentares do Permiano, na Bacia do Parnaíba.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, G.A. Revisão geológica da Bacia Paleozoica do Maranhão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25°., 1971, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBG, 1971. v.3, p.113-122.
- ALLEN, J.R.L. Studies in fluvatile sedimentation: Bar-Complexes and Sandstone Sheets (low-sinuosity braided streams) in the Brownstones. (L. Devonian), Welsh Border. **Sedimentary Geology**, 33(4): 237-393, 1983.
- 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**, 14: 3-60, 2014.
- ALENCAR, W.J.; SANTOS, F.E.P.; CISNEROS, J.C.; DA SILVA, J.H.; FREIRE, P.T.C.; VIANA, B.C. Spectroscopic analysis and X-ray diffraction of trunk fossils from the Parnaíba Basin, Northeast Brazil. **Spectrochimica Acta. Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, 135: 1052-1058, 2015.
- BRONGNIART, A. Notice sur le *Psaronius brasiliensis*. *Bulletin de la Société Botanique de France*, 19: 3-10, 1872.
- BARBOSA, O.; GOMES, F.A. Ministério da Agricultura - Departamento de Produção Mineral- Divisão de Geologia e Mineralogia. Boletim n. 174: Carvão mineral na Bacia Tocantins - Araguaia. Rio de Janeiro: **Serviço Gráfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 38p, 1957.
- BRITO NEVES, B.B. The Cambro-ordovician of the Borborema Province. São Paulo, USP, Boletim IG, **Série Científica**, 29:175-193, 1998.
- CAROZZI, A.V.; FALKENHEIN, F.U.M.; CARNEIRO, R.G.; ESTEVES, R.E.; CONTREIRAS, C.J.A. Análise ambiental e evolução tectônica sinsedimentar da seção siluro-eocarbonifera da bacia do Maranhão. Petrobras, **Centro Pesquisas Desenvolvimento; Ciência-Técnica-Petróleo, Seção: Exploratória de Petróleo**, 7: 1-14, 1975.
- CALDAS, E.B.; MUSSA, D.; LIMA FILHO, F.P.G.; RÖSLER, O. Nota sobre a ocorrência de uma floresta petrificada de idade permiana em Teresina, Piauí. **Boletim IG-USP: Publicação Especial**, 7: 69–87, 1989.
- CAPRETZ, R.L.; ROHN, R. Lower Permian stems as fluvial paleocurrent indicators of the Parnaíba Basin, northern Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology**, 45: 69-82, 2013.

CAPUTO, M.V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of Northern Basins of Brazil.** Santa Bárbara, University of California. Tese de Doutorado, 1984. 583p.

COIMBRA, A.; MUSSA, D. Associação lignitaoflorística na formação pedra de fogo (arenito cacunda), bacia do maranhão-piauí, Brasil: In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOLOGIA, 33°., 1984, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBG, 1984. Vol. 2, p. 591-605.

CONCEIÇÃO, D.M.; CISNEROS, J.C.; IANNUZZI, R. Novo registro de uma Floresta Petrificada em Altos, Piauí: relevância e estratégias para geoconservação. **Pesquisas em Geociências**, no prelo.

CONCEIÇÃO, D.M.; CISNEROS, J.C.; IANNUZZI, R., Nova floresta fóssil para o Permiano da Bacia do Parnaíba, Nordeste do Brasil: In: SIMPÓSIO ARGENTINO DE PALEOBOTÁNICA Y PALINOLOGÍA, XVI., La Plata. **Anais...** 2015.

CISNEROS, J.C.; MARSICANO, C., ANGIELCZYK, K.D.; SMITH, R.M. H.; RICHTER, M.; FRÖBISCH, J.; KAMMERER, C.F.; SADLEIR, R.W. New Permian fauna from tropical Gondwana. **Nature Communications**, 6: 76-86, 2015.

COX, C.B.; HUTCHINSON, P. Fishes and amphibians from the Late Permian Pedra de Fogo Formation of northern Brazil. **Palaeontology**, 34: 561-573, 1991.

CRUZ, W.B.C.; LIMA, E.A.M.; LEITE, J.F.; QUINO, J.S.; AGELIM, L.A.A.; VALE, P.A.B.R. **Projeto Carvão da Bacia do Parnaíba.** Rio de Janeiro, 1973. CPRM/DNPM (Rel. final. Da 1^a, 2^a e 3^a etapas).

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., SOUZA, C.R.G., FERNANDES, A.C.S., BERBERT-BORN, M., QUEIROZ, E.T. & CAMPOS, D.A. (Eds.). **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil.** Brasília, CPRM/SIGE, 2: 337–354, 2009.

DOLIANITI, E. A flora do Carbonífero inferior de Teresina, Piauí. Rio de Janeiro, Departamento Nacional de Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia, 56p. (Boletim 148), 1954.

FARIA JÚNIOR, L.E.C. **Estudo sedimentológico da Formação Pedra de Fogo - Permiano Bacia do Maranhão.** Universidade Federal do Pará. Tese de Doutorado, 1979.

FARIA JÚNIOR, L.E.C. & TRUCKENBRODT, W. Estratigrafia e petrografia da formação pedra de fogo – permiano da bacia do maranhão: In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOLOGIA, 31°., 1980, Camboriú. **Anais...** Camboriú: SBG, Vol. 2, p. 740-754.

GÓES, A.M.O.; FEIJÓ, F.J. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, 8(1): 57-67, 1994.

GÓES, A.M.O.; TRAVASSOS, W.A.; NUNES, K.C. **Projeto Parnaíba:** Reavaliação da bacia e perspectivas exploratórias. Belém, Petrobras. Rel. Interno. 1992.

IANNUZZI, R.; VIEIRA, C.E.L. 2005. **Paleobotânica.** 1^a ed. Porto Alegre, Editora da UFRGS, 2005. 167p.

IANNUZZI, R.; LANGER, M.C. The presence of Callipterids in the Permian of Northeastern Brazil: stratigraphic and phytogeographical implications. 403-406. In: R. ROCHA, J.; PAIS, J. C. KULLBERG & S. FINNEY (eds). STRATI 2013 - **First International Congress on Stratigraphy: at the Cutting Edge of Stratigraphy.** Springer Geology Series, 2014.

HERBST, R. Studies on Psaroniaceae. III. *Tietea derby* n. sp., from the Permian of Brazil. **Courier Forschungsinstitut Institute Senckenberg**, 147:155-161, 1992.

HERBST, R. Nueva descripción de *Psaronius arrojadoi* (Pelourde) (Marattiales), del Permico de Brasil. **Ameghiniana**, 21: 243-258, 1985.

HERBST, R. Studies on Psaroniaceae. IV. Two species of *Psaronius* from Araguaina, State of Tocantins, Brazil. **Facena**, 15, 9–17, 1999.

KEGEL, W. Contribuição para o estudo do Devoniano da bacia do Parnaíba. **Departamento Nacional de Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia:** Boletim, Rio de Janeiro, n.141, 1953. 48p.

KEGEL, W. Sobre Alguns Trilobitas Carboníferos do Piauí e do Amazonas: Brasil, **Departamento Nacional de Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia:** Boletim, Rio de Janeiro, n.135, 1951. 38p.

KURZAWE, F., IANNUZZI, R.; MERLOTTI, S.; RÖßLER, R; NOLL, R. New gymnospermous woods from the Permian of the Parnaíba Basin, Northeastern Brazil, Part 1: *Ductoabietoxylon*, *Scleroabietoxylon* and *Parnaiboxylon*. **Review of Palaeobotany and Palynology**, 195: 37-49, 2013a.

KURZAWE, F.; IANNUZZI, R.; MERLOTTI, S; ROHN, R. New gymnospermous woods from the Permian of the Parnaíba Basin, Northeastern Brazil, Part 2: *Damudoxylon*, *Kaokoxylon* and *Taeniopitys*. **Review of Palaeobotany and Palynology**, 195: 50-64, 2013b.

LISBOA, M.A. The Permian Geology of Northern Brazil. **American Journal of Science**, New Haven, 37: 425-443, 1914.

LIMA FILHO, F.P., ROCHA-CAMPOS, A.C. Sedimentos desérticos da formação Piauí (Pensilvaniano), Bacia do Parnaíba. **Boletim do Instituto de Geociências-USP**, Publicação Especial, 12: 65-66, 1992.

LIMA FILHO, F.P. **A sequência Permo-Pensilvaniana da Bacia do Parnaíba.** Universidade de São Paulo.Tese de Doutorado, 1998.

LIMA, E.A.M., LEITE, J.F. **Projeto estudo global dos recursos minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba:** Integração Geológica-Metalogenética. Recife, 1978. Relatório Técnico, MME/DNPM/CPRM, v.1, 212p.

- MABESOONE, J.M. Paleozoic- Mesozoic Deposits of the Piauí-Maranhão Syneclyse (Brazil): Geological History of a Sedimentary Basin. **Sedimentary Geology**, 19: 7-38, 1977.
- MERLOTTI, S.; ROSA, L.M. Lâminas delgadas de lenhos fósseis. In: DUTRA, T.L. (Org.). **Técnicas e procedimentos de trabalho com fósseis e formas modernas comparativas**. São Leopoldo, Unisinos, 36-37, 2002.
- MESNER, J.C.; WOOLDRIGE, L.C. Maranhão Paleozoic Basin and Cretaceous Coastal Basins, Northern Brazil. **Bulletin of the American Association Petroleum Geologist**, 48: 1.475-1.512, 1964.
- MIALL, A.D. Architectural-elements analysis: a new methods facies analysis applied to fluvial deposits. **Earth-Science Review**, 22: 261-308, 1985.
- MIALL, A.D. Facies architecture in clastic sedimentary basins. In: K.L. Kleinspehn & C. Paola (eds.). **New perspectives in basin analysis**. Springer-Verlag, Berlin, 67-81, 1988.
- MUSSA, D.; COIMBRA, A.M. Novas Perspectivas de Comparação entre as taofloras permianas (de lenhos) das Bacias do Parnaíba e do Paraná: In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 10°., 1987, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBP, 1987. Vol. 2, p. 901-923.
- NEREGATO, R.; RÖßLER, R.; ROHN, R.; NOLL, R. New petrified calamitaleans from the Permian of the Parnaíba Basin, central-north Brazil. Part I. **Review of Palaeobotany and Palynology**, 215: 23-45, 2015.
- PINTO, C.P.; SAD, J.H.G. Revisão da estratigrafia da Formação Pedra de Fogo, borda sudoeste da Bacia do Parnaíba. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOLOGIA, 34°., 1987, Goiânia: SBG, 1986, **Anais...** Vol.1, p. 346-358.
- OLIVEIRA, E. Ocorrência de plantas carboníferas da flora Cosmopolita no Estado do Piauhy. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**. 6: 113-118, 1934.
- PELOURDE, F. Observations sur le *Psaronius brasiliensis*. **Annales des Sciences Naturelles, Botanique**, 9: 337-352, 1912.
- PLUMMER, F.B. 1948. **Estados do Maranhão e Piauí**. Rio de Janeiro, Conselho Nacional do Petróleo, 47p. (Relatório Interno).
- PRICE, L.I. Um anfíbio labirintodonte da Formação Pedra-de-Fogo, Estado do Maranhão. Boletim do **Departamento Nacional de Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia**, n.124, 1-32, 1948.
- RÖßLER, R. The late Palaeozoic tree fern *Psaronius*: an ecosystem unto itself. **Review of Palaeobotany and Palynology**, 108: 55–74, 2000.
- RÖßLER, R. & GALTIER, J. First *Grammatopteris* tree ferns from the Southern Hemisphere e new insights in the evolution of the Osmundaceae from the Permian of Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology**, 121: 205-230, 2002a.

RÖßLER, R.; & GALTIER, J. *Dernbachia brasiliensis* gen nov. et sp. nov. a new small tree fern from the Permian of NE Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology**, 122: 239-263, 2002b.

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

RÖßLER, R. Two remarkable Permian petrified forests: correlation, comparison and significance. In: Lucas, S.G., Cassinis, G., Schneider, J.W. (Eds.), Non-marine Permian Biostratigraphy and Biochronology. **Geological Society London Special Publications** 265(1): 39-63, 2006.

SANTOS, M.E.C.M.; Carvalho, M.S.S. 2004. Paleontologia das bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís: **Reconstituições Paleobiológicas**. 2. ed. Rio de Janeiro: CPRM Serviços Geológicos do Brasil, 2004. 194p.

SILVA, A.J.P.; LOPES, R.C.; VASCONCELOS, A.M.; BAHIA, R.B. Bacias Sedimentares Paleozóicas E Meso-Cenozóicas Interiores. In: BIZZI, L.A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R.M.; GONÇALVES, J.H. (Eds.). **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil – texto, mapas e SIG**. Brasília- CPRM, 2003. 692 p.

SILVA J.H., FREIRE, P.T.C.; ABAGARO, B.T.O.; SILVA, J.A.F.; SARAIVA, G.D.; LIMA, F.J.; BARROS, O.A.; BANTIM, R.A.; SARAIVA, A.A.F.; VIANA, B.C. Studies of wood fossils from the Crato Formation, Cretaceous Period. **Spectrochimica Acta. Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, 115: 324-329, 2013.

TAVARES, T.M.V.; ROHN, R.; MERLOTTI, S. Caules permineralizados de *Titea* e *Psaronius* na Bacia do Paraná (Formação Corumbataí, Permiano). **Pesquisas em Geociências**, 38(2):114-131, 2011.

TAVARES, T.M.V.; ROHN, R.; RÖßLER, R.; NOLL, R. Petrified Marattiales pinnae from the Lower Permian of North-Western Gondwana (Parnaíba Basin, Brazil). **Review of Palaeobotany and Palynology**, 201: 12-28, 2014.

VAZ, P.T.; REZENDE, N.G.A.M.; Wanderley Filho, J.R.; Travassos, W.A.S. 2007. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, 15(2): 253-263.

ANEXOS



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Pesquisas em Geociências

Porto Alegre, 28 de agosto de 2015.

À
Domingas Maria da Conceição

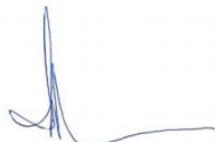
Venho comunicar que o manuscrito abaixo submetido, de vossa autoria, foi aceito em termos de mérito, para publicação em *Pesquisas em Geociências*, órgão de divulgação científica editado pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Nas fases seguintes, iniciaremos o processo de edição final, que inclui a conferência final do manuscrito (segunda revisão de texto, linguagem, referências bibliográficas e qualidade das figuras).

Em nome da Comissão Editorial, agradeço a seleção de *Pesquisas em Geociências* para a publicação de sua contribuição.

Título: Novo registro de uma Floresta Petrificada em Altos, Piauí: relevância e estratégias para geoconservação (autores: Domingas Maria da Conceição, Juan Carlos Cisneiros & Roberto Iannuzzi).

Atenciosamente,



Prof. Dr. Paulo Alves de Souza
Editor Chefe

Pesquisas em Geociências

Instituto de Geociências – Departamento de Paleontologia e Estratigrafia
Av. Bento Gonçalves, nº 9500 - Bloco 1 - Prédio 43127, Sala 209

CEP 91.540-000, Porto Alegre, RS, Brasil.

Tel.: +55.51.3308.7386 - Email: paulo.alves.souza@ufrgs.br

22/01/2016

Mensagem de Impressão do Outlook.com

[Imprimir](#)[Fechar](#)

Submission Confirmation

De: **Journal of South American Earth Sciences**
(ees.sames.0.36c2e0.bc444694@eesmail.elsevier.com)
Enviada: quarta-feira, 20 de janeiro de 2016 19:38:27
Para: domingasmary@hotmail.com; domingasmary@yahoo.com.br

Research Paper

Dear Domingas,

We have received your article "New petrified forest in Maranhão, Permian (Cisuralian) of the Parnaíba Basin, Brazil" for consideration for publication in Journal of South American Earth Sciences.

Your manuscript will be given a reference number once an editor has been assigned.

To track the status of your paper, please do the following:

1. Go to this URL: <http://ees.elsevier.com/sames/>
2. Enter these login details:
Your username is: domingasmary@hotmail.com
If you need to retrieve password details, please go to:
http://ees.elsevier.com/sames/automail_query.asp
3. Click [Author Login]
This takes you to the Author Main Menu.
4. Click [Submissions Being Processed]

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Elsevier Editorial System
Journal of South American Earth Sciences

22/01/2016

Mensagem de Impressão do Outlook.com

Please note that the editorial process varies considerably from journal to journal. To view a sample editorial process, please click here:

http://help.elsevier.com/app/answers/detail/p/7923/a_id/160

For further assistance, please visit our customer support site at <http://help.elsevier.com/app/answers/list/p/7923>. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions and learn more about EES via interactive tutorials. You will also find our 24/7 support contact details should you need any further assistance from one of our customer support representatives.

22/01/2016

Mensagem de Impressão do Outlook.com

[Imprimir](#)[Fechar](#)

Submission to Photochemical & Photobiological Sciences - manuscript (PP-ART-01-2016-000018)

De: **onbehalfof+pps+rsc.org@manuscriptcentral.com** em nome de **pps@rsc.org**
Enviada: sexta-feira, 22 de janeiro de 2016 18:00:14
Para: domingasmary@hotmail.com

22-Jan-2016

Dear Dr Conceição:

Spectroscopic studies on Permian plant fossils in the Pedra de Fogo Formation from the Parnaíba Basin, Brazil (PP-ART-01-2016-000018)

The above manuscript has recently been submitted to Photochemical & Photobiological Sciences. You have been listed as a co-author for this manuscript by the submitting author, Professor Gilberto Saraiva, and an account has therefore been generated for you in our online submission system.

You can check the status of papers you have authored/co-authored and edit your personal information and contact preferences by logging into your account:

Access your account here: <https://mc.manuscriptcentral.com/ppsci>
USER ID: domingasmary@hotmail.com
Password: [https://mc.manuscriptcentral.com/ppsci?
URL_MASK=596a1d92578444cfa3c4e4ecbb0380b5](https://mc.manuscriptcentral.com/ppsci?URL_MASK=596a1d92578444cfa3c4e4ecbb0380b5)

Please note, your user ID and password are the same for all Royal Society of Chemistry journals.

If you have any questions regarding this submission or your account, please contact the editorial office.

Yours sincerely,

Photochemical & Photobiological Sciences Editorial Office
pps@rsc.org

DATA PROTECTION

The Royal Society of Chemistry will store your information and may contact you from time

22/01/2016

Mensagem de Impressão do Outlook.com

to time about activities, products and services related to your research interests. If you do not wish to receive this information, you can change your settings at any time by logging in to your user account. Any such email you receive from us will also give you the option to unsubscribe.
