

SIDNEY GONÇALO  
(Organizador)

Fósseis Moleculares e Aplicações em  
GEOQUÍMICA  
ORGÂNICA

Atena  
Editora  
Ano 2021

SIDNEY GONÇALO  
(Organizador)

Fósseis Moleculares e Aplicações em  
GEOQUÍMICA  
ORGÂNICA

Atena  
Editora  
Ano 2021

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Gabriel Motomu Teshima

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2021 Os autores

Copyright da edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial****Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná



Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



## Fósseis moleculares e aplicações em geoquímica orgânica

**Diagramação:** Daphynny Pamplona  
**Correção:** Mariane Aparecida Freitas  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizador:** Sidney Gonçalves de Lima

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F752 Fósseis moleculares e aplicações em geoquímica orgânica /  
Organizador Sidney Gonçalves de Lima. – Ponta Grossa -  
PR: Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-815-8

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.158220601>

1. Fósseis moleculares. 2. Geoquímica orgânica. I.  
Lima, Sidney Gonçalves de (Organizador). II. Título.

CDD 561

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

contato@atenaeditora.com.br



**Atena**  
Editora  
Ano 2021

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



## APRESENTAÇÃO

Fósseis Moleculares ou biomarcadores em amostras geológicas, são produtos derivados de precursores bioquímicos (biopolímeros) por processos diagenéticos (processos redox), os quais tem sido aplicado a estudos ambientais, análise forense e, em especial, na avaliação de sistemas petrolíferos. Tais compostos são alvos da Geoquímica Orgânica, tornando-se uma das ferramentas indispensável na exploração do petróleo, graças ao avanço, também, de técnicas cromatográficas de separação e análise.

O desenvolvimento de um estudo sistemático da composição orgânica dos sedimentos e petróleo experimentou um grande incremento nas últimas décadas. O desenvolvimento de novas técnicas analíticas instrumentais de CG-EM e CG/EM/EM compõem o fator determinante. São instrumentos que propiciam a caracterização molecular em microquantidades de misturas orgânicas altamente complexas, possibilitando contornar problemas de co-eluição e obter informações mais confiáveis sobre a identidade e quantidade dos biomarcadores.

Na presente edição denominada “**Fósseis Moleculares e Aplicações em Geoquímica Orgânica**”, apresenta-se alguns estudos teóricos e práticos, desenvolvidos em diferentes instituições de ensino e pesquisa, com óleos e rochas de Bacias Sedimentares Brasileiras.

Apresenta-se uma série de 14 artigos, referentes à análise de óleos e matéria orgânica de sedimentos, com diferentes abordagens, metodologias. Há, por exemplo, trabalhos de revisão sobre biomarcadores e suas aplicações, cálculos teórico-computacionais para prever a estrutura de asfaltenos, análise de hidrocarbonetos poliaromáticos em sedimentos recentes e, ainda, alguns estudos, correlacionando biomarcadores ao paleo-ambiente deposicional, a origem da matéria orgânica (marinha, lacustre), a fonte, a biodegradação e/ou a maturidade de amostras geológicas.

Sidney Gonçalo de Lima




## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

#### **ANÁLISE DE BIOMARCADORES EM ROCHAS CRETÁCEAS DA BACIA DE SÃO LUIS**


Andrenilton Ferreira Silva  
Artur Leal Carvalho Barros  
Anita Jocelyne Marsaioli  
Sidney Gonçalo de Lima

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1582206011>

### **CAPÍTULO 2..... 14**

#### **ANÁLISE DE BIOMARCADORES NEUTROS EM SEDIMENTO DA FORMAÇÃO SERRA ALTA - PERMIANO (BACIA DO PARANÁ)**


Lorena Tuane Gomes de Almeida  
Ailton da Silva Brito  
Sidney Gonçalo de Lima

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1582206012>

### **CAPÍTULO 3..... 27**

#### **ANÁLISE DE HIDROCARBONETOS SATURADOS E CAROTENOIDES AROMÁTICOS EM AMOSTRA DE FOLHELHO DAS CAMADAS BATATEIRA, BACIA DO ARARIPE**


Artur Leal de Carvalho Barros  
Andrenilton Ferreira Silva  
Gustavo Rodrigues de Sousa Junior  
André Luiz Durante Spigolon  
Sidney Gonçalo de Lima

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1582206013>

### **CAPÍTULO 4..... 42**

#### **APLICAÇÃO DOS CROMANS NA AVALIAÇÃO DA SALINIDADE E INFLUXO DE ÁGUA DOCE EM FOLHELHOS DA FORMAÇÃO IRATI, BACIA DO PARANÁ**

Laercio Lopes Martins  
Caroline Adolphsson do Nascimento  
Georgiana Feitosa da Cruz  
Hélio Jorge Portugal Severiano Ribeiro  
Eliane Soares de Souza  
Hans-Martin Schulz


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1582206014>

### **CAPÍTULO 5..... 59**

#### **AVALIAÇÃO DA ORIGEM E EVOLUÇÃO TÉRMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA REGISTRADA EM FÁCIES DA FORMAÇÃO IRATI AFETADAS POR INTRUSÕES ÍGNEAS (REGISTRO PERMIANO DA PORÇÃO NORTE DA BACIA DO PARANÁ), UTILIZANDO-SE BIOMARCADORES**

Lucas Pinto Heckert Bastos  
Danielle da Costa Cavalcante  
Celma Jorge de Menezes


Carmen Lucia Ferreira Alferes  
Debora Bonfim Neves da Silva  
Andressa Oishi  
René Rodrigues  
Egberto Pereira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1582206015>

**CAPÍTULO 6..... 77**

BIOMARCADORES PRESERVADOS EM CARBONATOS NEOPROTEROZOICOS REGISTRADOS NA FAZENDA ARRECIFE (FORMAÇÃO SALITRE) – BAHIA


Érika Gaspar Martins  
Danielle da Costa Cavalcante  
Debora Bonfim Neves da Silva  
Egberto Pereira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1582206016>

**CAPÍTULO 7..... 94**

CARACTERIZAÇÃO DE COMPONENTES ÁCIDOS EM PETRÓLEOS BIODEGRADADOS: COMPARATIVO ENTRE EXTRAÇÃO EM FASE SÓLIDA (SPE) E CROMATOGRAFIA EM COLUNA DE EXTRAÇÃO CONTÍNUA


Georgiana Feitosa da Cruz  
Lívia Carvalho Santos  
Laercio Lopes Martins  
Luana Pontes Gouveia  
Alexsandro Araujo da Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1582206017>

**CAPÍTULO 8..... 111**

COMPOSTOS POLARES EM PETRÓLEO APLICADOS A PROCESSOS GEOCROMATOGRÁFICOS


Paulo Cesar Muniz de Lacerda Miranda  
Christian Rocque Souto Maior  
Sidney Gonçalo de Lima  
Gustavo Rodrigues de Sousa Júnior

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1582206018>

**CAPÍTULO 9..... 123**

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS INTERVALOS *OIL SHALE* PERMIANOS DA BACIA DO PARANÁ

Ailton da Silva Brito  
Lorena Tuane Gomes de Almeida  
Sidney Gonçalo de Lima


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1582206019>

**CAPÍTULO 10..... 133**

ESTUDO *IN SILICO* DE ESTRUTURAS ASFALTÊNICAS UTILIZANDO DINÂMICA

**MOLECULAR E TEORIA DO FUNCIONAL DA DENSIDADE**


Moisés Pereira de Araujo  
Alexandre Araujo de Souza  
Sidney Gonçalo de Lima

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.15822060110>

**CAPÍTULO 11 ..... 146**

**OCORRÊNCIA E DISTRIBUIÇÃO DE HIDROCARBONETOS AROMÁTICOS EM ROCHAS SEDIMENTARES DA FORMAÇÃO CODÓ – CRETÁCEO (BACIA DO PARNAÍBA)**

Edymilaís da Silva Sousa  
Chribstian Dário Silva de Melo  
Sidney Gonçalo de Lima

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.15822060111>

**CAPÍTULO 12..... 161**

**OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS PARA SEPARAÇÃO DE COMPONENTES DE PETRÓLEOS BRASILEIROS POR CROMATOGRAFIA LÍQUIDA UTILIZANDO PLANEJAMENTO FATORIAL**


Georgiana Feitosa da Cruz  
Jhonny Costa Carvalho  
Lívia Carvalho Santos  
Laercio Lopes Martins

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.15822060112>

**CAPÍTULO 13..... 180**

**CONTAMINANTES ORGÂNICOS PERSISTENTES EM SEDIMENTOS DO RIO PARNAÍBA, TERESINA – BRASIL**


Analine Daiany Costa Andrade  
Artur Leal de Carvalho Barros  
Michel Ricardo de Barros Chaves  
Sidney Gonçalo de Lima

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.15822060113>

**CAPÍTULO 14..... 194**

**PRESERVAÇÃO DE GEOPOLÍMEROS NO REGISTRO ESTRATIGRÁFICO E SUAS IMPLICAÇÕES PALEOAMBIENTAIS**

Ailton da Silva Brito

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.15822060114>

**SOBRE O ORGANIZADOR..... 210**

**ÍNDICE REMISSIVO..... 211**

# CAPÍTULO 5

## AVALIAÇÃO DA ORIGEM E EVOLUÇÃO TÉRMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA REGISTRADA EM FÁCIES DA FORMAÇÃO IRATI AFETADAS POR INTRUSÕES ÍGNEAS (REGISTRO PERMIANO DA PORÇÃO NORTE DA BACIA DO PARANÁ), UTILIZANDO-SE BIOMARCADORES

*Data de aceite:* 01/01/2022

*Data de submissão:* 09/10/2021

**René Rodrigues**

Laboratório de Estratigrafia Química e  
Geoquímica Orgânica (LGQM-UERJ)

Rio de Janeiro

Departamento de Paleontologia e Estratigrafia  
da Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
(UERJ)

<http://lattes.cnpq.br/7539756220629540>

**Lucas Pinto Heckert Bastos**

Laboratório de Estratigrafia Química e  
Geoquímica Orgânica (LGQM-UERJ)

Rio de Janeiro

<http://lattes.cnpq.br/6220692500362951>

**Danielle da Costa Cavalcante**

Laboratório de Estratigrafia Química e  
Geoquímica Orgânica (LGQM-UERJ)

Rio de Janeiro

<http://lattes.cnpq.br/7446081252265215>

**Egberto Pereira**

Laboratório de Estratigrafia Química e  
Geoquímica Orgânica (LGQM-UERJ)

Rio de Janeiro

Departamento de Paleontologia e Estratigrafia  
da Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
(UERJ)

<http://lattes.cnpq.br/1043606043814998>

**Celma Jorge de Menezes**

Laboratório de Estratigrafia Química e  
Geoquímica Orgânica (LGQM-UERJ)

Rio de Janeiro

<http://lattes.cnpq.br/3904436265391443>

**Carmen Lucia Ferreira Alferes**

Laboratório de Estratigrafia Química e  
Geoquímica Orgânica (LGQM-UERJ)

Rio de Janeiro

<http://lattes.cnpq.br/2724608046773666>

**Debora Bonfim Neves da Silva**

Laboratório de Estratigrafia Química e  
Geoquímica Orgânica (LGQM-UERJ)

Rio de Janeiro

<http://lattes.cnpq.br/1545259890781031>

**Andressa Oishi**

Petróleo Brasileiro S.A-Petrobras

Rio de Janeiro

<http://lattes.cnpq.br/5726653378719485>

**RESUMO:** Biomarcadores têm ampla aplicação na reconstrução de condições ambientais pretéritas além de serem uma importante ferramenta na análise da evolução térmica da matéria orgânica, principalmente quando associado a outras técnicas da geoquímica orgânica. No presente estudo analisamos a matéria orgânica preservada do Permiano da parte norte da Bacia do Paraná (Goiás), e discutimos as possíveis fontes da matéria orgânica com base em biomarcadores saturados. Adicionalmente, utilizamos dados da fração aromática (fenantreno e metilfenantrenos) para inferir o potencial efeito de rochas ígneas na matéria orgânica e sua implicação para a interpretação dos resultados de pirólise Rock Eval, método de caracterização de rochas geradoras que fornece informações sobre o tipo e a evolução térmica da matéria orgânica. Observou-se que a matéria orgânica

sofreu evolução térmica necessária para a geração de hidrocarbonetos, o que pode afetar a precisão analítica dos resultados de T<sub>máx</sub> obtidos a partir da pirólise pelo método Rock Eval. A análise integrada dos dados geoquímicos, entretanto, demonstra que o efeito térmico observado não pode ser atribuído somente a intrusões ígneas registradas no afloramento, podendo ocorrer também a partir de corpos magmáticos com geometrias mais complexas e não aflorantes, tendo em vista as observações de campo em outras áreas aflorantes da seção permiana na parte norte da Bacia do Paraná.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biomarcadores; Matéria orgânica; Bacia do Paraná; Formação Irati

## EVALUATION OF SOURCE AND THERMAL EVOLUTION OF ORGANIC MATTER RECORDED IN IRATI FORMATION FACIES AFFECTED BY IGNEOUS INTRUSIONS (PERMIAN RECORD OF THE NORTHERN AREA THE PARANÁ BASIN), APPLYING BIOMARKERS

**ABSTRACT:** Biomarkers have wide application in the reconstruction of past environmental conditions, in addition to being an important tool in the analysis of the thermal evolution of organic matter, especially when associated with other techniques of organic geochemistry. In the present study we analyze the preserved organic matter of the Permian from the northern part of the Paraná Basin (Goiás) and discuss the possible sources of organic matter based on saturated biomarkers. Additionally, we used aromatic fraction data (phenanthrene and methylphenanthrenes) to infer the potential effect of igneous rocks on organic matter and its implication for the interpretation of Rock Eval pyrolysis results, a source rock characterization method that provides information on the type and the thermal evolution of organic matter. It was observed that the organic matter underwent thermal evolution necessary for the generation of hydrocarbons, which may affect the analytical precision of the T<sub>max</sub> results obtained from pyrolysis by the Rock Eval method. The integrated analysis of geochemical data, however, demonstrates that the observed thermal effect cannot be attributed only to igneous intrusions recorded in the outcrop, but can also occur from magmatic bodies with more complex geometries and non-outcropping, in view of field observations in other outcropping areas of the Permian section in the northern part of the Paraná Basin

**KEYWORDS:** Biomarkers; Organic matter; Paraná Basin; Irati Formation

## 1 | INTRODUÇÃO

A biosfera, particularmente as comunidades microbiais e seus metabolismos, são sensíveis às mudanças que ocorrem nos habitats marinhos e terrestres. A avaliação de moléculas oriundas de organismos vivos no qual toda (biolipídeos) ou parte (biomarcadores) da estrutura química encontra-se ainda preservada, oferece, além da análise da evolução térmica, uma das mais efetivas ferramentas de análise paleoambiental e paleoclimática dentro da geoquímica orgânica (Peters et al., 2005). Nesse sentido, o termo biomarcadores é, portanto, definido como substâncias orgânicas produzidas por organismos que são insolúveis em água, mas podem, entretanto, ser extraídas com solventes orgânicos como clorofórmio, diclorometano e tolueno (Killops & Killops, 2013).

Os biomarcadores têm ampla aplicação na reconstrução de condições ambientais

pretéritas, podendo ser utilizado para verificar variações na temperatura e salinidade em corpos aquoso; variações redox dentro da bacia sedimentar; mudanças na composição química da água; queimadas terrestres e erosões catastróficas de solo (Luo et al, 2019). Os diferentes organismos pertencentes aos três domínios de vida (Bacteria, Eucaria e Archaea) sintetizam biolipídeos característicos, cujos produtos diagenéticos, catagenéticos e metagenéticos podem ficar preservados nas rochas sedimentares e fornecer informações valiosas sobre suas moléculas precursoras e as condições ambientais em que estas foram formadas (Peters et al., 2005).

No presente estudo analisamos a matéria orgânica preservada na seção permiana da parte norte da Bacia do Paraná (Goiás), e discutimos as possíveis fontes da matéria orgânica com base em biomarcadores saturados. Adicionalmente, utilizamos dados da fração aromática (fenantreno e metilfenantrenos) para inferir o potencial efeito de rochas ígneas na matéria orgânica (Radke et al., 1982) e sua implicação para a interpretação dos resultados de pirólise Rock Eval, método de caracterização de rochas geradoras que fornece informações sobre o tipo e a evolução térmica da matéria orgânica.

## 2 | CONTEXTO GEOLÓGICO

### 2.1 Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná (Figura 01) compreende uma área de aproximadamente 1,5 milhão de km<sup>2</sup> de extensão distribuída na América do Sul, mais especificamente nas porções do Brasil meridional, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai (Milani, 1997). A sua geometria apresenta uma feição ovalada com *trend* principal N-S, sendo o contorno atual definido por limites erosivos resultante dos significativos eventos geotectônicos que afetaram o continente sul-americano a partir do Mesozoico (Milani, 1997).

Milani (1997) agrupou o registro estratigráfico da Bacia do Paraná em seis supersequências que apresentam intervalo temporal de algumas dezenas de milhões de anos de duração individualizados por superfícies de discordância de caráter regional: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). A sedimentação inicial da Supersequência Rio Ivaí da Bacia do Paraná, segundo Fúlfaro et al (1982), teria sido controlada por aulacógenos tardios herdados do Eopaleozoico de direção NW-SE. Tais depressões teriam sido formadas ao final da cratonização da faixa de dobramentos da região sul e sudeste, sendo, portanto, proposta uma subsidência mecânica como mecanismo inicial de formação da bacia.

A proposta de Zalan et al (1990) associa a origem da Bacia do Paraná a um processo de resfriamento litosférico de uma região anormalmente aquecida durante o Ciclo Brasileiro, apesar de os autores não descartarem a possibilidade de um período inicial de estiramento

crustal como mecanismo de subsidência da Baía do Paraná. Entretanto, a hipótese de um grande rifte precursor que explicasse a origem da bacia por evento de estiramento litosférico não parece pertinente para Soares (1991), que sugere um mecanismo de flexura litosférica onde o abatimento precoce de blocos teria condicionado a formação de grábens, acomodando o primeiro ciclo cratônico da bacia (Neo-Ordoviciano).

Para Milani (1997), a origem da bacia do Paraná é associada com a reativação, a partir de eventos colisionais, de zonas de fraqueza do embasamento (arcabouço brasileiro). Nesse sentido, Milani (1997) e Milani & Ramos (1998) defendem um mecanismo de natureza essencialmente mecânica para a subsidência inicial da bacia. O contexto tectônico da margem sul do Gondwana durante o Fanerozoico teria sido marcado por sucessivos eventos colisionais resultantes da interação entre o paleocontinente e a litosfera oceânica do Panthalassa (Milani & de Wit, 2008). Desta forma, a orogenia Oclóyica (Neo-Ordoviciano) teria induzido a subsidência inicial da bacia sob a forma de depocentros transtensivos alongados na direção SW-NE.

## 2.2 Formação Irati e as rochas ígneas cretáceas

O registro estratigráfico da Formação Irati é dividido em dois Membros: Um membro siliciclástico inferior composto essencialmente de folhelhos (Membro Taquaral) e um membro carbonático superior composto essencialmente por rochas ricas em matéria orgânicas intercaladas com calcário (Membro Assistência). Sua idade mais precisa ( $277.26 \pm 0.62$  Ma) foi apresentada recentemente por Bastos et al (2021), obtida através do método U–Pb TIMS. O fóssil endêmico *Mesosaurus* é geralmente encontrado no Membro Assistência e permite a correlação interbacial entre os depósitos do Permiano inferior da Bacia do Paraná e outros remanescentes do mar Irati-Whitehill, onde ocorre o *Mesosaurus* (Figura 01). O fóssil também é observado nas Formações San Miguel. (Bacia do Chaco-Paraná), Whitehill (Main Karoo Basin, Karasburg Basin e Aranos Basin), e Huab (Huab Basin), sendo usado como um marcador para a extensão do mar Irati-Whitehill (Oelofsen, 1981; Oelofsen & Araújo, 1983; Werner, 2006) (Figura 01). Mesmo sem o registro fóssil de mesossaurídeo, a composição isotópica característica e a matéria orgânica rica em hidrogênio associada aos depósitos Irati-Whitehill permitem seu reconhecimento e correlação interbacial, conforme demonstrado pela associação do *Black Rock Member* das Ilhas Malvinas, como um depósito Irati-Whitehill (Faure & Cole, 1999).

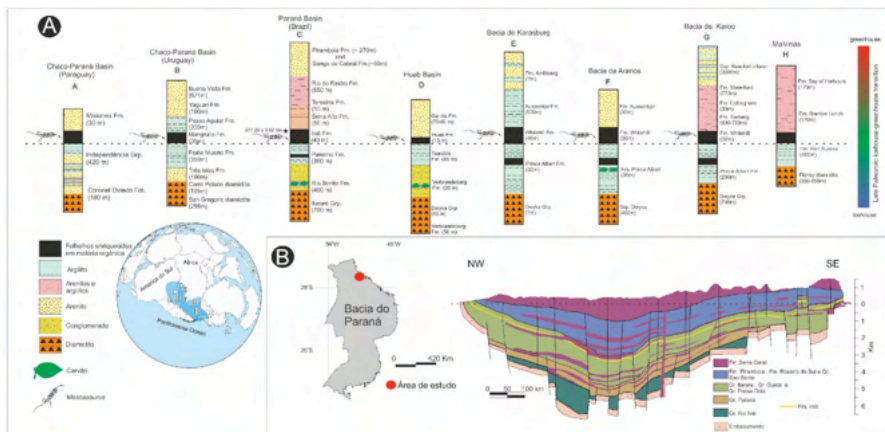


Figura 01- Depósitos do mar Irati-Whitehill e a área estudada (modificado de Bastos et al., 2021). (A) -Colunas litoestratigráficas esquemáticas para os depósitos associados ao mar “Irati-Whitehill” (fácies ricas em matéria orgânica onde ocorre o fóssil *mesossaurus*) e sua posição no globo. A idade da Formação Irati é de Bastos et al (2021). (B)- Mapa da Bacia do Paraná a área estudada e seção transversal litológica clássica da bacia. O Grupo Passa Dois compreende, entre outras unidades, o registro geológico do mar de Irati-Whitehill no Brasil (Formação Irati.).

A origem lacustre, marinha ou um mar interior com conexões marinhas ao oceano Panthalássico, para a deposição das rochas associadas ao conjunto Irati-Whitehill é um ponto de controvérsia na literatura mundial. Essa controvérsia já foi debatida por Oelofsen (1981), Lavina (1991), Faure & Cole (1999) e Araújo (2001). De fato, Faure & Cole (1999) advogam que o corpo aquoso de cerca de 5 milhões de km<sup>2</sup> seria exclusivamente lacustre e sem nenhuma influência marinha. Os autores, entretanto, apesar de apresentarem valiosas contribuições científicas, trabalharam com um número muito limitado de amostras e não levaram em conta trabalhos anteriores, que já apresentavam evidências de fósseis geoquímicos marinhos no registro da Formação Irati. Para essa formação, Summons et al (1992) já haviam reportado a presença dos C<sub>30</sub> esteranos (24-*n*-propilcolestanos), sintetizados por algas marinhas crisófitas, da ordem das *Sarcinochrysidales* (Moldowan et al., 1985, Moldowan et al., 1990). A avaliação em torno da área de extensão do registro sedimentar, e por consequência a área do mar Irati-Whitehill, é um objeto de reflexão tendo em vista que hoje, o maior lago do mundo (*Lake Superior*-Canadá) apresenta área de cerca de 82.000 km<sup>2</sup>, o que é aproximadamente 61 vezes menor, em área, do que o estimado para o mar Irati-Whitehill.

Nesse sentido, os modelos de Oelofsen (1981), Lavina (1991) e Araújo (2001) e Bastos et al (2021), que admitem conexões com o oceano, parecem mais plausíveis para explicar o registro observado. Segundo Lavina (1991), tais conexões seriam a partir da Bacia Central Patagônica, ou ainda pela Bacia de Calingasta-Uspallata e a borda oeste da Bacia de Karoo. Já Araújo (2001) advoga que a conexão através do bordo sudoeste da Bacia de Karoo seria a alternativa mais plausível, pressupondo-se a comunicação por



um braço de mar adentrando através da junção entre a América do Sul e África conforme também advogado por Oelofsen (1981).

Durante o Cretáceo, um grande volume de rochas magmáticas associadas ao magmatismo Serra Geral (província ígnea Paraná-Entendeka) interagiu com as rochas sedimentares da Formação Irati. Os eventos magmáticos e o alto teor de material orgânico preservado da Fm. Irati levam a essa formação ser considerada um sistema petrolífero atípico (Araújo et al., 2000). A interação ígnea-sedimentar pode ser mapeada em sísmica (Costa et al., 2016) ou observada diretamente em pedreiras, por exemplo, na borda Leste (Holanda et al., 2020; Martins et al., 2020) e na parte Norte da Bacia do Paraná, em Goiás (por exemplo Oishi, 2017; Oishi et al., 2019; Mabecua et al., 2020). Nessa região, a observação de feições ígneas complexas (Figura-02) similares as feições tipo dedo (“*fingers*”) já descritas na Bacia de Neuquén (Galland et al., 2019), evidencia que, sob a perspectiva exploratória, o entendimento da geometria dos corpos ígneos é vital para a compreensão dos processos de maturação e geração de hidrocarbonetos.

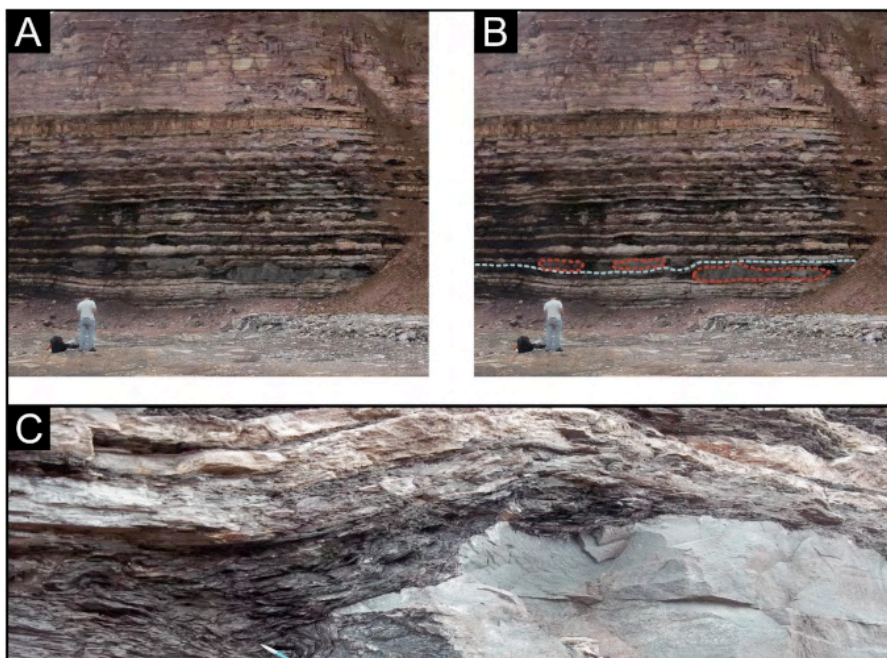


Figura 02-(A e B) Afloramento com rochas ígneas intrudindo nos folhelhos entre as os carbonatos no estado de Goiás, parte norte da Bacia do Paraná (Formação Irati). Ao traçar os contornos das rochas ígneas pode-se perceber que elas não conectam e intrudem em estruturas parecidas a dedos (“*fingers*”), similares ao que já foi mapeado na província de Mendoza, Argentina-Bacia de Neuquén (Galland et al., 2019). Em (C) observa-se em detalhe o contato entre o folhelho e a rocha ígnea. O efeito térmico proveniente da rocha intrusiva pode fornecer calor suficiente para a maturação da matéria orgânica e geração de hidrocarbonetos (Rodrigues, 1995; Miranda et al., 2018).

### 2.3 Seção sedimentar estudada

A seção estudada é composta por folhelhos, arenitos e carbonatos, tendo sido a mesma já abordada por Oishi et al (2019). Visualmente, foi possível observar no campo a ocorrência de uma soleira horizontal de rocha ígnea intrusiva acima da intercalação de folhelhos e carbonatos (Figura 03). Dessa maneira, a coleta sistemática para análises geoquímicas permite abordar a influência térmica sofrida pela possível matéria orgânica preservada.

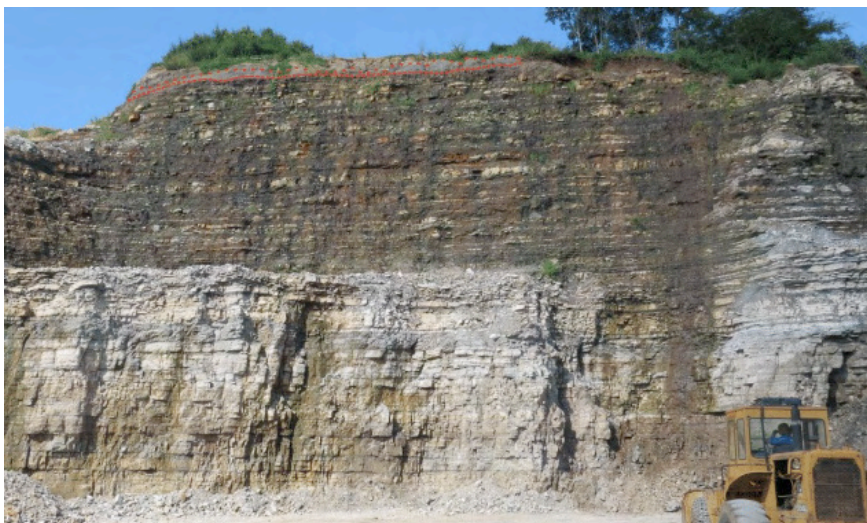


Figura 03- Afloramento da Pedreira Sugal onde foram coletadas as amostras do presente estudo. Observa-se a ocorrência de fácies sedimentares distintas tendo sido a associação de fácies inferior interpretada como depositadas em um ambiente restrito Rampa Interna dominada por maré (Oishi, 2017). Já a associação de fácies superior, formada pela intercalação rítmica das fácies mudstone maciço, folhelho/marga e níveis de floatstone, foi interpretada como Rampa Intermediária Distal/ Externa proximal. No topo da seção (em vermelho) ocorre uma rocha ígnea de aproximadamente 0,50 cm (Oishi, 2017).

No trabalho de Oishi et al (2019) foi apresentado a quantificação dos teores de material orgânico para as amostras da seção, bem como uma avaliação com base nos parâmetros da análise de Pirólise Rock-Eval, da qualidade e evolução térmica da matéria orgânica (Figura 04). Os autores concluíram que a ocorrência de altos valores de  $S_1$  na análise de pirólise Rock-Eval (hidrocarbonetos livres na rocha), possivelmente, reflete a influência de efeito térmico de rocha ígnea, intrudida posteriormente à deposição das camadas Irati.

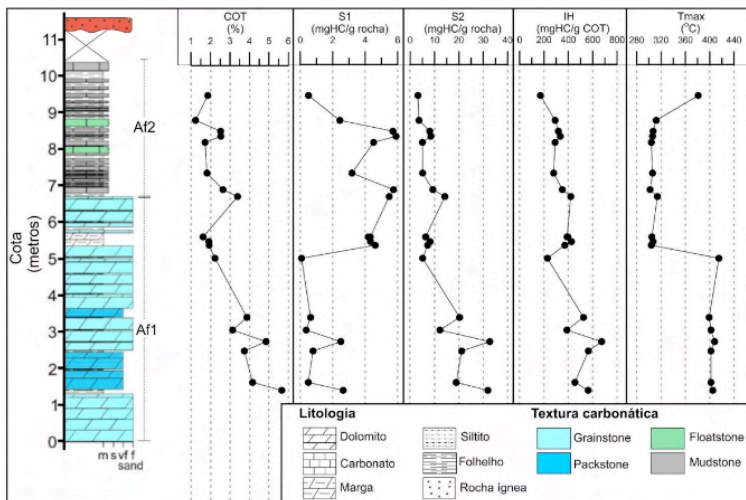


Figura 04-Teores de carbono orgânico total (COT), S1 (hidrocarbonetos livres na rocha), S2 (hidrocarbonetos gerados artificialmente durante a pirólise), índice de hidrogênio (IH) e Tmáx (temperatura medida no topo do pico do S2). Dados de Oishi (2017).

### 3 I MATERIAIS E MÉTODOS

Os resultados apresentados no presente estudo são resultantes de coleta realizada na Pedreira Sucal (Perolândia, Goiás) e análises realizadas no Laboratório de Estratigrafia Química e Geoquímica Orgânica da UERJ. Para a realização das análises de biomarcadores, é necessária a obtenção do extrato orgânico, separação dos compostos saturados e aromáticos por cromatografia líquida para que as amostras sejam, então, injetadas em um cromatógrafo a gás acoplado a um espectrômetro de massas.

#### 3.1 Extrato orgânico

Para a obtenção da fração solúvel da matéria orgânica, foram pulverizadas e peneiradas (80 mesh) cerca de 40 g de amostra que foram acondicionadas em cartuchos de celulose. A extração foi feita utilizando-se um sistema de extração Soxhlet, tendo como solvente o diclorometano. O betume obtido foi concentrado em um evaporador rotativo durante 48 horas. Após a obtenção do extrato orgânico, foi determinada a porcentagem do mesmo em relação à amostra.

#### 3.2 Cromatografia líquida

Os hidrocarbonetos saturados e aromáticos foram separados através da cromatografia líquida utilizando-se uma fase sólida composta por uma mistura de sílica gel/ alumina, que foi previamente ativada por aquecimento a 120°C-150°C durante 12 horas. Utilizou-se a proporção de 1 g de fase sólida para cada 10 mg de extrato orgânico. Os

hidrocarbonetos saturados foram separados por eluição utilizando hexano (3,5mL/g de fase sólida), e os aromáticos foram extraídos por uma mistura 1:1 de hexano e diclorometano (4 mL/g de fase sólida).

### 3.3 Cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG/EM)

Nesta etapa foi utilizado um cromatógrafo a gás (*Agilent Technologies* - modelo 6890) acoplado a um espectrômetro de massas (*Agilent Technologies* MSD-5973). Um volume de 1  $\mu$ L de cada amostra foi injetado e submetido a uma temperatura de 270 °C, sendo utilizado um fluxo de gás hélio a uma pressão de 63,9 psi. Foi utilizado uma coluna capilar HP-5MS da *J&W Scientific*, com as seguintes dimensões: 30 metros de comprimento, 0,25 mm de diâmetro interno e 0,25  $\mu$ m de espessura do filme de fase estacionária. A composição da fase estacionária foi de 5% de difenil e 95% de dimetilpolisiloxano (característica apolar). O forno cromatográfico foi submetido a uma rampa de aquecimento de 6 °C/min entre 70 a 290 °C, e a temperatura final por foi mantida por 20 minutos. A técnica de cromatografia gasosa com acoplamento a um espectrômetro de massas permite que a amostra, ao passar pela coluna cromatográfica e atingir o espectrômetro de massas já fracionada, receba um bombardeamento de elétrons (70 eV) gerando uma fragmentação para cada molécula na fonte de íons. São detectados e registrados os íons produzidos com a relação massa/carga (m/z) no espectro de 50 a 570, sendo os fragmentos de massa detectados em pulsos elétricos que serão expressos através de um cromatograma de massas.

## 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Origem da matéria orgânica e o ambiente deposicional

A amostra analisada apresentou relativa abundância do terpano gamacerano, (razão Gamacerano/C30ab igual a 0,96) (Figura 05). A presença do gamacerano, terpano pentacíclico, foi inicialmente associada a condições ambientais hipersalinas, sendo posteriormente associada como um marcador de estratificação da coluna da água por salinidade ou temperatura (Harvey & Mcmanus, 1991; Sinninghe Damsté et al., 1995). A sua fonte tem sido associada a bactérias ciliadas que habitam a zona óxica-anóxica em colunas d'água estratificada (Sinninghe damsté et al., 1995), que sintetizam o tetrahimanol, triterpeno encontrado em algumas espécies de protozoários (Mallory et al., 1963). Nesse sentido, a sua abundância na amostra analisada sugere condições acentuadas de salinidade e/ou estratificação da coluna d'água.

Dentre os esteranos regulares, foi observado a predominância do C<sub>29</sub>. Apesar de o C<sub>29</sub> esterano ter a sua origem associada predominantemente a vegetais terrestres (Volkman, 1986), sua fonte também pode ser associada a algas verdes (Koodner et al., 2009). É plausível inferir, com base na abundância de outros indicadores de salinidade elevada (gamacerano e litologia), que grupos de algas verdes halotolerantes tenham se

expandido e habitado o paleoambiente Irati, principalmente na parte que possivelmente era mais distante da conexão com o Panthalassa (Bastos et al., 2021). Nota-se que a predominância dessa assembleia de indicadores moleculares é característica de ambientes hipersalinos alcalinos (Xia et al., 2020).

A dinâmica paleoecológica inferida a partir dos fósseis moleculares sugere que o ambiente era restrito, com alta salinidade e, possivelmente, alcalino. Nesse sentido, aliado a bioprodução acelerada, eventos de estratificação da coluna d'água por diferença de salinidade (abundância do terpano e gamacerano) permitiram a boa preservação da matéria orgânica com teores de COT e IH que alcançaram, na seção inferior, teores de até 6% e 673 mgHC/gCOT (cota de 1,50 m), respectivamente (Oishi, 2017).

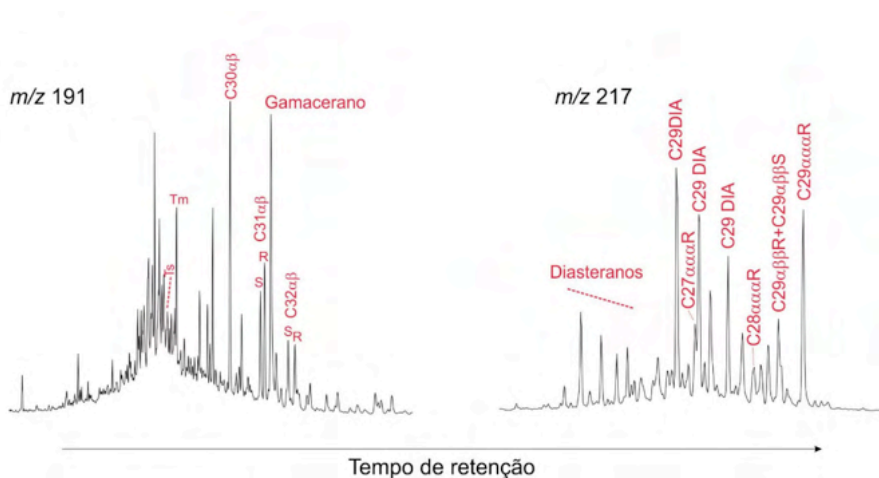


Figura 05- Fragmentogramas m/z 191 (terpanos) e m/z 217 (esteranos e diasteranos) para a amostra de cota igual a 5,50 m. Nos terpanos, observar a alta proporção do gamacerano e a isomerização no C22 nos homohopanos. No m/z 217, observar a predominância dos diasteranos (C<sub>29</sub>DIA) sobre os esteranos.

## 4.2 Evolução térmica da matéria orgânica

A evolução térmica da matéria orgânica pode ser avaliada através da análise da proporção relativa entre isômeros, que refletem o grau de transformações de moléculas biológicas em geológicas. Em ambientes com salinidade elevada, entretanto, a isomerização também pode acontecer devido a processos diagenéticos incomuns e, nesse sentido, é necessário cautela ao realizar a avaliação da evolução térmica da matéria orgânica (Moldowan et al., 1985; ten Haven et al., 1988).

Na amostra analisada é possível notar que os homohopanos (e.g C<sub>31</sub>ab e e o C<sub>32</sub>ab) apresentam certo grau de isomerização no carbono 22 (conversão do C<sub>22</sub>R, molécula “biológica” em C<sub>22</sub>S, molécula “geológica”). Adicionalmente, ao observarmos o perfil dos esteranos podemos verificar a predominância do C<sub>29</sub> diasterano (Figura 05). De maneira

geral, diasteranos são característicos de rochas que apresentam alguma evolução térmica tendo em vista que estes podem ser resultantes da reorganização da molécula do esterano durante a diagênese (Mackenzie et al., 1980). Entretanto, diasteranos também são sensíveis a variações de fácies orgânicas.

O índice dos metilfenantrenos (MPI-1) calculado através dos compostos obtidos na fração aromática do extrato orgânico também permite uma avaliação do efeito térmico sofrido pela matéria orgânica e geralmente apresenta boa correlação com o dado de vitrinita na janela de geração (0.65–1.35% VR) (Radke et al, 1982). O índice é calculado através da fórmula

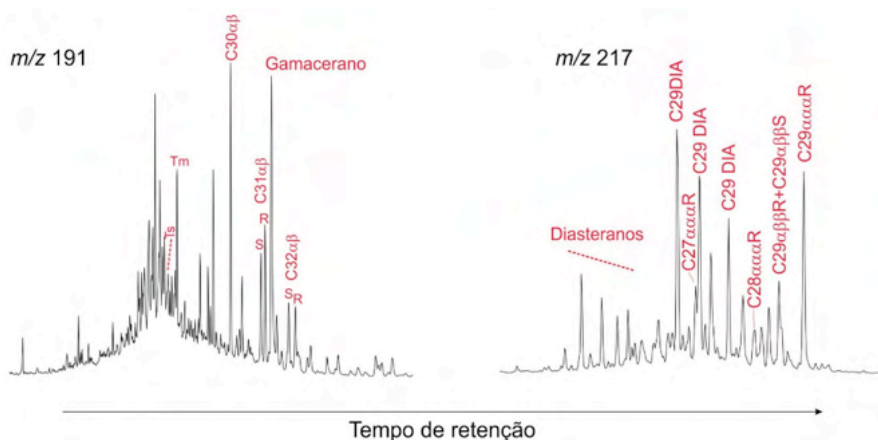


Figura 05- Fragmentogramas m/z 191 (terpanos) e m/z 217 (esteranos e diasteranos) para a amostra de cota igual a 5,50 m. Nos terpanos, observar a alta proporção do gamacerano e a isomerização no C22 nos homohopanos. No m/z 217, observar a predominância dos diasteranos (C29DIA) sobre os esteranos.

### 4.3 Evolução térmica da matéria orgânica

A evolução térmica da matéria orgânica pode ser avaliada através da análise da proporção relativa entre isômeros, que refletem o grau de transformações de moléculas biológicas em geológicas. Em ambientes com salinidade elevada, entretanto, a isomerização também pode acontecer devido a processos diagenéticos incomuns e, nesse sentido, é necessário cautela ao realizar a avaliação da evolução térmica da matéria orgânica (Moldowan et al., 1985; ten Haven et al., 1988).

Na amostra analisada é possível notar que os homohopanos (e.g C31αβ e e o C32αβ) apresentam certo grau de isomerização no carbono 22 (conversão do C22 R, molécula “biológica” em C22S, molécula “geológica”). Adicionalmente, ao observarmos o perfil dos esteranos podemos verificar a predominância do C29 diasterano (Figura 05). De maneira geral, diasteranos são característicos de rochas que apresentam alguma evolução térmica tendo em vista que estes podem ser resultantes da reorganização da molécula do

esterano durante a diagênese (Mackenzie et al., 1980). Entretanto, diasteranos também são sensíveis a variações de fácies orgânicas.

O índice dos metilfenantrenos (MPI-1) calculado através dos compostos obtidos na fração aromática do extrato orgânico também permite uma avaliação do efeito térmico sofrido pela matéria orgânica e geralmente apresenta boa correlação com o dado de vitrinita na janela de geração (0.65–1.35% VR) (Radke et al, 1982). O índice é calculado através da fórmula

$$\text{MPI-1} = 1.5 \times \frac{(2\text{-MP}) + (3\text{-MP})}{(F) + (1\text{-MP}) + (9\text{-MP})}$$

Onde: F= Fenantreno

2-MP= 2-Metilfenantreno

3-MP= 3-Metilfenantreno

1-MP= 1-Metilfenantreno

9-MP=9-Metilfenantreno

A amostra analisada (Figura 06) apresentou valor de MP-1 igual a 1,01 e, ao gerarmos a reflectância da vitrinita calculada através da fórmula proposta por Radke et al (1982) (0.60 MPI-1 + 0.40), obtemos o valor de 1,00. Tal valor indica que, possivelmente, a amostra analisada sofreu efeito térmico suficiente para gerar hidrocarbonetos. O valor encontrado é coerente com o range do índice de coloração de esporos apresentado por Souza et al (2005) para as mesmas fácies na mesma seção estudada na Pedreira Sucal (valores entre 7 e 8).

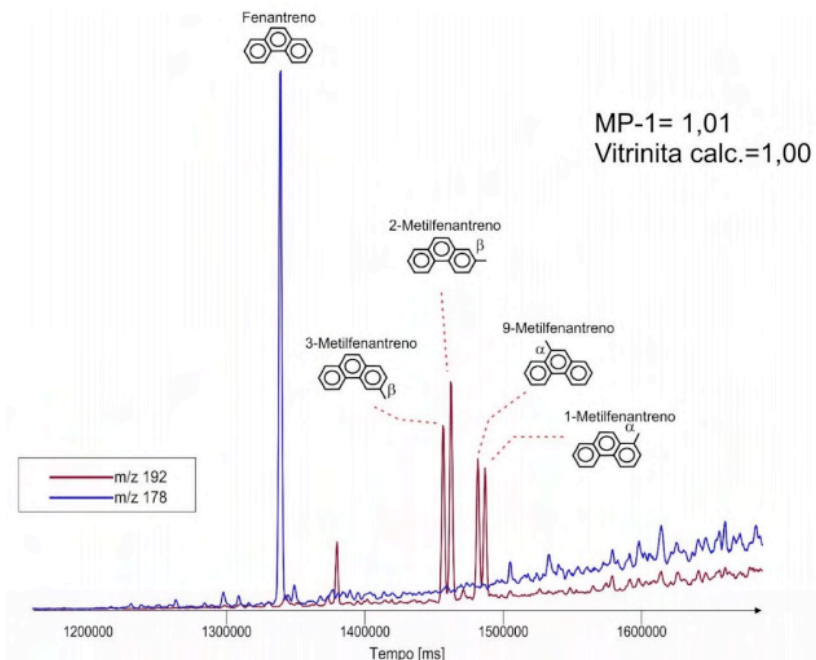


Figura 06-Fra gmentogramas m/z 178 e m/z 192 da fração aromática da amostra de cota igual a 5,50m. Observa-se a presença dos compostos Fenantraneno, 3-Metilfenantreno, 2-Metilfenantreno, 9-Metilfenantreno e 1-Metilfenantreno. Tais compostos podem ser utilizados para estimar o grau de efeito térmico sofrido o pela matéria orgânica.

De fato, essa amostra encontra-se inserida em um intervalo de altos valores de  $S_1$  (hidrocarbonetos livres na rocha) e valores anormalmente baixos de  $T_{\text{máx}}$ . Os valores de  $T_{\text{máx}}$  anormalmente baixos, entretanto, não refletem um resultado analítico preciso, podendo estar ligado, de maneira geral, a duas situações. A primeira seria a de baixíssimos valores de  $S_2$  (em geral menores que 0,2 mgHC/g rocha) que gerariam um pico baixo e deformado, afetando a medição do  $T_{\text{máx}}$ . Entretanto, como observado no perfil, os valores de  $S_2$  para as amostras do intervalo com baixo  $T_{\text{máx}}$  são sempre superiores a 5.

A segunda possibilidade seria a presença de hidrocarbonetos livres mais pesados (resinas e asfaltenos) que não se vaporizaram em temperaturas inferiores a 300 °C e sim em temperaturas do intervalo do  $S_2$  (hidrocarbonetos não livres na rocha). Com isso, como observado no pirograma da amostra analisada (Figura 07), gera-se um pico bimodal no qual o equipamento identifica a primeira inflexão como sendo o pico  $S_2$ , gerando um  $T_{\text{máx}}$  temperatura no topo do pico  $S_2$ , impreciso. A identificação de hidrocarbonetos em lâminas petrográficas para amostras da Pedreira Sucal corrobora essa interpretação (Souza et al., 2005).



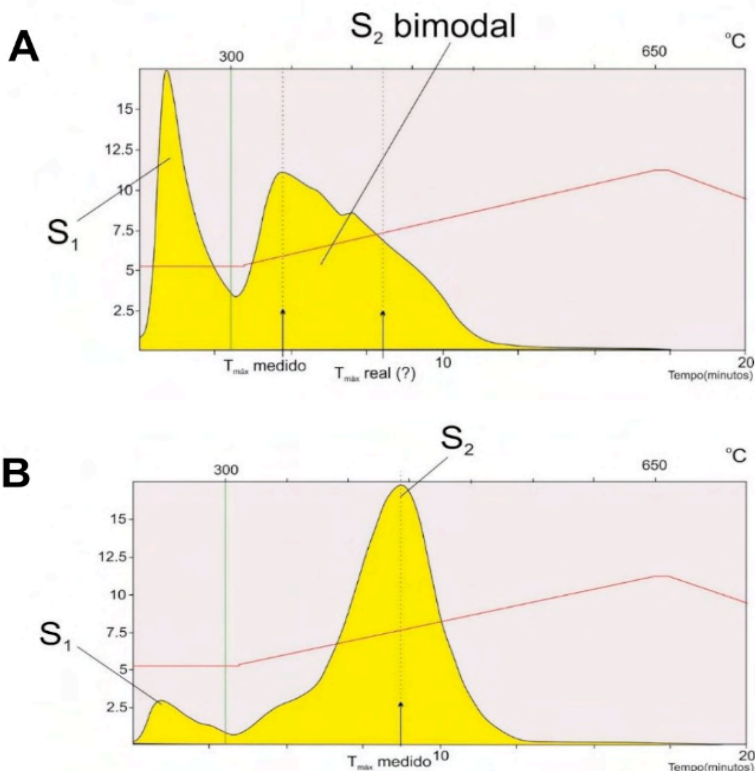


Figura 07-(A) Pirograma da amostra de cota 5,50 e (B) pirograma da amostra de cota 1,50 m. Notar que o “ombro” a esquerda do pico S<sub>2</sub> reflete, possivelmente, hidrocarbonetos livres mais pesados (resinas e asfaltenos) que não se vaporizaram em temperaturas inferiores a 300 °C.

Pode-se observar também que o maior valor de S<sub>1</sub> sugere a presença de hidrocarbonetos livres que podem estar associada ao efeito térmico de rochas ígneas intrusivas, tendo em vista as observações de campo no local. No entanto, pode ser que a intrusão ígnea não esteja completamente exposta, semelhante ao que se observa em um modelo de intrusão do tipo em dedo (“finger”) (Galland et al, 2019). Esse modelo poderia justificar os maiores valores de S<sub>1</sub> e de T<sub>máx</sub> anômalo observado na porção intermediária da seção estudada.

Com base nas observações de campo em toda área norte da Bacia do Paraná (Figura 08) é plausível pensar em um modelo de geometria da intrusão na forma de dedos (“finger”) não aparente na frente de lavra. Esse modelo foi relatado para corpos ígneos da Bacia de Neuquén na Argentina e permitiria um efeito térmico mais direcionado (Galland et al., 2019). Análises futuras em um maior número de amostras da seção e também análises complementares de reflectância de vitrinite poderiam confirmar e refinar o modelo de interação entre as rochas ígneas e sedimentar. É necessário também que trabalhos futuros considerem a complexidade dos corpos ígneos que interagem com os estratos

sedimentares e como estas reagem ao fluxo de calor sofrido.

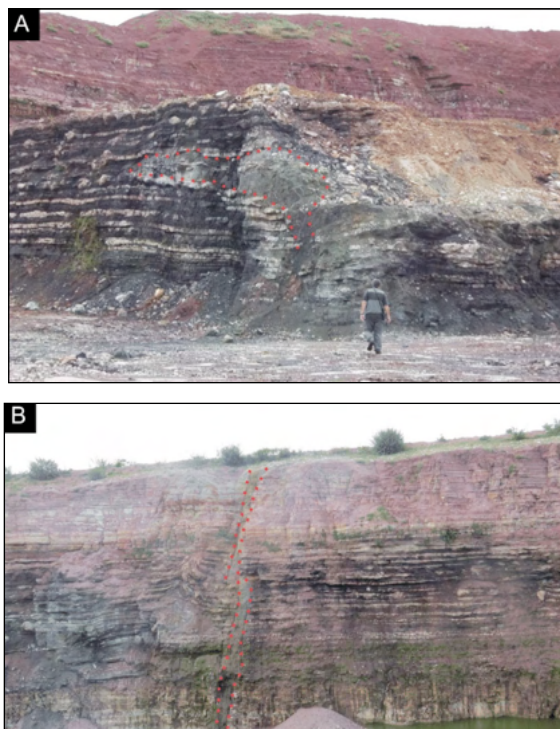


Figura 08 (A) e (B)- Feições ígneas observadas na parte norte da Bacia do Paraná (Pedreira Elba Calcário-Montividiu, Goiás). Os diferentes corpos ígneos observados em toda região norte da Bacia do Paraná reforçam a necessidade de uma melhor compreensão da complexidade desses sistemas e de como as camadas sedimentares reagem ao fluxo de calor sofrido.

## 5 | CONCLUSÕES

A análise de biomarcadores de material orgânico preservado da Formação Irati na parte norte da Bacia do Paraná permite inferir que o ambiente de deposição era restrito, com alta salinidade e, possivelmente, alcalino. Em termos de evolução térmica, a amostra apresentou valor de MP-1 igual a 1,01 e, ao gerarmos a reflectância da vitrinite obtivemos o valor de 1,00%. Tal valor é coerente com trabalhos anteriores de petrografia orgânica realizados no mesmo local e sugerem que pode ter havido a geração de hidrocarbonetos. É possível que frações mais pesadas de hidrocarbonetos presentes na amostra tenham afetado o resultado analítico da pirólise (como observado nos pirogramas), gerando valores de  $T_{max}$  imprecisos. Os diferentes corpos ígneos observados em toda região norte da Bacia do Paraná reforçam a necessidade de se considerar a complexidade desses sistemas e como as camadas sedimentares são afetadas pelo ao fluxo de calor sofrido.

## REFERÊNCIAS

- Araújo, L. M., Triguís, J. A., Cerqueira, J. R., & Freitas, L. D. S. (2000). AAPG Memoir 73, Chapter 26: The Atypical Permian Petroleum System of the Parana Basin, Brazil.
- Araújo, L.M., (2001). Análise da expressão estratigráfica dos parâmetros de geoquímica orgânica e inorgânica nas sequências Irati. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Bastos, L.P.H., Rodrigues, R., Pereira, E., Bergamaschi, S., Alferes, C.L.F., Augland, L.E., Domeier, M., Planke, S., Svensen, H.H., (2021). The birth and demise of the vast epicontinental Permian Irati-Whitehill sea: Evidence from organic geochemistry, geochronology, and paleogeography. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 562, p.13, 110103.
- Costa, D. F. B. D., Santos, W. H. D., Bergamaschi, S., & Pereira, E. (2016). Analysis of the geometry of diabase sills of the Serra Geral magmatism, by 2D seismic interpretation, in Guareí region, São Paulo, Paraná basin, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 46, 605-615.
- Faure, K., Cole, D., (1999). Geochemical evidence for lacustrine microbial blooms in the vast Permian Main Karoo, Parana, Falkland Islands and Huab ba-sins of southwestern Gondwana. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 152, 189–213.
- Fúlvaro, V. J., Saad, A. R., Santos, M. D., & Vianna, R. B. (1982). Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná *Revista Brasileira de Geociências*, 12(4), 590-611.
- Galland, O., Spacapan, J.B., Rabbel, O., Mair, K., Soto, F.G., Eiken, T., Schiuma, M., Leanza, H.A., (2019). Structure, emplacement mechanism and magma-flow significance of igneous fingers – implications for sill emplacement in sedimentary basins. *J. Struct. Geol.*
- Rocha, H. D. V. (2021). CO<sub>2</sub> geological storage in organic-rich shales of the Irati Formation, Paraná Basin, Brazil (Tese- Universidade de São Paulo).
- Harvey, H. R., & Mcmanus, G. B. (1991). Marine ciliates as a widespread source of tetrahymanol and hopan-3 $\beta$ -ol in sediments *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(11), 3387-3390.
- Holanda, W., dos Santos, A. C., Nogueira, C. C., Bergamaschi, S., Rodrigues, R., Jones, C., Costa, D. F., Bastos, L. P.H., Bertolino, L. C. (2020). Effects of Igneous Intrusion on the Organic Content of Irati Formation, Paraná Basin, in Sapopema (PR). *Anuário do Instituto de Geociências*, 43(4), 293-301.
- Killops, S. D., & Killops, V. J. (2013). Introduction to organic geochemistry. John Wiley & Sons.
- Kodner, R.B., Pearson, A., Summons, R.E., Knoll, A.H., (2008). Sterols in red and green algae: Quantification, phylogeny, and relevance for the interpretation of geologic steranes. *Geobiology* 6, 411–420.
- Lavina, E., (1991). Geologia sedimentar e paleogeografia do Neopermiano e Eotriássico (intervalo Kazaniano–Scythiano) da Bacia do Paraná. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Luo, G., Yang, H., Algeo, T. J., Hallmann, C., & Xie, S. (2019). Lipid biomarkers for the reconstruction of deep-time environmental conditions *Earth-Science Reviews*, 189, 99-124.
- Mabecua, F. J., Tassinari, C. G., Pereira, E., (2020) avaliação do potencial de geração de gás e óleo não convencional dos folhelhos negros da Formação Irati na região de Goiás e Mato Grosso, centro-oeste do Brasil. *Revista Brasileira de Energia I* Vol. 25, Nº 2.
- Mackenzie, A. S., Patience, R. L., Maxwell, J. R., Vandenbroucke, M., & Durand, B. (1980). Molecular parameters of maturation in the Toarcian shales, Paris Basin, France—I. Changes in the configurations of acyclic isoprenoid alkanes, steranes and triterpanes *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(11), 1709-1721.

- Mallory, F. B., Gordon, J. T., & Conner, R. L. (1963). The isolation of a pentacyclic triterpenoid alcohol from a protozoan. *Journal of the American Chemical Society*, 85(9), 1362-1363.
- Martins, C. M. S., Cerqueira, J. R., Ribeiro, H. J. P., Garcia, K. S., da Silva, N. N., & Queiroz, A. F. D. S. (2020). Evaluation of thermal effects of intrusive rocks on the kerogen present in the black shales of Irati Formation (Permian), Paraná Basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 100, 102559.
- Milani, E. J., & Ramos, V. A. (1998). Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná *Revista Brasileira de Geociências*, 28(4), 473-484.
- Milani, E.J., (1997). Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozoica do Gondwana sul-ocidental. 1997 2v. Tese (Doutorado)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- Milani, E.J., De Wit, M.J., (2008). Correlations between the classic Parana´ and Cape-Karoo sequences of South America and southern Africa and their basin infills flanking the Gondwanides: du Toit revisited, in: Pankhurst, R.J., Trouw, R.A.J., B.B., B.N., De Wit, M.J. (Eds.), *West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region*. The Geological Society of London, London, pp. 319–342.
- Moldowan J. M., et al (1990) Sedimentary 24-n-propylcholestanes, molecular fossils diagnostic of marine algae. *Science* 247, 309–312.
- Moldowan, J.M., SEIFERT, W.K., GALLEGOS, E.J., (1985). Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks. *Am. Pet. Geol. Bull.* 69, 1255–1268.
- Oelofsen, B. W., (1981). An anatomical and systematical study of the family Mesosauridae (Reptilia; Proganosauria) with special reference to its associated fauna and palaeoecological environment in the Whitehill Sea. University of Stellenbosch.
- Oelofsen, B.W., ARAUJO, D.C., (1983). Paleocological implications of the distribution of mesosaurid reptiles in the permian irati sea (Paraná Basin), South America. *Rev. Bras. Geociências* 13, 1–6.
- Oishi, A. A., Pereira, E., Bastos, L. P. H., & Fragoso, D. G. C. (2019). facies analysis applied to Irati Formation in the northern area of the Paraná Basin, Goiás state—A contribution for a depositional model *Journal of Sedimentary Environments*, 4(1), 72-89.
- Oishi, A.A., (2017). Análise estratigráfica de alta resolução aplicada à Formação Irati, Permiano da Bacia do Paraná, no estado de Goiás. Dissertação Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 91 p.
- Peters, K. E., Walters, C. C. & Moldowan, J. M., (2005) *The Biomarker Guide*. 2, (Cambridge).
- Radke, M., Welte, D. H., & Willsch, H. (1982). Geochemical study on a well in the Western Canada Basin: relation of the aromatic distribution pattern to maturity of organic matter. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(1), 1-10.
- Sinninghe Damsté, J.S., et al (1995). Evidence for gammacerane as an indicator of water column stratification. *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 1895–1900.
- Soares, P. C. (1991). Tectônica sinsedimentar cíclica na Bacia do Paraná: con-troles (Tese de doutorado), Universidade Federal do Paraná. Departamento de Geologia.)
- Souza, I.V.A.F, Mendonça Filho J.G., Menezes T.R. (2005). Avaliação da influência térmica das intrusivas ígneas no principal horizonte potencialmente gerador da Bacia Do Paraná: Formação Irati. In: *Third Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás*, Salvador.

Summons, R.E., et al (1992). Secular and environmental constraints on the occurrence of dinosterane in sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta* 56, 2437–2444. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90200-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90200-3).

Ten Haven, H.L., et al. (1988). Application of biological markers in the recognition of palaeohypersaline environments, in: Fleet, A.J., Kelts, K., R, T.M. (Eds.), *Lacustrine Petroleum Source Rocks*. Geological Society of London, pp. 123–130.

Volkman, J.K., (1986). A review of sterol markers for marine and terrigenous organic matter. *Org. Geochem.* 9, 83–99.

Werner, M., (2006). The stratigraphy, sedimentology, and age of the Late Palaeozoic Mesosaurus Inland Sea, SW-Gondwana: new implications from studies on sediments and altered pyroclastic layers of the Dwyka and Ecca Group (lower Karoo Supergroup) in southern Namibia. Tese. Geol. Inst. University of Würzburg.

Xia, L., Cao, J., Hu, W., Zhi, D., Tang, Y., Li, E., He, W. (2020). Coupling of paleoenvironment and biogeochemistry of deep-time alkaline lakes: A lipid biomarker perspective. *Earth-Science Reviews*, 103499.

Zalán, P.V., Wolff, S., Conceição, J.C.J., Marques, A., Astolfi, M.A.M., Vieira, I.S., Appi, V.T. & Zanotto, O.A. (1990). Bacia do Paraná. Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. PETROBRÁS/SEREC/CEN-SUD, Rio de Janeiro, p. 135-168.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Acidez total 93, 95, 96, 97, 100

Ácidos naftênicos 93, 94, 95, 96, 107, 116

Alquildibenzotiofenos 145, 150

Alquilfenantrenos 145, 148, 149, 150

Análise SARA 161, 166

Asfalteno 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 140, 141, 163, 166, 168

### B

Bacia de São Luís 1, 2, 6, 11, 12

Bacia do Paraná 4, 5, 14, 15, 16, 17, 18, 23, 24, 25, 26, 42, 46, 47, 48, 56, 57, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 72, 73, 74, 75, 122, 123, 125, 130, 198, 199

Biodegradação 3, 7, 15, 93, 94, 96, 97, 99, 101, 103, 104, 107, 108, 112, 113, 115, 119, 133, 142, 150, 152, 162, 164, 167, 168, 169, 177, 183, 204, 206, 209

Biomarcadores 2, 3, 4, 5, 1, 2, 3, 14, 15, 16, 19, 21, 23, 28, 38, 49, 59, 60, 61, 66, 73, 76, 77, 79, 80, 87, 88, 89, 95, 108, 111, 115, 118, 122, 126, 127, 132, 133, 134, 135, 137, 139, 141, 142, 143, 144, 146, 148, 152, 159, 160, 162, 193, 197, 199, 200, 201, 203, 204, 206, 209

Biomarcadores aromáticos 159

Biomarcadores saturados 28, 49, 59, 61, 76

### C

Camadas batateiras 27, 28, 29, 30, 38

Carotenoides aromáticos 4, 27, 28, 38, 39, 145, 153, 155

Contaminação ambiental 179

Cretáceo 6, 1, 6, 12, 40, 64, 117, 120, 122, 145, 195

Cromatografia líquida 6, 48, 66, 80, 160, 161, 162, 163, 166, 171

### D

DFT 132, 135, 136, 142

Dibenzotiofenos 111, 145, 150, 151

### E

Extração em fase sólida 5, 93, 96, 98

### F

Folhelho rico em carbono orgânico 193

Folhelhos betuminosos 17, 36, 40, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 51, 52, 53, 54, 55, 123, 198  
Formação codó 6, 1, 2, 3, 6, 11, 12, 40, 145, 146, 147, 149, 152, 153, 154, 155, 156  
Formação Irati 4, 14, 15, 17, 18, 24, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 51, 52, 53, 54, 55, 59, 60, 62, 63, 64, 73, 74, 75, 122, 123, 124, 125, 126, 128, 129, 130, 131, 198, 199  
Formação serra alta 4, 14, 15, 17, 18, 20, 21, 22, 26, 124

## **G**

Geocromatografia 110  
Geoquímica orgânica 3, 1, 14, 20, 27, 39, 42, 55, 59, 60, 66, 74, 76, 79, 122, 126, 130, 148, 160, 179, 189, 200, 203, 209

## **H**

Hidrocarbonetos alifáticos 81, 132, 134, 179, 180, 181, 182, 186, 188  
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos 179, 180, 181, 187  
Hopenos 27, 38

## **I**

Interpretações paleoambientais 193, 199, 200

## **M**

Matéria orgânica 3, 4, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 10, 11, 14, 15, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 46, 47, 48, 59, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 77, 79, 80, 81, 84, 85, 87, 88, 104, 110, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 122, 124, 126, 128, 129, 130, 133, 134, 145, 146, 147, 148, 150, 162, 164, 180, 182, 183, 184, 185, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 206  
Migração secundária 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 119  
MTTC 42, 43, 44, 45, 49, 50, 51, 53

## **P**

Paleoambiente deposicional 14, 23, 27, 28, 36, 42, 43, 45, 46, 52, 53, 55, 104, 145, 147, 150, 151, 155, 209  
Paleosalinidade 42, 43, 45, 46, 50, 51, 52, 55  
Permiano inferior 17, 24, 47, 62, 122  
Petróleo 3, 5, 12, 15, 16, 18, 23, 26, 41, 42, 43, 55, 56, 59, 75, 93, 94, 95, 96, 98, 99, 100, 101, 104, 107, 109, 110, 111, 112, 120, 125, 130, 132, 133, 142, 143, 144, 147, 151, 154, 157, 160, 161, 162, 163, 165, 168, 176, 177, 184, 188, 194, 195, 196, 198, 199, 200, 203, 204, 205, 209  
Planejamento fatorial 6, 160, 161, 163, 166, 167, 169, 170, 171, 172, 173, 175, 178

## **Q**

Química computacional 132

## **R**

Rio Parnaíba 6, 179, 180, 181, 184, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192

Rochas geradoras 13, 22, 28, 46, 57, 59, 61, 122, 147, 150, 151, 193, 195, 199, 200, 202, 203, 204, 209

## **S**


SMFI 110, 111, 113, 114, 115




Fósseis Moleculares e Aplicações em

# GEOQUÍMICA ORGÂNICA

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br) 

[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br) 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 


[www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br) 


 **Atena**  
Editora


Ano 2021

Fósseis Moleculares e Aplicações em  
**GEOQUÍMICA  
ORGÂNICA**

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br) 

[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br) 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

[www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br) 

 **Atena**  
Editora

Ano 2021