



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

**TESE DE DOUTORADO Nº 140**

**O MAR EPICONTINENTAL ITAITUBA NA REGIÃO  
CENTRAL DA BACIA DO AMAZONAS: PALEOAMBIENTE E  
CORRELAÇÃO COM OS EVENTOS PALEOCLIMÁTICOS E  
PALEOCEANOGRÁFICOS DO CARBONÍFERO**

**Tese apresentada por:**

**PEDRO AUGUSTO SANTOS DA SILVA**  
**Orientador: Prof. Dr. Afonso César Rodrigues Nogueira (UFPA)**

---

**BELÉM**  
**2019**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**  
**Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

D111m da Silva, Pedro Augusto Santos.  
O Mar epicontinental Itaituba na Região Central da Bacia do Amazonas: paleoambiente e correlação com os eventos paleoclimáticos e paleoceanográficos do Carbonífero / Pedro Augusto Santos da Silva, — 2019. xxvi 138 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Afonso César Rodrigues Nogueira  
Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

1. Pensilvaniano. 2. Bacia do Amazonas. 3. Formação Itaituba. 4. Isótopos de C e O. 5. Petrografia. I.  
Título.

CDD 551.7009811

---



**Universidade Federal do Pará**  
**Instituto de Geociências**  
**Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica**

**O MAR EPICONTINENTAL ITAITUBA NA REGIÃO  
CENTRAL DA BACIA DO AMAZONAS: PALEOAMBIENTE E  
CORRELAÇÃO COM OS EVENTOS PALEOCLIMÁTICOS E  
PALEOCEANOGRÁFICOS DO CARBONÍFERO**

**Tese apresentada por**


**PEDRO AUGUSTO SANTOS DA SILVA**

**Como requisito parcial à obtenção de Grau de Doutor em Ciências na Área de GEOLOGIA**

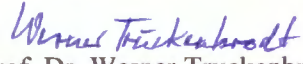
**Data de Aprovação: 14 / 03 / 2019**

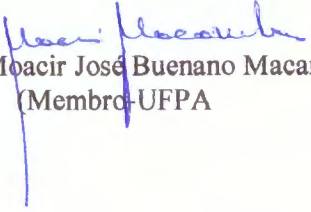
**Banca Examinadora:**

  
Prof. Dr. Afonso César Rodrigues Nogueira  
(Orientador- UFPA)

  
Prof.ª Dr.ª Ana Maria Góes  
(Membro-USP)

  
Prof. Dr. Isaac Daniel Rudnitzki  
(Membro-UFOP)

  
Prof. Dr. Werner Truckenbrodt  
(Membro-UFPA)

  
Prof. Dr. Moacir José Buenano Macambira  
(Membro-UFPA)

Ao meu pai Seu Bandeira (*In memoriann*)  
Pelos sacrifícios e o imenso amor e dedicação

## AGRADECIMENTOS

À Deus por suas diferentes formas de mostrar o mundo.

A família por ter compreendido o isolamento e o estresse causado durante esses anos todos de pós-graduação, agradeço por cada um de vocês terem me ensinado lições que levo para toda a vida, obrigado por se fazerem presente em minha vida, mesmo que houvesse distância em muitos momentos, serei sempre grato à minha querida mãe Denyse, aos meus tios e primos: José Bandeira Jr., Kely, Cecylia, Júnior, Ronaldo e em especial a minha vó Landa.

Ao programa de pós-graduação em geologia e geoquímica da Universidade Federal do Pará (PPGG-UFPA) pela infraestrutura, apoio financeiro e logístico.

À Cleida Freitas e Joalice Lopes, secretárias do PPGG, por todo auxílio e suporte fornecidos nesses anos de pós-graduação.

A CAPES e ao CNPQ pela concessão da bolsa de doutorado.

Ao grande amigo e orientador Prof. Dr. Afonso Nogueira, obrigado pelos ensinamentos da geologia sedimentar e todos os conselhos de vida. Serei sempre grato a quem há exatos 11 anos atrás, acreditou que mais um Silva poderia trilhar um caminho mais longo na vida, muito obrigado mestre!!!

Ao grande amigo Dr. José Bandeira, por me incentivar e mostrar o maravilhoso mundo da geologia, obrigado por tudo, pelos conselhos e paciência em momentos difíceis no desenrolar deste trabalho.

Ao projeto “Rochas calcárias da Bacia do Amazonas e Plataforma Bragantina: Avaliação de áreas potenciais para insumos agrícolas do Estado do Pará, regiões de Santarém-Uruará e do Salgado” Coordenado pelo Prof. Dr. Afonso Nogueira, pelo financiamento as etapas de campo na região de Monte Alegre.

Ao projeto “Estudo das ocorrências de minerais industriais—carbonatos, fosfatos e evaporitos — na região de Santarém—Itaituba (PA), Carbonífero da Bacia do Amazonas” (Edital MCT/CT-Mineral/CNPq N° 44/2010) coordenado pelo Prof. Moacir Macambira, pelo financiamento a etapa de campo da região do Rio Tapajós, em Itaituba.

Às professoras Dr<sup>a</sup>. Ana Karina Scomazzon e Dr<sup>a</sup>. Luciane Profs Moutinho por todo auxílio na etapa de campo em Monte Alegre, a todas as discussões a cerca dos conodontes e foraminíferos e os demais fósseis do Pensilvaniano.

Aos professores Dr. Rômulo Angélica, Dr. Moacir Macambira e Dr<sup>a</sup>. Rosemery Nascimento pelas valiosas discussões nas etapas de campo. Ao amigo Dr. Isaac Salém pela valiosa ajuda nas coletas de amostra e as conversas sobre os ricos paleoambientes deposicionais da Bacia do Amazonas.

Ao amigo Afonso Quaresma pelo auxílio em todas as etapas de campo e as conversas proveitosas e descontraídas.

Ao professor Cláudio Lamarão e ao técnico Bruno Portugal do LABMEV UFPA pelo auxílio nas análises de MEV-EDS.

À Joelma Lobo, Bruno Fernandes e Leandro Souza por toda a ajuda e paciência na confecção das lâminas delgadas.

Ao amigo Dr. Joelson Lima Soares pelas discussões e correções e pelas conversas descontraídas. Ao amigo Dr. Hudson Santos pelo auxílio com as lâminas na catodoluminescência.

À professora Dra. Lucieth Cruz Vieira, responsável pelo laboratório de isótopos estáveis da Universidade Federal de Brasília, pelas análises de isótopos de Carbono e Oxigênio.

A Marcus Waring Valderano pela preciosa contribuição nas correções do inglês da tese.

Ao amigo Msc. Alexandre Ribeiro (maniçoba) pela ajuda na confecção de algumas figuras e ao amigo Msc. Alexandre Castelo pela ajuda nos mapas geológicos da tese.

Ao amigo Dr. Guilherme Rafaelli Romero pela ajuda na formatação, no inglês e nas discussões da tese.

Aos estimados amigos do Grupo de Análise de Bacias Sedimentares da Amazônia (GSED), em especial os da sala 8. Obrigado por esse tempo de convivência: Alexandre Ribeiro, Hudson Santos, Walmir Lima, Luiz Saturnino, Francisco Abrantes, Cléber Eduardo, Lucas Cunha (Chelsea), Isaac Salém, Isaac Rudnitzki e Renato Sol (Solzinho) por esses anos de convivência e momentos de descontração.

A todos os integrantes do grupo GSED, em especial aqueles que tive mais convivência durante esses anos de trabalho: Raphael Araújo, Quézia Alencar, Alexandre Castelo, Mateus Xavier, Sanmya Karoline, Isabella Miranda, Isabele Barros, Anna Andressa, Taynara, Giovanni, Renan, Nayan César, Sebastian, Ivan e Adriana.

Ao amigo prof. Msc. Rick de Oliveira, obrigado por me receber em Santarém, uma cidade All the time.

Ao amigo Prof. Dr. Fábio Domingos pelos papos descontraídos no trajeto Marambaia-UFPA. Foram longos anos, difíceis, repletos de aprendizado e proveitosas discussões científicas, mas recompensadores no âmbito geral. Agradeço a todos que de certa forma participaram deste trabalho, ajudando ou atrapalhando, o importante foi participar. Desculpe-me, caso tenha esquecido alguém.

Existem muitas hipóteses em ciências que estão erradas.  
Isso é perfeitamente aceitável,  
elas são a abertura para achar as que estão certas  
**Carl Sagan**

## RESUMO

A paleogeografia do Carbonífero de Gondwana Ocidental foi dominada por mares epicontinentais ligados ao Oceano Panthalassa a Oeste. Uma sucessão transgressiva Pensilvaniana mista siliciclástica-carbonática, com 50m de espessura, foi estudada em afloramentos e testemunhos de sondagem utilizando uma combinação de análises faciológicas, estratigráficas com a estratigrafia isotópica de C e O. Trinta e quatro fácies representativas dos sistemas deposicionais costeiros a plataformais são agrupadas em três associações de fácies (AF): AF1 depósito desértico costeiro constituídos de arenitos finos a médios, pelitos e dolomitos finos a arenosos que correspondem a uma complexa associação de dunas arenosas eólicas, lençóis de areia, interduna, canais fluviais e depósitos lagunares bioturbados pelos traços fósseis *Palaeophycus*, *Lockeia*, *Thalassinoides* e *Rosselia*. AF2) planície de maré mista constituída por arenitos finos a médios, pelitos, folhelhos, siltitos e dolomitos finos, interpretados como depósitos de supramaré, de canais de maré, delta de marés e lagunas com fósseis de braquiópodes e equinodermas. AF3) depósitos carbonáticos de plataforma constituídos por *lime mudstones*, *wackestones*, *packstones*, *grainstones* com aloquímicos (oóides e pelóides), grãos terrígenos e abundantes e diversificados organismos bentônicos marinhos rasos como: restos de peixes, foraminíferos, braquiópodes, equinodermas, gastrópodes, briozoários, trilobitas, corais, ostracodes e conodontes, interpretados como barras bioclásticas e plataforma carbonática. As espécies de conodontes *Neognathodus symmetricus*, *Streptognathodus sp.* e *Ellisonia sp.* em AF3 indicam uma idade Baskiriana-Moscoviana para estes depósitos. A dolomitização afetou os calcários e arenitos de AF1 e AF2 substituindo a matriz micrítica e ocorrendo como dolomita em sela, indicando mistura de águas meteóricas e marinhas e soterramento respectivamente. O neomorfismo da matriz micrítica opaca e em conchas de bivalves são constatadas pelo crescimento de mosaico de cristais xenotópicos. Em contraste, o cimento calcítico secundário é equigranular, fibroso, *bladed* e espático. A micritização é encontrada nas conchas de bioclastos exibindo envelope micrítico. A autigênese de quartzo e pirita de origem biogênica é comumente encontrada em AF2 e AF3. A compactação mecânica e química nos calcários causou a redução da porosidade, cimentação, fraturas e o desenvolvimento de *dissolution seams* e estilólitos. Os arenitos foram cimentados por quartzo, calcita e óxidos e hidróxidos de ferro e mostram contatos de grãos côncavos-convexos e suturados. A predominância de feições eodiagnéticas e subordinadamente mesodiagnéticas na sucessão Monte Alegre-Itaituba indicou um arcabouço menos modificado pelos processos diagenéticos, que corrobora com a assinatura original dos valores de  $\delta^{13}\text{C}$



variando de  $\sim -2\%$  a  $+5,28\%$ . Esta tendência enriquecida se coaduna com a alta produtividade orgânica, desencadeada pelo florescimento maciço de organismos bentônicos de controle eufótico, principalmente em AF3. Cinco tipos de ciclos de raseamento ascendente e assimétricos caracterizam a sucessão Monte Alegre-Itaituba. Ciclos de perimare em deserto costeiro (ciclo I) foram formados pela alternância de dolomitos e arenitos com valores de  $\delta^{13}\text{C}$  variando de  $-1,5\%$  a  $+0,3\%$ . Os ciclos II consistem em intercalações de arenito pelito e arenito floatstone e o ciclo III é composto por alternância de dolomitos e arenitos. Estes ciclos como depósitos de planície de maré e laguna com valores de  $\delta^{13}\text{C}$  alcançando de  $+3,98\%$  a  $+4,62\%$ . O ciclo IV é um ritmito formado por pares de *wackestone/lime mudstone*, enquanto o ciclo V consiste na alternância de *grainstones*, *wackestones* e *lime mudstones* (ciclicidade ABC) passando para ciclos compostos por *wackestones* e *lime mudstones* (ciclicidade AB). Os ciclos IV e V são depósitos de plataforma com valores de  $\delta^{13}\text{C}$  variando de  $+3,65\%$  a  $5,28\%$ . O empilhamento de 53 ciclos com espessuras médias de 1,1 m, combinados com o diagrama de *Fisher plot*, indicou um padrão de empilhamento agradacional a retrogradacional inserido em um trato de sistema transgressivo inicial (ciclos I-III) e o trato de sistema transgressivo tardio (ciclos IV e V). A sucessão foi depositada em  $\sim 13$  Ma e os ciclos individuais acumulados em aproximadamente 0,25 Ma, típicos de ciclos de quarta ordem relacionados a flutuações do nível do mar de alta frequência. Estes dados foram correlacionados com as curvas globais de  $\delta^{13}\text{C}$  e nível do mar que posicionaram a sucessão Monte Alegre-Itaituba no Serpukhoviano Superior ao Moscoviano inferior. A influência da glaciação Mississippiana Superior foi insignificante nestes depósitos, mas a transgressão pós-glacial associada a lenta subsidência da Bacia do Amazonas gerou os ciclos I, IV e V. Os ciclos II e III foram formados por processos autóctones durante um período de equilíbrio entre o suprimento e a glacioeustasia. A sucessão Monte Alegre-Itaituba é o registro de um grande mar epicontinental amazônico que estava diretamente ligado ao Oceano Panthalassa durante o Pensilvaniano.

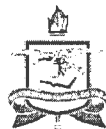
Palavras-chave: Pensilvaniano, Bacia do Amazonas, Sucessão Monte Alegre-Itaituba, ciclicidade de alta frequência, isótopos estáveis de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{18}\text{O}$

## ABSTRACT

The Carboniferous paleogeography of the West Gondwana was dominated by epicontinental seas connected with the Panthalassa Ocean to the west. 50m-thick Pennsylvanian mixed siliciclastic-carbonate transgressive succession of the Amazonas Basin, Northern Brazil, were studied in outcrops and cores using facies and stratigraphic analysis in combination with O- and C-isotopic stratigraphy. Thirty-four facies, representative of coastal to shelf depositional systems grouped in three facies associations (FA): FA1) coastal desertic deposits, consisting of fine to medium-grained sandstone, mudstone and fine-grained dolostone that corresponds to a complex association of aeolian dunes, sand sheets, interdunes, fluvial channels and lagoon deposits bioturbated by *Palaeophycus*, *Lockeia*, *Thalassinoides* and *Rosselia* trace fossils; FA2) mixed tidal flat setting, constituted by fine to medium-grained sandstone, mudstone, shale, siltstone, lime mudstone and fine dolostone interpreted as supratidal, tidal channel, tidal delta and lagoon deposits with some brachiopod and echinoderm body fossils; and FA3) carbonate shelf deposits, consisting of lime mudstone, wackestone, packstone and grainstone with allochems (ooids and peloids), terrigenous grains and abundant and diversified open shallow marine benthic organisms, including, fish remains, foraminifers, brachiopods, echinoderms, gastropods, bryozoans, trilobites, corals, ostracodes, and conodonts, interpreted as bioclastic bars and carbonate shelf deposits. The conodonts species *Neognathodus symmetricus*, *Streptognathodus sp.* and *Ellisonia sp.* in the FA3 indicate the Baskirian-Moscovian age. The dolomitization affected the limestone and sandstone of AF1 and AF2 replacing the micritic matrix and occur as saddle dolomite indicating mixed of meteoric and marine waters and late burial. The neomorphism of opaque micritic matrix and bivalve shells are indicated by the growing of xenotopic mosaic of calcite crystals. In contrast, the secondary calcite cement is equant, fiber, bladed and espatic. Micritization is found in the bioclast shells exhibiting micritic coatings. The autigenesis of quartz and biogenic pyrite is commonly found in FA2 and FA3. The mechanic and chemical compaction in limestone caused the porosity reduction, cementation, fractures and development of dissolution seams and stylolite. The sandstones were cemented by quartz, calcite and iron hydroxides/oxides and show concave-convex and sutured contacts between quartz grains. The predominance of eodiagenetic and subordinate mesodiagenetic features in the Monte Alegre-Itaituba succession indicated less modified framework by the diagenesis corroborating the pristine signature of  $\delta^{13}\text{C}$  values ranging from  $\sim -2$  to  $\sim +5.28\%$ . This enriched trend upsection coadunate with high organic productivity triggered by massive flourishing of euphotic-controlled benthic organisms mainly in the FA3.

Five types of shallowing upward asymmetric cycles characterize the Monte Alegre-Itaituba succession. Peritidal cycles in coastal desertic (Cycle I) were formed by alternance of dolostone and sandstone with  $\delta^{13}\text{C}$  values ranging from -1.5 to +0.3‰. Cycles II consist in interbedded of sandstone-mudstone and sandstone-mudstone-floatstone rhythmites and the Cycle III constitute dolostone interbedded with sandstone. These cycles II and III were interpreted as tidal flat and lagoon deposits with  $\delta^{13}\text{C}$  values ranging from +3,98‰ to +4, 62‰. The Cycle IV is a rhythmite formed by *wackestones/mudstones* couplets while the Cycle V consists of alternance of *grainstones*, *wackestones* and lime *mudstone* (ABC cyclicity) passing upsection for cycles composed by *wackestones* and lime *mudstone* (AB cyclicity). The cycles IV and V are shelf deposits with  $\delta^{13}\text{C}$  values ranging from +3,65‰ a +5,28‰. The stacking of 53 cycles with average thickness of 1,1 m, combined with Fisher plot diagram, indicated an aggradational to retrogradational stacking pattern inserted in the lowstand to early transgressive system tract (Cycles I-III) and late transgressive system tract (Cycles IV and V). The succession was deposited in ~13 Ma and individual cycles accumulated in an approximately 0.25 my typical of fourth order cycles related to high-frequency fluctuations of relative sea level. These data were correlated to the global  $\delta^{13}\text{C}$  and sea-level curves that positioned the Monte Alegre-Itaituba succession in the Late Serpukhovian to Early Moscovian age. The influence of Late Mississippian glaciation was negligible in these deposits but the post-glacial transgression combined with slow subsidence of the Amazonas basin caused the generation of allogenic cycles I, IV and V. The cycles II and III were formed by autochthonous processes during a period of equilibrium between supply and glacioeustasy. The Monte Alegre-Itaituba succession is the record of a large Amazonia epicontinental sea that was directly connected with the Panthalassa Ocean during Pennsylvanian.

Key-Words: Pennsylvanian, Amazonas Basin, Monte Alegre- Itaituba Succession, high frequency cyclicity,  $\delta\text{C}^{13}$  e  $\delta\text{O}^{18}$  stable isotopes



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA

## PARECER

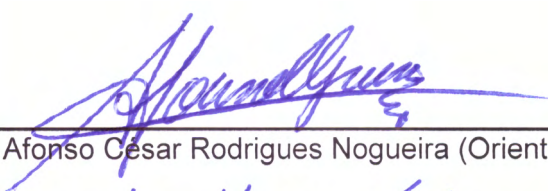
### Sobre a Defesa Pública da Tese de Doutorado de PEDRO AUGUSTO SANTOS DA SILVA

A banca examinadora da Tese de Doutorado de **PEDRO AUGUSTO SANTOS DA SILVA** orientando do Prof. Dr. Afonso César Rodrigues Nogueira (UFPA), composta pelos professores doutores Ana Maria Góes (USP), Isaac Daniel Rudnitzki (UFOP), Werner Truckenbrodt (UFPA) e Moacir José Buenano Macambira (UFPA), após apresentação da sua tese intitulada “**O MAR EPICONTINENTAL ITAITUBA NA REGIÃO CENTRAL DA BACIA DO AMAZONAS: PALEOAMBIENTE E CORRELAÇÃO COM OS EVENTOS PALEOCLIMÁTICOS E PALEOCEANOGRÁFICOS DO CARBONÍFERO**”, emite o seguinte parecer:

O documento do candidato apresenta um volume significativo de dados, porém necessita de melhor organização, redação e revisão bibliográfica, que podem ser corrigidas nos artigos submetidos. Na apresentação da tese e arguição o candidato demonstrou maior segurança na temática desenvolvida, em particular, sobre o paleoambiente da sucessão Monte Alegre – Itaituba, exposta nas bordas norte e sul da Bacia do Amazonas, por meio de análise de fácies, petrologia sedimentar e isótopos estáveis. O candidato demonstrou domínio sobre o tema da tese e os métodos aplicados.

Finalmente, a banca examinadora decidiu por unanimidade aprovar a tese de doutorado de Pedro Augusto Santos da Silva.

Belém, 14 de março de 2019.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Afonso César Rodrigues Nogueira (Orientador – UFPA)

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Maria Góes (USP)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Isaac Daniel Rudnitzki (UFOP)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Werner Truckenbrodt (UFPA)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Moacir José Buenano Macambira (UFPA)