



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

---

**TESE DE DOUTORADO Nº 161**

**RECONSTITUIÇÃO PALEOAMBIENTAL E POTENCIAL  
PETROLÍFERO DA SUCESSÃO SILICICLÁSTICA-  
CARBONÁTICA PERMIANA DA BACIA DO PARANÁ**

**Tese apresentada por:**

**AILTON DA SILVA BRITO**

**Orientador: Prof. Dr. Afonso César Rodrigues Nogueira (UFPA)**

---

**BELÉM**

**2022**

**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)**

---

B862r Brito, Ailton S..  
Reconstituição Paleoambiental e Potencial Petrolífero da  
Sucessão Siliciclástica-Carbonática Permiana da Bacia do Paraná /  
Ailton S. Brito. — 2022.  
xxiii, 238 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Afonso C. R. Nogueira  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de  
Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e  
Geoquímica, Belém, 2022.

1. Sistema misto siliciclástico-carbonático. 2. rocha  
geradora. 3. geoquímica orgânica. 4. paleoambiente. 5. mar  
epicontinental. I. Título.

CDD 558.1

---



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

**RECONSTITUIÇÃO PALEOAMBIENTAL E POTENCIAL  
PETROLÍFERO DA SUCESSÃO SILICICLÁSTICA-  
CARBONÁTICA PERMIANA DA BACIA DO PARANÁ**

**Tese apresentada por**

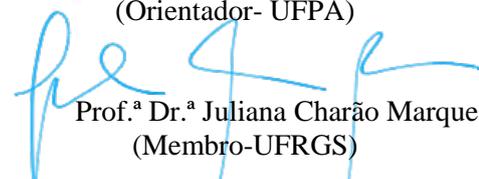
**AILTON DA SILVA BRITO**

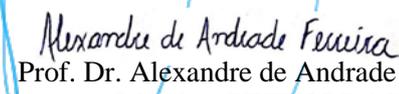
**Como requisito parcial à obtenção de Grau de Doutor em Ciências na Área de GEOLOGIA,  
Linha de Pesquisa Análise de Bacias Sedimentares.**

**Data de Aprovação: 15 / 02 / 2022**

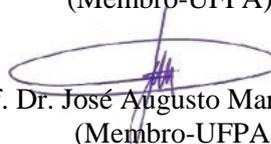
**Banca Examinadora:**

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

  
Prof.ª Dr.ª Juliana Charão Marques  
(Membro-UFRGS)

  
Prof. Dr. Alexandre de Andrade Ferreira  
(Membro-PETROBRAS)

  
Prof. Dr. Joelson Lima Soares  
(Membro-UFPA)

  
Prof. Dr. José Augusto Martins Corrêa  
(Membro-UFPA)

*Aos meus pais Valber e Maria Eunice.*

## AGRADECIMENTOS

---

À Universidade Federal do Pará (UFPA), ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela oportunidade, apoio financeiro e concessão de bolsa de doutorado (CNPq - 140630/2019-8) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À empresa Irati Petróleo e Energia LTDA e ao Marcelo Albuquerque pelos 163 furos de sondagens e mais de três mil análises geoquímicas cedidos para a realização dessa pesquisa.

À minha família: Valbe, Maria Eunice, Airton, Alessandro e Gildene, pelo incondicional apoio ao longo dos vários anos necessários para chegar até a conclusão desse doutorado.

Ao meu orientador Afonso Nogueira pela oportunidade de realização desse doutorado, pelo apoio, incentivos, paciência e valiosas críticas e sugestões. Sou grato ainda pelos ensinamentos técnico-científicos e conselhos que foram cruciais para minha evolução social e profissional.

Ao Prof. Dr. Sidney Lima da Universidade Federal do Piauí (UFPI) e ao Laboratório de Geoquímica Orgânica (LAGO) por todo suporte (técnico e financeiro) durante minha estadia na UFPI para realização das análises de biomarcadores.

Ao Prof. Dr. Joelson Soares pela atenção, paciência e valiosos ensinamentos ao longo desses 10 anos de academia. Obrigado pela amizade e por sempre está à disposição para dúvidas e discussões acerca da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Roberto Vizeu pelos ensinamentos e produtivas discussões que foram fundamentais nesse trabalho.

À Lorena Tuane, doutoranda no Programa de Pós-graduação em Química (PPGQ-UFPI), pelo suporte na realização das análises de biomarcadores e interpretação dos cromatogramas. Agradeço ainda pela amizade e parceria desenvolvida ao longo desses anos.

Especial agradecimentos à Joelma Lobo e Bruno Veras, técnicos do Laboratório de Laminação do Instituto de Geociências da UFPA, não somente pela confecção das lâminas delgadas e polidas, mas principalmente pela amizade, atenção e apoio ao longo da pesquisa, em

especial nos últimos dois anos, que mesmo sob as restrições impostas pela pandemia Covid, se esforçaram para ajudar sempre que possível. As análises petrográficas só saíram no tempo previsto graças a incansável dedicação e comprometimento desses dois, muito obrigado!

Ao Dr. Marcelo Vasquez do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV-CPRM) pela disposição, gentileza e suporte na realização das análises de MEV/EDS. Ao Prof. Dr. Romulo Angélica e ao técnico Aldemir Sotero do Laboratório de Difração de Raios-X (DRX) pela realização das análises de DRX e auxílio nas interpretações.

Ao Dr. Artur Chahud pelo auxílio na identificação do conteúdo fossilífero.

Ao meu companheiro José Neto pela ajuda na elaboração das figuras, tabelas e análises estatísticas dos dados. Sou grato também pelo apoio, incentivo e por acreditar! Muito obrigado, te amo!

Ao Mcs. Renan Santos pela amizade e por todo apoio, sugestões, conselhos e troca de conhecimento durante o desenvolvimento desse trabalho.

Ao Mcs. Pablllo H. Santos, técnico do Museu de Geociências, pelo suporte e pelos longos anos de amizade.

Aos amigos do Grupo de Sedimentologia (GSED) e da pós-graduação: Bruna Nogueira, Renata veras, Luiz Saturnino, Fabio Domingos, Pedro Guilherme, Ivan Romero, Pedro Augusto, Walmir Lima, Alexandre Ribeiro pelo suporte, críticas, sugestões e trocas de conhecimento.

Agradeço a todos que contribuíram direta e indiretamente para o desenvolvimento da tese.

*“A verdade pode sempre ser encontrada na simplicidade, e não na multiplicidade e confusão das coisas.”*

*— Isaac Newton*

## RESUMO

---

O Permiano foi marcado por extremas mudanças paleogeográficas e paleoclimáticas com predominância de condições áridas em todo o globo como consequência da queda eustática do final da glaciação carbonífera ao início do Permiano. As fases finais de aglutinação continental do supercontinente Pangeia proporcionaram soerguimentos acompanhados de sucessivas regressões dos mares epicontinentais culminando com a instalação de sistemas desérticos no final do Permiano. Durante a fase regressiva marinha o Pangeia Ocidental foi sítio deposicional de uma sucessão mista siliciclástica-carbonática de 50m de espessura sob condições paleoambientais restritas e rasas, amplamente distribuída na Bacia do Paraná, SE da América do Sul. A sucessão estudada inclui o topo da Formação Palermo, Formação Irati e a base da Formação Serra Alta, compreendendo um total de 120m. A Formação Irati é composta essencialmente por dolomito intercalado a folhelho cinza a negro rico em matéria orgânica, este considerado um importante gerador de hidrocarbonetos. Esta unidade recobre depósitos heterolíticos da Formação Palermo e é sobreposta pelos folhelhos da Formação Serra Alta. O alto teor e a boa qualidade da matéria orgânica presente nos folhelhos Irati despertaram interesse econômico desde o século XIX. Embora muitos trabalhos tenham contribuídos para o conhecimento do paleoambiente deposicional e potencial gerador dessa unidade, principalmente a partir de dados de geoquímica orgânica, ainda permanecem lacunas quanto o entendimento paleoambiental, previamente interpretado como mar restrito ou lacustre. Essa pesquisa foi realizada a partir de 125 testemunhos de sondagens distribuídos nas regiões centro-norte, centro-sul e extremo sul da bacia, cedidos pela empresa Irati Petróleo LTDA. complementados por afloramentos da região norte. Foram selecionados 23 testemunhos de sondagem para estudo sedimentológico e estratigráfico a partir de análises de fácies/microfácies, auxiliadas por DRX, MEV-EDS e imagens de catodoluminescência. O teor de carbono orgânico total (COT) e análise de pirólise Rock-Eval e biomarcadores foram realizadas em amostras de 102 testemunhos. A integralização dos dados possibilitou: a correlação lateral da Formação Irati por mais de 2.000 km na direção SSW-NNE da bacia; a reconstituição paleoambiental; e caracterização lateral e vertical do potencial gerador. Vinte e uma fácies/microfácies foram identificadas, organizadas em cerca de 300 pares siliciclástico-carbonáticos que se agrupam em 59 ciclos de alta frequência representativos dos ambientes de *mid-outer ramp* e *offshore* dominado por sistemas de turbidez distais. A sucessão é constituída por quatro sequências de terceira ordem (S1, S2, S3 e S4). Os limites de sequências são do tipo 2, sem evidência de erosão subaérea, marcados pela sobreposição de depósitos transgressivos de *offshore*. Os tratos de sistemas transgressivos são sucedidos por tratos de sistemas de mar alto definidos pela sobreposição dos folhelhos cinzas a negros por níveis de dolomito com tendência de espessamento ascendente, que indicam alta produtividade de carbonato sob condições normais a hipersalinas, evidenciado pela presença de gamacerano, cristais de halita e pseudomorfos de gipso. Os depósitos transgressivos das sequências S3 e S4 (Membro Assistência) formam os dois intervalos (*oil-shale*) com maior potencial gerador da Bacia do Paraná. O *oil-shale* S3 apresenta os maiores valores de carbono orgânico e potencial gerador. Os maiores picos de COT foram 19,40% para a região extremo sul, 22,23% para o centro-norte e 27,12% para o centro-sul da bacia. Quanto ao querogênio predomina tipo I e II, que também apresenta aumento da contribuição, principalmente do tipo I

convergindo para o centro-sul. *Oil-shale* S4 possui valores de COT inferiores para a região extremo sul (8,82%), centro-sul (21,7%) e centro-norte (14,61%). O tipo de querogênio nesse intervalo é semelhante ao *oil-shale* S3, predomina tipo II com alta contribuição do tipo I na região centro-sul e menores proporções do tipo III. A matéria orgânica da Formação Irati é predominantemente imatura, contudo, ocorrências de temperatura máxima de pirólise ( $T_{máx}$ ) igual ou superior a 440 °C em amostras próximas das soleiras de diabásio mostram que houve maturação localizada de matéria orgânica, o que corrobora a ocorrência de um sistema gerador não-convencional para os depósitos mistos de folhelhos negros (geradores) - carbonatos (reservatórios) da Formação Irati. Em relação a quantidade e qualidade da rocha geradora presente na Formação Irati a porção centro-sul apresenta os maiores valores de carbono orgânico assim como potencial para geração de hidrocarbonetos. A análise dos padrões de empilhamento associada às idades prévias de SHRIMP U-Pb a partir de cinzas vulcânicas possibilitou a correlação da sucessão com a curva global do nível do mar, permitindo estimar uma idade de 8,0 Ma para o Mar Irati e de 2,7 Ma para as sequências deposicionais de 3ª ordem. Da mesma forma foram calculadas idades de 26,6 ka para os pares carbonáticos-siliciclásticos, 135,5 ka e 400 ka para os ciclos de alta frequência, cuja origem é aqui atribuída a ciclicidade climática induzida pela oscilação orbital terrestre, compatíveis com a ciclicidade Milankovitch. A caracterização dos ciclos com base nos dados faciológicos e de geoquímica orgânica também demonstram um forte controle climático na geração dos intervalos ricos em matéria orgânica.

**Palavras-chave:** Sistema misto siliciclástico-carbonático, rocha geradora, geoquímica orgânica, paleoambiente, mar epicontinental

## ABSTRACT

---

The Permian age was marked by extreme paleogeographic and paleoclimatic changes with predominances of arid conditions across the globe as a consequence of the eustatic sea-level fall from the end of the Carboniferous glaciation to the beginning of the Permian. The final phases of continental agglutination of the Pangea supercontinent caused uplifts accompanied by successive regressions of the epicontinental seas, culminating with the installation of desert systems at the end of the Permian. During the marine regressive phase, Western Pangea was the depositional site of a 50m thick mixed siliciclastic-carbonatic succession under restricted and shallow paleoenvironmental conditions, widely distributed in the Paraná Basin, SE of South America. The studied succession includes the top of the Palermo, Irati, and the base of the Serra Alta Formation, comprising a total of 120 m-thick. The Irati succession is essentially composed of dolomite intercalated with organic matter gray to black shale rich, which is considered an important source rock for hydrocarbons. This unit covers the heterolithic deposits from the Palermo Formation and is overlaid by shales from the Serra Alta Formation. The high content and good quality of organic matter present in Irati shales aroused economic interest since the 19th century. Although many works have contributed to the knowledge of the depositional paleoenvironment and generating potential of this unit, mainly from organic geochemical data, gaps remain regarding the paleoenvironmental understanding, previously interpreted as restricted sea or lacustrine. This research was carried out from 125 drill cores distributed in the center-north, center-south, and extreme south of the basin, provided by the company Irati Petróleo LTDA. complemented by outcrops from the northern region. Twenty-three drill cores were selected for sedimentological and stratigraphic study from facies/microfacies analyses, aided by XRD, SEM-EDS, and cathodoluminescence images. Total organic carbon (TOC), Rock-Eval pyrolysis, and biomarker analysis were performed on 102 cores. The integration of data allowed: the lateral correlation of the Irati Formation for more than 2,000 km in the SSW-NNE direction of the basin; the paleoenvironmental reconstitution; and lateral and vertical characterization of the generating potential. Twenty-one facies/microfacies were identified and organized into about 300 siliciclastic-carbonate couplet that are grouped into 59 high-frequency cycles representative of mid-outer ramp and offshore environments dominated by distal turbidity systems. The succession consists of four third-order sequences (S1, S2, S3, and S4). Sequence boundaries are type 2, with no evidence of subaerial erosion, marked by overlapping transgressive offshore deposits. Transgressive Systems Tracts are succeeded by Highstand Systems Tracts defined by the appearance of dolomite levels with a thickening upwards tendency, which indicates high carbonate productivity under normal to hypersaline conditions, evidenced by the presence of gammaceran, halite crystals, and pseudomorphs of gypsum. The transgressive deposits of sequences S3 and S4 (Assistance Member) form the two intervals (oil-shale) with the greatest generating potential in the Paraná Basin. Oil-shale S3 has the highest values of organic carbon and generating potential. The highest TOC peaks were 19.40% for the extreme south region, 22.23% for the center north, and 27.12% for the center-south of the basin. Kerogen predominates types I and II, which also presents an increased contribution, mainly from type I converging to the center-south. Oil-shale S4 presents lower TOC values for the extreme south region (8.82%), south-central (21.7%), and north-central (14.61%). The kerogen

type is similar to oil-shale S3, it predominates type II, with a high contribution of type I in the south-central region and smaller proportions of type III. The organic matter of the Irati Formation is predominantly immature, however, occurrences of maximum pyrolysis temperature (T<sub>max</sub>) equal to or greater than 440 °C in samples close to diabase sills show that there was localized maturation of organic matter, which corroborates the occurrence of a non-conventional petroleum system for mixed deposits of black shales (generators) - carbonates (reservoirs) of the Irati Formation. Regarding the quantity and quality of the source rock present in the Irati Formation, the center-south portion presents the highest values of organic carbon as well as the potential for hydrocarbon generation. The analysis of the stacking patterns associated with the previous ages of SHRIMP U-Pb from volcanic ash allowed the correlation of the succession with the global sea-level curve, allowing to estimate an age of 8.0 Ma for the Irati Sea and of 2.7 Ma for 3rd order depositional sequences. Likewise, ages of 26.6 ka were calculated for the carbonate-siliciclastic couplets, 135.5 ka and 400 ka for the high-frequency cycles, whose origin is here attributed to the climatic cyclicity induced by the terrestrial orbital oscillation, compatible with the Milankovitch cyclicity. The characterization of the cycles based on faciological and organic geochemical data also demonstrates a strong climate control in the generation of intervals rich in organic matter.

**Keywords:** mixed carbonate-siliciclastic system, source rocks, organic geochemistry, paleoenvironment, epicontinental sea



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 AILTON DA SILVA BRITO

A banca examinadora da Tese de Doutorado de **AILTON DA SILVA BRITO** orientando do Prof. Dr. **Afonso César Rodrigues Nogueira (UFPA)**, composta pelos professores doutores **Juliana Charão Marques (UFRGS)**, **Alexandre de Andrade Ferreira (CENPES/PETROBRAS)**, **Joelson Limas Soares (UFPA)** e **José Augusto Martins Corrêa (UFPA)**, após apresentação da sua tese intitulada “**RECONSTITUIÇÃO PALEOAMBIENTAL E POTENCIAL PETROLÍFERO DA SUCESSÃO SILICICLÁSTICA-CARBONÁTICA PERMIANA DA BACIA DO PARANÁ**”, emite o seguinte parecer:

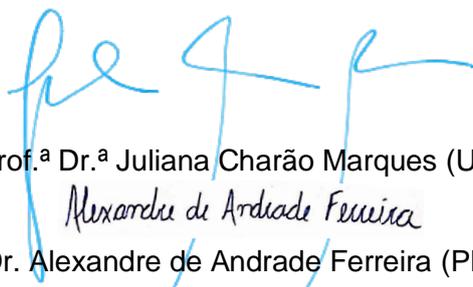
O candidato realizou sua apresentação de modo claro e bem organizado, dentro do tempo estipulado. Na arguição mostrou domínio da temática abordada e respondeu às perguntas formuladas pela banca. A banca destaca que o volume e a qualidade dos dados obtidos são uma importante contribuição para a geologia da Bacia do Paraná, em especial da Formação Irati. Por outro lado, merecem uma atenção os seguintes pontos: revisão da descrição dos métodos aplicados na geoquímica orgânica, melhor detalhamento da geoestatística, revisão das fácies, da ordem e do tempo de duração dos ciclos.

De modo geral, o trabalho caracteriza-se pelo elevado detalhamento, volume e qualidade de dados geoquímicos, estratigráficos e petrográficos obtidos.

Finalmente, a banca examinadora decidiu por unanimidade aprovar a tese de doutorado.

Belém, 15 de fevereiro de 2022.

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



Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Juliana Charão Marques (UFRGS)

*Alexandre de Andrade Ferreira*

Prof. Dr. Alexandre de Andrade Ferreira (PETROBRAS)



Prof. Dr. Joelson Lima Soares (Membro-UFPA)



Prof. Dr. José Augusto Martins Corrêa (Membro-UFPA)