



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

ANA CLARA BRAGA DE SOUZA

**GEOQUÍMICA ORGÂNICA E ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS DA BACIA DO
CEARÁ: UMA ABORDAGEM INTEGRADA PARA COMPREENDER AS ROCHAS
GERADORAS E SUA EVOLUÇÃO PALEOAMBIENTAL**

FORTALEZA

2021

ANA CLARA BRAGA DE SOUZA

GEOQUÍMICA ORGÂNICA E ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS DA BACIA DO
CEARÁ: UMA ABORDAGEM INTEGRADA PARA COMPREENDER AS ROCHAS
GERADORAS E SUA EVOLUÇÃO PALEOAMBIENTAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do título de Doutora em Geociências. Área de concentração: Geologia Sedimentar e Paleontologia.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Rodrigues do Nascimento Júnior
Coorientador: Prof. Dr. Francisco Nepomuceno Filho

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S713g Souza, Ana Clara Braga de.
Geoquímica orgânica e estratigrafia de sequências da Bacia do Ceará: uma abordagem integrada para compreender as rochas geradoras e sua evolução paleoambiental : Tese de doutorado / Ana Clara Braga de Souza. – 2021.
192 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Daniel Rodrigues do Nascimento Júnior .
Coorientação: Prof. Dr. Francisco Nepomuceno Filho .
1. Interpretação sísmica . 2. Ciclos transgressivos-regressivos . 3. Marcos geoquímicos. 4. Teor de carbono orgânico . 5. Pirólise . I. Título.
-

CDD 551

ANA CLARA BRAGA DE SOUZA

GEOQUÍMICA ORGÂNICA E ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS DA BACIA DO
CEARÁ: UMA ABORDAGEM INTEGRADA PARA COMPREENDER AS ROCHAS
GERADORAS E SUA EVOLUÇÃO PALEOAMBIENTAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do título de Doutora em Geociências. Área de concentração: Geologia Sedimentar e Paleontologia

Aprovada em: 11/02/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Daniel Rodrigues do Nascimento Júnior (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Nepomuceno Filho (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Carlos Conforti Ferreira Guedes
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Prof. Dr. Gelson Luís Fambrini
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Prof. Dr. Antônio Jorge Vasconcelos Garcia
Universidade Federal de Sergipe (UFS)

Dr. David Lino Vasconcelos
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Aos meus pais, Zuleide e Antônio Carlos.

E ao meu esposo, Felipe Holanda.

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida. À minha família que foi estímulo e encorajamento. Em especial, agradeço à minha mãe, Zuleide, que me inspira a ser uma mulher forte. E ao meu pai, Antônio Carlos, que foi meu maior exemplo de determinação. De forma igualmente especial, agradeço às minhas irmãs, Rosa e Luiza, que foram acolhimento durante essa caminhada.

Ao Felipe, meu esposo, me é dada a oportunidade de retribuir, em poucas palavras, todo apoio, incentivo e companheirismo. Felipe, tão generosamente, se tornou o primeiro leitor de tudo que será apresentado. Mais do que isso, foi e é um dos meus maiores colaboradores. Algumas das nossas discussões sobre o evento Paquier ou sobre o evento Lomagundi tornaram-se parte das nossas teses. Felipe é um geólogo entusiasmado, atencioso, dedicado, um profissional inspirador! Nesses últimos quatro anos, Felipe tornou-se ouvinte atento de cada nova ideia, estava sempre disposto a discuti-las e sempre tinha melhorias a sugerir. Sua colaboração foi fundamental!

Agradeço ao professor Daniel Rodrigues pela orientação e confiança. Ele viu minha família se formar. E eu tive a felicidade de ver sua família crescer com a chegada do seu primeiro filho. Espero que o tempo consolide nossa amizade! Agradeço igualmente pela confiança, ensinamento e sábio direcionamento fornecido pelo professor Francisco Nepomuceno. Integrar parte do time que trabalhou no Laboratório de Interpretação Sísmica da Universidade Federal do Ceará foi fundamental para meu amadurecimento. Agradeço ao professor Alessandro Batezelli que, durante os últimos dois anos da tese, se tornou um coorientador extraoficial e um colaborador durante minha permanência em Campinas.

Agradeço aos colegas do laboratório: Karen Leopoldino, Narelle Almeida, Márcio Normando e Thiago Henrique, pelas reflexões, críticas e sugestões. Trabalhar ao lado de vocês, dividir as alegrias e frustrações do cotidiano, foi gratificante e me rendeu muito aprendizado. Agradeço aos colegas da Unicamp, que me receberam calorosamente. Em especial agradeço a: Mariana Monteiro, Douglas Martins, Ian Cedeira, Ana Colin, Robert Muniz. Agradeço aos amigos que permaneceram ao meu lado: Larissa Bezerra, Jorge Henrique, Raphaele Almeida, Ana Olívia Viana, Diego Farias, Leandro Lima, Rugênia Amorin, Thatiane Souza, Jéssica Moreira, Rayane Vasconcelos e Sarah Ferreira.

Agradeço ao programa de Pós-Graduação da Geologia UFC - PPGG e à Universidade Federal do Ceará – UFC, pela filiação durante o doutorado. À CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa. À ANP, por ceder os dados utilizados. E à Schlumberger, pelas licenças do *software* Petrel.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação.”

Simone de Beauvoir

RESUMO

A Bacia do Ceará é uma bacia *offshore* e pertencente à Margem Equatorial Brasileira, que abrange os estados do Ceará, Piauí e parte do Maranhão. A evolução tectônica da Bacia do Ceará é correlacionada a três estágios de preenchimento sedimentar divididos em sequência: Sin-rifte, representada pela Fm. Mundaú, transicional (*breakup sequence*), representada pela Fm. Paracuru e drifte (marinho aberto), representada pelas Fm. Ubarana, Tibau e Guamaré. A deposição dessas sequências ocorre associadas às características tectono-estratigráficas e geoquímicas distintas. Cada uma dessas sequências aponta para uma influência maior ou menor de fatores como tectônica, aporte sedimentar, mudanças climáticas e eustáticas, que controlam o empilhamento sedimentar em uma bacia. A estratigrafia de sequências, por sua vez, foi o método empregado para investigar esses controles. A tese tem como objetivo discutir os controles de preenchimento da bacia e a influência dos ciclos regressivos/transgressivos, a partir de dados de interpretação sísmica de reflexão (2D e 3D), dados geoquímicos e de perfilagem de poços. Adicionalmente avaliou-se, a partir de uma abordagem geoquímica, os momentos de deposição e preservação da matéria orgânica, assim como mudanças climáticas, tectônicas e eustáticas. Os métodos geoquímicos integrados foram: teor de carbono orgânico (TOC), pirólise *Rock-Eval* (RE) e reflectância de vitrinite (R_o). Dentre os índices calculados com base nos valores de pirólise, destaca-se o potencial relativo de hidrocarboneto (*relative hydrocarbon potential* - $RHP = S1 + S2/TOC$). O RHP auxiliou na interpretação das condições de oxigenação da Bacia do Ceará. Como conclusão, o entendimento da estratigrafia de sequências e a compreensão dessa interação com relação a rochas enriquecidas organicamente fornece maior entendimento dos sistemas deposicionais atuantes. Além de ser uma ferramenta poderosa não apenas para correlações estratigráficas regionais e locais, como também para intervalos estratigráficos de alta complexidade, e para delimitação dos intervalos favoráveis à preservação de matéria orgânica, geração e armazenamento de hidrocarbonetos.

Palavras-chave: Estratigrafia de sequências. Geoquímica orgânica. Bacia do Ceará. Margem Equatorial Brasileira.

ABSTRACT

The Ceará Basin is an offshore basin and belongs to the Brazilian Equatorial Margin, covering the states of Ceará, Piauí, and part of Maranhão. The tectonic evolution of the Ceará Basin is correlated to three stages of sedimentary filling divided in sequence: Sin-rift, represented by the Mundaú Fm, transitional (breakup sequence), represented by the Paracuru Fm. Paracuru and drift (open sea), represented by Fm. Ubarana, Tibau and Guamaré. The deposition of these sequences occurs associated with distinct tectonostratigraphic and geochemical characteristics. Each of these sequences' points to a greater or lesser influence of tectonics, sedimentary input, climatic and eustatic changes, which control the sediment stacking in a basin. Sequence stratigraphy, in turn, was the method employed to investigate these controls. The thesis aims to discuss the basin fill controls and the influence of regressive/transgressive cycles, based on data from reflection seismic interpretation (2D and 3D), geochemical data, and well logging. Additionally, organic matter deposition and preservation and climatic, tectonic, and eustatic changes were evaluated from a geochemical approach. The integrated geochemical methods were organic carbon content (TOC), Rock-Eval pyrolysis (RE), and vitrinite reflectance (Ro). The relative hydrocarbon potential ($RHP = S1 + S2/TOC$) stands out among the indices calculated based on pyrolysis values. The RHP helped in the interpretation of the oxygenation conditions in the Ceará Basin. In conclusion, understanding sequence stratigraphy and understanding this interaction concerning organically enriched rocks provides a better understanding of the depositional systems at work, besides being a powerful tool not only for regional and local stratigraphic correlations but also for stratigraphic intervals of high complexity and delimitation of intervals favorable for organic matter preservation, generation, and storage of hydrocarbons.

Keywords: Sequence stratigraphy. Organic geochemistry. Ceará Basin. Brazilian Equatorial Margin.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	12
1.1	Apresentação e estrutura	12
1.2	Contextualização, problemática e hipóteses	14
1.3	Justificativa	16
1.4	Objetivos	20
1.5	Localização da área de estudo	21
1.6	Breve histórico	23
1.6.1	<i>Produção de petróleo na Bacia do Ceará</i>	26
1.6.2	<i>Estrutura cearense produtora de óleo e gás</i>	28
2	MATERIAIS E MÉTODOS	31
2.1	Apresentação geral dos dados utilizados	31
2.1.1	<i>Dados de perfilagem</i>	33
2.1.2	<i>Dados sísmicos</i>	34
2.1.3	<i>Dados geoquímicos</i>	36
2.2	Sismoestratigrafia e estratigrafia de sequência	39
2.2.1	<i>Descontinuidades</i>	41
2.2.2	<i>Mapeamento das terminações das reflexões</i>	45
2.2.3	<i>Sismofácies</i>	46
2.2.4	<i>Estratigrafia de sequência e interpretação da variação do nível do mar</i>	49
3	ARTIGO 1: GEOCHEMICAL CONSTRAINTS ON THE ORIGIN AND DISTRIBUTION OF CRETACEOUS SOURCE ROCKS IN THE CEARÁ BASIN, BRAZILIAN EQUATORIAL MARGIN	52
4	ARTIGO 2: SEQUENCE STRATIGRAPHY AND ORGANIC GEOCHEMISTRY: AN INTEGRATED APPROACH TO UNDERSTAND THE ANOXIC EVENTS AND PALEOENVIRONMENTAL EVOLUTION OF THE CEARÁ BASIN, BRAZILIAN EQUATORIAL MARGIN	108
5	CONCLUSÕES GERAIS	176
	REFERÊNCIAS	184