

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**

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

Data de aceite: 01/01/2022

Data de submissão: 14/10/2021

### Ailton da Silva Brito

Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará (PPGG-UFPA), Belém-Pá  
<http://lattes.cnpq.br/9873489431846769>

### Lorena Tuane Gomes de Almeida

Programa de Pós-Graduação em Química-PPGQ, Centro de Ciências da Natureza-CCN, Universidade Federal do Piauí-UFPI  
Teresina – Piauí  
<http://lattes.cnpq.br/7505926250231164>

### Sidney Gonçalo de Lima

Programa de Pós-Graduação em Química-PPGQ, Laboratório de Geoquímica Orgânica-LAGO, Centro de Ciências da Natureza-CCN, Universidade Federal do Piauí-UFPI.  
Teresina – Piauí  
<http://lattes.cnpq.br/1655930426274093>

**RESUMO:** A Bacia do Paraná registra no Permiano Inferior dois relativamente pouco espessos intervalos contudo, amplamente distribuídos de *oil shale*. Ambos se estendem do Rio Grande do Sul ao Paraná, tornando-se delgados e ritmicamente intercalado a camadas carbonáticas em direção a São Paulo, Goiás e Mato Grosso. Litoestratigraficamente compõem o Membro Assistência da Formação Irati. Os intervalos possuem teores de carbono orgânico que ultrapassam os 25%. São predominantemente

imatuross, com temperatura máxima de pirólise de 430 °C, a exceção dos níveis afetados pelas intrusões de diabásio relacionadas ao magmatismo Cretáceo. Ambos os intervalos apresentam querogênio tipo I e II, qualidade que os torna excelente para a geração de hidrocarboneto, assim como possuem alto potencial gerador indicado pelo parâmetro S2 de pirólise Rock-Eval, chegando a 180 mgHC/g rocha. Lateralmente, ao longo dos três estados do Sul do país, há variações na estratificação da coluna d'água, indicado por gamacerano, e na contribuição de matéria orgânica continental indicado pela presença de *Botryococcus*.

**PALAVRAS-CHAVE:** Formação Irati, Permiano Inferior, biomarcadores, geoquímica orgânica, rochas geradoras.

### SPATIAL DISTRIBUTION OF THE PERMIAN OIL SHALE INTERVALS OF THE PARANÁ BASIN

**ABSTRACT:** The Paraná Basin records in the Lower Permian two relatively thin, but widely distributed intervals of oil shale. Both extend from Rio Grande do Sul to Paraná state, becoming thin and rhythmically intercalated with carbonate layers towards São Paulo, Goiás, and Mato Grosso states. Lithostratigraphically comprise the Assistance Member of the Irati Formation. The intervals have organic carbon content that exceeds 25%. They are predominantly immature, with a maximum pyrolysis temperature of 430 °C, except for levels affected by diabase intrusions related to Cretaceous magmatism. Both intervals have kerogen type I and II, a quality that makes

them excellent for hydrocarbon generation, as well as having high source rock potential indicated by the Rock-Eval pyrolysis S2 parameter, reaching 180 mgHC/g rock. Laterally, across the three southern states of Brazil, there are variations in the water column stratification, indicated by gammacerane, and in the continental input of organic matter suggested by Botryococcus occurrences.

**KEYWORDS:** Irati Formation, Lower Permian, biomarkers, organic geochemistry, source rocks.

## 1 | INTRODUÇÃO

A Formação Irati é uma sucessão mista siliciclástica-carbonática permiana da Bacia do Paraná. Uma unidade amplamente estudada devido a ocorrências de dois intervalos com alto teor de carbono orgânico (ultrapasando 25%) e presença dos fósseis de Mesosauros utilizados na correlação continental por Alfred L. Wegener para identificação do supercontinente Pangeia.

O Potencial econômico dos folhelhos Irati já vem sendo abordado desde os primeiros trabalhos sobre essa formação. Amaral (1967), Pádula (1968) e Mezzalira (1971) mostram que F. P. Oliveira (1889) já havia descrito os “schistos betuminosos” e Auguste Collen (1897) apresentou o primeiro estudo sobre os hidrocarbonetos da formação no estado de São Paulo, já I. C. White (1908) estudou a composição química da fração betuminosa ainda no início do século XX. O alto potencial dessa formação associado a necessidade energética no final do século passado levou a Petrobrás implantar a primeira unidade para exploração do *Oil Shale* da Formação Irati em 1972 no Município de São Mateus do Sul (PR). Desde 1991 a exploração desses folhelhos é executada utilizando uma tecnologia de patente nacional de alto rendimento denominada Petrosix®.

Os folhelhos betuminosos do Membro Assistência da Formação Irati representam um importante depósito de *Oil and Gas shale* amplamente distribuídos nos estados da porção sul do Brasil. Novas frentes de pesquisa vêm sendo implantadas por empresas privadas nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio grande do Sul, onde encontram-se os maiores valores de COT. Dessa forma, a grande quantidade de material disponibilizada dessa unidade permite a ampliação do conhecimento acerca da variação lateral do amplo sistema deposicional Irati.

## 2 | FORMAÇÃO IRATI: UMA DA SUCESSÃO MISTA CARBONÁTICA-SILICICLÁSTICA

A Formação Irati (figura 01) representa um caso especial na sedimentação, predominantemente siliciclástica das bacias intracratônicas brasileiras. Compreende uma sucessão sedimentar mista siliciclástica-carbonática com cerca de 50 metros de espessura, contudo, a unidade é amplamente distribuída na Bacia. Abrange sete estados das regiões

Centro-oeste, Sudeste e Sul do país (Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul), ainda apresenta correlação com a Bacia Chaco-Paraná, no continente Sul-Americano, e na África do Sul com a Formação Whitehill das bacias Huab e Karoo (BRANCH *et al.*, 2007; ARAÚJO, 2001). A pequena espessura, associada aos folhelhos negros característicos, com ampla distribuição na Bacia tornou a Formação Irati um estrato de referência bem conhecido para o Permiano (XAVIER *et al.*, 2018).

No estado de São Paulo a formação apresenta uma sequência de folhelhos negros intercalados por calcários de 20 a 30 m, aumentando para 40 a 50 m em direção ao centro da bacia, chegando a 70 m no depocentro (AMARAL, 1967). Segundo esse mesmo autor, as camadas mergulham  $1^{\circ}20'$  NW para o interior da bacia com direção N35°E. No estado do Paraná as camadas estão dispostas com direção NW e mergulho  $<1^{\circ}$  para SW, constituída por calcários na base e folhelhos negros intercalados por lentes de 5 a 20 cm de calcários perfazendo um empilhamento de 12 a 20 m. No estado de Santa Catarina as camadas apresentam direção N10°E e mergulho  $<1^{\circ}$  W, a formação inicia com pacote de calcários com 30 m. Putzer (1955) apud Amaral (1967) observou uma variação brusca no estado de Santa Catarina, onde ocorre um adelgaçamento de norte a sul, passando de 70 para 32 metros em menos de 40 km. No Rio Grande do Sul as camadas estão dispostas com direção NW e mergulho para Norte. Xavier *et al.* (2018) descreve perfis da base com a Formação Palermo ao topo, em contato com a Formação Serra Alta com empilhamento de 40 e 60 m, onde identificou doze fácies com predominância de folhelhos com intercalações centimétricas de carbonatos.

A formação foi subdividida por Barbosa & Gomes (1958) em membros Taquaral (Inferior) e Assistência (Superior). O **Membro Taquaral** é constituído por mudstones cinzas a negros e siltitos, pobre em carbono orgânico (HOLZ *et al.*, 2010; CRIVELLANI, 2017). O **Membro Assistência** é formado por *mudstones* intercalados com folhelhos negros ricos em matéria orgânica (HOLZ *et al.*, 2010; XAVIER *et al.*, 2018). O conteúdo paleontológico do Membro Assistência é representado por répteis mesosaurídeos, crustáceus *pygocephalomorpha* e peixes paleonisciformes desarticulados e em alta concentração, que segundo Xavier *et al.* (2018) ocorrem associados com estruturas típicas de ação de ondas de tempestades, como estratificação cruzada *hummocky*, além de conglomerados intraclastos e *grainstones* na região de São Gabriel no Rio Grande do Sul atribuído a este membro. Calças (2008) também registram estromatólitos e lenhos silicificados no estado de São Paulo.

Atualmente há uma relativa concordância quando ao ambiente de formação dos depósitos Irati, depositada em um mar epicontinental raso com conexão restrita com o oceano Pantalassa (ARAÚJO, 2001; HOLZ *et al.*, 2010; XAVIER *et al.*, 2018). O início da deposição é marcado por *mudstones* cinzas a negros e siltitos que definem o Membro Taquaral, seguida por *mudstones* ricos em matéria orgânica e folhelhos negros

pirobetuminosos intercalados com carbonatos depositados em rampa interna, intermediária a distal inclinada para sudoeste, com restrita circulação da água em relação ao Membro inferior, Taquaral (HACHIRO, 1991; HOLZ *et al.*, 2010).

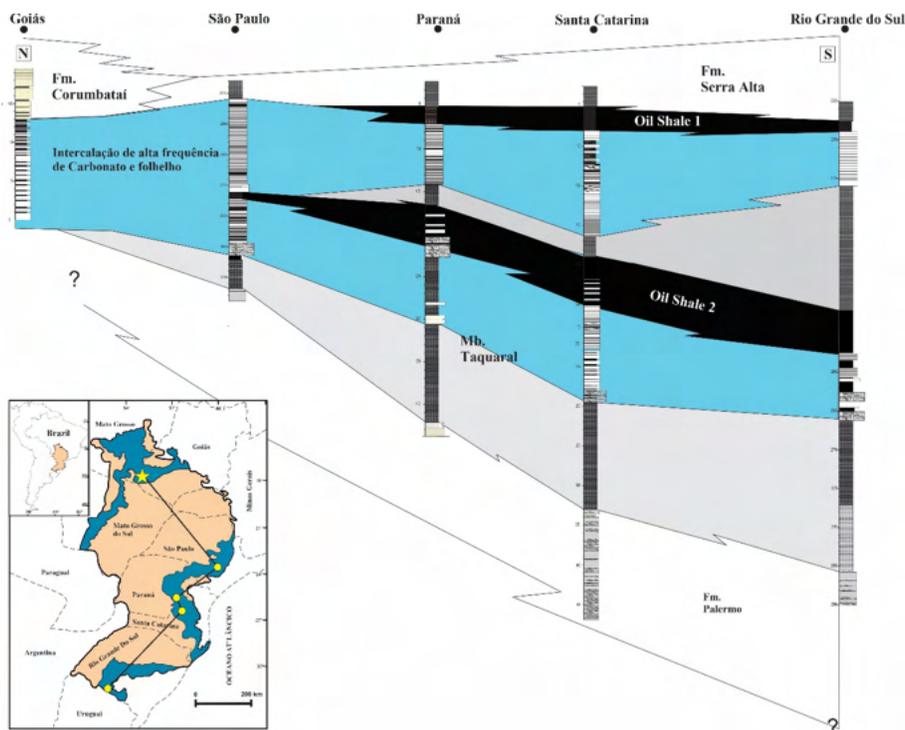


Figura 01. Distribuição lateral dos depósitos da Formação Irati com ênfase nos intervalos *Oil shale* 1 e 2. Note que os intervalos apresentam um suave espessamento na região de Santa Catarina com aunhamento em direção aos estados de São Paulo e Goiás. No Canto inferior esquerdo encontra-se o mapa com a localização dos poços na Bacia utilizados na confecção da figura. Os poços de SP e PR são compilados de Lages (2014) e o do RS de Xavier *et al.* (2018).

### 3 | MEDODOLOGIA

O alto potencial econômico da Formação Irati tem atraído ao longo dos anos pesquisas por empresas privadas e a academia. Esta última tem produzido e disponibilizados em trabalhos acadêmicos (TCCs, dissertações e teses) um considerável volume de dados organogeoquímicos focados nos folhelhos geradores do Membro Assistência. São estudos focados principalmente nos poços Paleosul-05-SM-PR no Paraná e HV-31-RS no estado do Rio Grande do Sul. Apesar de serem normalmente pontuais, sua integralização e correlação com novos dados provenientes do estado de Santa Catarina permite ampliar o conhecimento dos parâmetros e suas variações ao longo da Bacia do Paraná.

As amostras de poços oriundas de Santa Catarina foram cedidas pela empresa IRATI PETRÓLEO E ENERGIA LTDA. As análises de Pirólise Rock-Eval foram realizadas pelos

laboratórios Weatherford, no Canadá. As análises de biomarcadores foram executadas pelo Laboratório de Geoquímica Orgânica da UFPI (LAGO), usando a metodologia padrão com extração em sohxlet, fracionamento em coluna cromatográfica (CC) e análise da fração saturada em CG-EM, com cromatógrafo da Shimadzu, modelo GCMS-QP2010 SE.

#### 4 I QUANTIDADE E QUALIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA

As características, principalmente química, da matéria orgânica presente na Formação Irati vem sendo discutidas desde a década de 1960, quando Pádula (1969) apresentou teores de COT próximos de 30%. No entanto, como já foi colocado anteriormente por Alferes *et al.* (2011) e Reis *et al.* (2018) os depósitos da Formação Irati apresentam uma estratificação química com variações no tipo e teor de matéria orgânica. Os intervalos de *oil shale* apresentam altos teores de carbono orgânico nos três estados da região sul do país (tabela 01). Da mesma forma, alta qualidade e potencial para produção de hidrocarbonetos. Os teores de COT variam de 17,5 a 21,5% para o estado do Paraná, 8,8 a 19,3 no Rio grande do Sul e os mais altos valores são registrados em Santa Catarina para ambos os intervalos (20,5 a 25,0%).

*Oil shale 2* (O-S2) compreende essencialmente folhelhos negros betuminosos localizados na base do Membro Assistência (figura 01). A organofácies é marcada na base por argilitos a siltitos maciços a laminados de cor cinza a cinza escuro. É a organofácies com os maiores valores de COT (25 %) e potencial gerador (180 mgHC/gRocha) da Formação Irati. Os dados geoquímicos apresentam aumento dos valores convergentes para SC. Os maiores picos de COT foram 19,30% (RS), 21,5% (PR) e 25% (SC). *Oil shale 2* é composta por querogênio tipo I e II (*oil-prone*) com aumento da contribuição de querogênio tipo I convergindo para Santa Catarina. A temperatura máxima de pirólise está em média 436°C no RS, 437°C em SC e 435°C no PR. A figura 02 apresenta os cromatogramas representativos do intervalo O-S2 para Santa Catarina, com destaque para a razão positiva de Pr sobre Ph, assim como para a presença de gamacerano, cujos valores oscilam ao longo da seção.

	Paraná		Santa Catarina	Rio Grande do Sul		
	O-S1	O-S2	O-S1	O-S2	O-S1	O-S2
COT (%)	17,5	21,5	20,7	25,0	8,8	19,30
Tmax (°C)	432	435	430	437	430	436
HI (mgHC/g COT)	400	650	830	800	680	750
S2 (mgHC/g Rocha)	40	100	90	180	52	95
Botryococcus (%)	> 0,1	> 0,1	-	-	0,0	7,0
Gamacerano	0,87	0,87	0,56	-	> 0,1	> 0,1
Pr/Ph	1,64	1,26	0,6	1,19	1,13	0,40
Hopano/Esterano	7,70	7,18	3,57	6,13	4,60	1,64

Tabela 01. Valores máximos registrados nas organofácies O-S1 e O-S2 ao longo dos três estados da região sul. de Carbono orgânico total (COT), temperatura máxima de pirólise (Tmax), índice de hidrogênio (HI), razão pristano/fitano (Pr/Ph). Os dados dos parâmetros de biomarcadores do Rio Grande do Sul foram compilados poço SC-20-RS de Reis *et al.* (2018) e do Paraná do poço 05-SM-PR de Bastos *et al.* (2021).

O intervalo *Oil shale* 1 (O-S1) consiste no intervalo com o segundo maior potencial gerador, assim como teor de carbono orgânico (figura 01). Semelhante ao O-S2 é representada por folhelhos negros betuminosos. O intervalo registra um aumento progressivo da base para o topo dos valores de COT. No entanto, os dados dessa organofácies não apresentam picos com forma em cunha como em O-S2. Nos perfis do RS a forma cilíndrica dos dados é levemente côncava, cujos valores máximos são COT (8,8%), S2 (62 mgHC/gRocha) e IH (712 mgHC/gCOT). Para os perfis de Santa Catarina a forma do gráfico assemelha-se a um funil com os valores máximos registrado no topo da fácies (COT: 20,7%; S2: 132 mgHC/gRocha; HI: 850 mgHC/gCOT). No estado do Paraná há uma alta oscilação dos valores, todavia, o aumento progressivo para o topo persiste em alguns poços na porção nordeste do estado. Na porção sudoeste, os gráficos de Rock-Eval S1, S2 e IH apresentam forma negativa com decréscimo dos valores para o topo. O IO, ao contrário, registra altos picos, chegando a 107 mg CO<sub>2</sub>/g COT. Novamente, semelhante a fácies anterior, há uma tendência no aumento dos valores de COT para norte, todavia no geral, o estado de Santa Catarina registra os maiores valores de COT e potencial gerador (Figura 03).

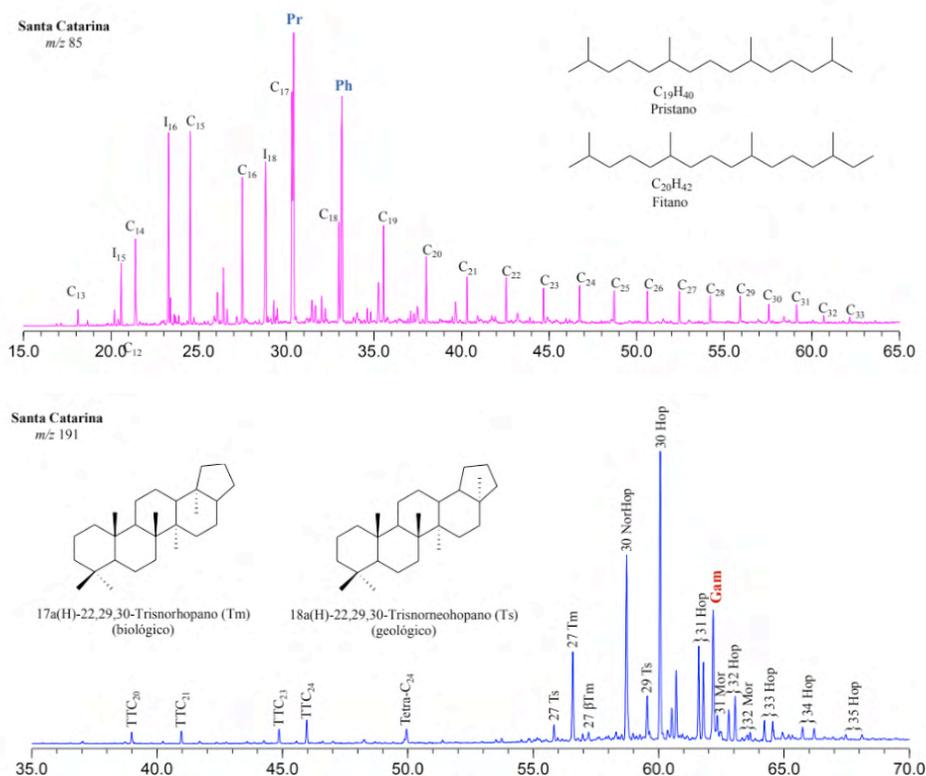


Figura 02. Perfil cromatográfico de monitoramento dos fragmentos *m/z* 85 e 191 representativo do intervalo *Oil shale 2*. Notar no *m/z* 85 a razão positiva de Pr/Ph que predomina da Formação Irati. No *m/z* 191 destaque para o pico poeminete de gamacerano (Gam).

Ambos os intervalos nos três estados apresentam querogênio tipo I e II em sua composição. A matéria orgânica tipo I é aquela rica em hidrogênio (IH > 600 mg de Hc/g COT (com alta razão de H/C) 1,5 e pobre em oxigênio (baixa razão O/C < 0,1) (PETERS *et al.*, 2005). É comumente formado em lagos ou lagunas constituída por algas com alta contribuição de lipídios e a liptinita é o maceral dominante o que lhe confere o maior potencial para geração de óleo e gás. O querogênio tipo II apresenta menor proporção de hidrogênio que o tipo I (IH = 300-600 mg HC/g COT e H/C = 1,2-1,5) e baixa razão de O/C (KILLOPS; KILLOPS, 2005; TISSOT; WELTE, 1984). É comum em ambiente marinho, formada a partir de algas e plâncton. A liptinita também é o maceral dominante. Apesar de menores proporção de hidrogênio, querogênio tipo II possui alto potencial para geração de hidrocarboneto.

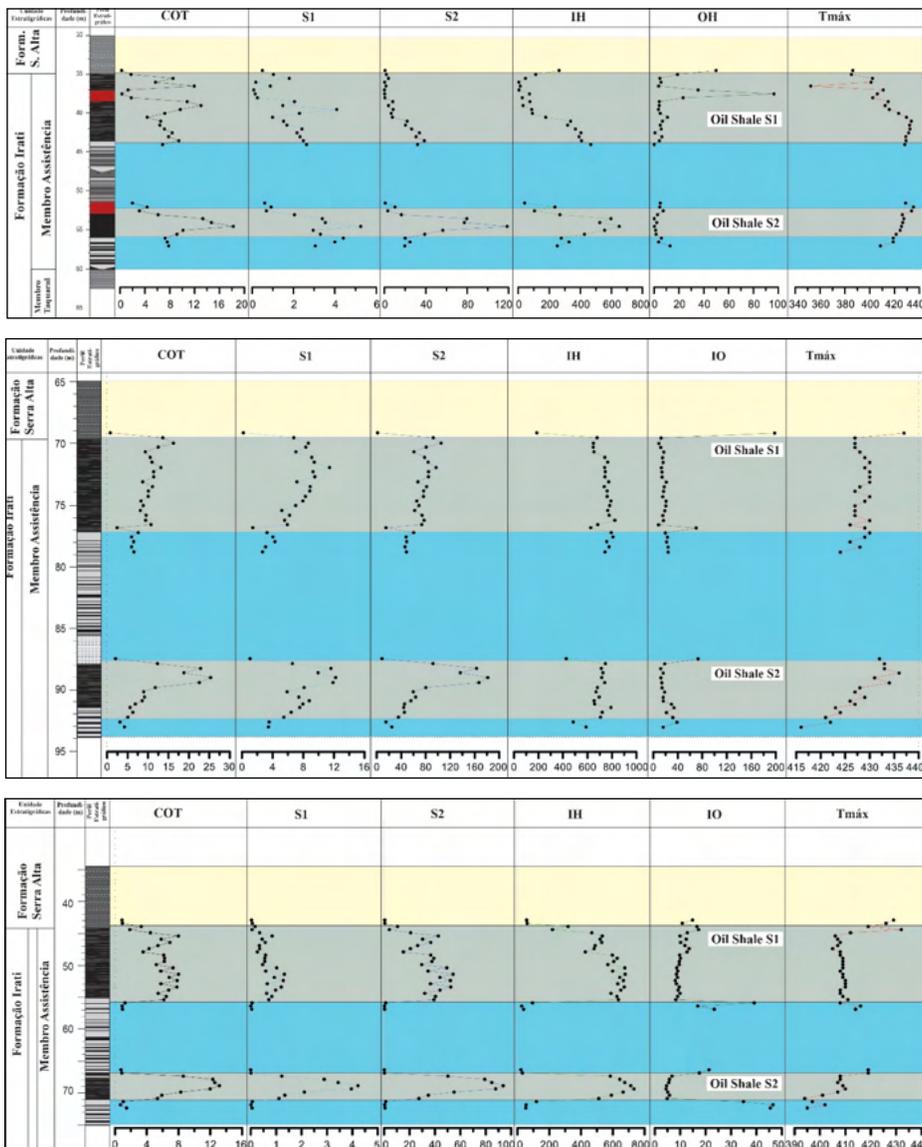


Figura 03. Variação quimioestratigráfica dos teores de carbono orgânico (COT) e parâmetros de pirólise Rock-Eval nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, respectivamente. S1: hidrocarbonetos livres, S2: potencial gerador, IH: índice de hidrogênio, IO: índice de Oxigênio.

## 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados obtidos a partir de três poços nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul permitiu espacializar, assim como compreender as variações laterais dos teores de carbono orgânico e da qualidade da matéria orgânica presente nos intervalos de *Oil shales* da Formação Irati. Apesar da ampla distribuição das organofácies, por mais

de 1.000 km, estas permanecem com as características organoquímicas lateralmente constantes. Predominam em ambos os intervalos querogênio tipo I e II, cuja matéria orgânica apresenta-se imatura, a exceção dos pontos afetados por intrusões ígneas. Contudo, consistem em intervalos com excelente qualidade para geração de hidrocarboneto. Os novos dados mostram que os intervalos mais promissores para a produção de óleo estão no estado de Santa Catarina.

## REFERÊNCIAS

ALFERES C.L., RODRIGUES, R., PEREIRA E. Geoquímica orgânica aplicada à Formação Irati, na área de São Mateus do Sul (PR), Brasil. **Geochimica Brasiliensis**, 25(1): 47-54. 2011.

AMARAL S.E. Geologia e Petrologia da Formação Irati (Perminano) no estado de São Paulo. PhD Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, 81 p. 1967.

ARAÚJO L.M., RODRIGUES, R., SCHERER C.M.S. Sequências deposicionais Irati: arcabouço quimioestratigráfico e inferências paleoambientais. **Ciência, Técnica, Petróleo**, 20: 193-202. 2001.

BARBOSA O. and GOMES F.A. Pesquisa de petróleo na bacia do rio Corumbataí, Estado de São Paulo. **Divisão de Geologia Mineral – DNPM**, Boletim, vol. 171 40 p. 1958.

BASTOS, Lucas Pinto Heckert *et al.* The birth and demise of the vast epicontinental Permian Irati-Whitehill sea: Evidence from organic geochemistry, geochronology, and paleogeography. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 562, p. 110103, 2021.

BRANCH, T., RITTER, O., WECKMANN, U., SACHSENHOFER, R.F. and SCHILLING, F. The Whitehill Formation—a high conductivity marker horizon in the Karoo Basin. **South African Journal of Geology**, 110, 465-476. 2007.

CALÇA C.P. Microbiota fóssil em sílex da Formação Assistência (subgrupo Irati, Permiano, Bacia do Paraná) no Estado de São Paulo. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 82 p. 2008.

CRIVELLANI K. Análise de parametros geoquímicos de rochas, óleos e betumes em afloramentos das formações Irati e Pirambóia na borda leste da bacia do Paraná, São Paulo, Brasil. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 85 p. 2016.

HACHIRO, J. Litotipos, associações faciológicas e sistemas deposicionais da Formação Irati no Estado de São Paulo. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 1991.

HOLZ M., FRANÇA A.B., SOUZA P.A., IANNUZZI R. and ROHN R. A stratigraphic chart of the Late Carboniferous/Permian succession of the eastern border of the Paraná Basin, Brazil, South America. **Journal of South American Earth Sciences**, 29, 381-399. 2010.

KILLOPS, S.; KILLOPS, V. **Introduction to Organic Geochemistry**, 2nd edn (paperback). Blackwell Publishing company, 2005. 393 p.

LAGES L.C. A formação Irati (grupo passa dois, permiano, bacia do Paraná) no furo de sondagem FP-01-PR (Sapopema, PR). MS Dissertation, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 117p. 2004.

MEZZALIRA S. Contribuição ao conhecimento da geologia de subsuperfície e da paleontologia da Formação Irati no Estado de São Paulo. In: **Simpósio de paleontologia**, Rio de Janeiro, Anais..., v.43, p. 273-336. 1971.

PÁDULA V. T. Estudos geológicos da Formação Irati, sul do Brasil. Boletim Técnico da PETROBRÁS, V.11, n3, p. 407-430. 1968.

PETERS, K. E.; WALTERS, C.C.; MOLDOWAN, J.M. (2<sup>nd</sup> ed.). **The biomarker guide**: Volume 1, Biomarkers and isotopes in the environment and human history. Cambridge university press, 2005.

REIS D.E.S., RODRIGUES R., MOLDOWAN J.M., JONES C.M., BRITO M., CAVALCANTE D.C., Portela H.A. Biomarkers stratigraphy of Irati Formation (Lower Permian) in the southern portion of Paraná Basin (Brazil). **Marine and Petroleum Geology**, 95: 110-138. 2018.

WELTE, D. H.; TISSOT, P. B. Petroleum formation and occurrence. Springer-verlag, 1984.

XAVIER P.L.A., SILVA A.F., SOARES M.B., HORN B.L.D., SCHULTZ C.L. Sequence stratigraphy control on fossil occurrence and concentration in the epeiric mixed carbonate-siliciclastic ramp of the Early Permian Irati. **Journal of South American Earth Sciences**, 88: 157-178. 2018.

## 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