UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA
PÓS-GRADUAÇÃO DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Mariana Rodrigues Meirelles

Avaliação do potencial de extração de lítio a partir da água contida na Formação Itapema, Campo de Búzios, Bacia de Santos.

Niterói, RJ

2 de abril de 2026

Mariana Rodrigues Meirelles

Avaliação do potencial de extração de lítio a partir da água contida na Formação Itapema, Campo de Búzios, Bacia de Santos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra do Departamento de Geologia e Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientador: Antonio Fernando Menezes Freire
Coorientador: Ricardo Jorge Jahnert

Niterói, RJ
2 de abril de 2026

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

M479a Meirelles, Mariana Rodrigues
Avaliação do potencial de extração de lítio a partir da água contida na Formação Itapema, Campo de Búzios, Bacia de Santos / Mariana Rodrigues Meirelles. - 2026.
69 p.: il.

Orientador: Antonio Fernando Menezes Freire.
Coorientador: Ricardo Jorge Jahnert.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Niterói, 2026.

1. Lítio. 2. água de formação. 3. Pré-sal. 4. Bacia de Santos. 5. Produção intelectual. I. Freire, Antonio Fernando Menezes, orientador. II. Jahnert, Ricardo Jorge, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDD - XXX

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

Mariana Rodrigues Meirelles

Avaliação do potencial de extração de lítio a partir da água contida na Formação Itapema, Campo de Búzios, Bacia de Santos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra do Departamento de Geologia e Geofísica da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia.

Aprovada em 2 de abril de 2026.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Antonio Fernando Menezes Freire – Orientador (UFF/PPGDOT)

_____

Dr. Ricardo Jorge Jahnert – Coorientador (Pesquisador Independente)

_____

Prof. Dr. Wagner Moreira Lupinacci – Examinador 1 (UFF/PPGDOT)

_____

Prof. Dr. Jose Antonio Baptista Neto – Examinador 2 (UFF/PPGDOT)

_____

Dr. Filipe Vidal Cunha Santa Rosa Soares de Oliveira – Examinador 3 (PETROBRAS)

RESUMO

A transição energética global tem intensificado a demanda pelos chamados "minerais estratégicos", especialmente o lítio, componente essencial em baterias de íons de lítio para veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia. As fontes convencionais de lítio, salmouras em salares e pegmatitos, enfrentam restrições ambientais e pressões crescentes na cadeia de suprimentos, tornando as águas de formação coproduzidas em campos de petróleo e gás uma alternativa ainda pouco explorada. O presente estudo avalia o potencial de extração de lítio a partir das águas de formação da Formação Itapema, no Campo de Búzios, Bacia de Santos. Dados geoquímicos de 14 poços, disponibilizados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), foram analisados por meio de estatística descritiva e Análise de Componentes Principais (PCA). Foram identificados dois componentes principais hidroquímicos: HQ1, associado à salinidade (Na^+, K^+, Cl^-), e HQ2, que apresentou relação inversa com as concentrações de lítio, sugerindo seu uso como indicador indireto do enriquecimento do elemento. A análise dos parâmetros físico-químicos identificou o componente FQ1, associado à salinidade e ao pH levemente ácido (média de 6,6).Concentrações de lítio superiores ao limiar de viabilidade econômica de 100 mg/L foram registradas em 10 poços, com valor máximo de 257 mg/L. Mapas de distribuição espacial das concentrações de lítio, das razões Mg^{2+}/Li^+ e Ca^{2+}/Li^+, da espessura da formação e dos contatos de fluidos indicam que as porções sul e central do Campo de Búzios apresentam as condições mais favoráveis para a extração, combinando altas concentrações com razões de interferência reduzidas. Os resultados demonstram que as águas da Formação Itapema da Bacia de Santos possuem potencial expressivo como fonte complementar de lítio, contribuindo para o reposicionamento de ativos maduros de hidrocarbonetos no contexto da transição energética.

Palavras-chave: lítio; água de formação; *Pré-sal*; Bacia de Santos; Campo de Búzios; PCA.

ABSTRACT

The global energy transition has intensified demand for the so-called "strategic minerals", particularly lithium, an essential component in lithium-ion batteries for electric vehicles and energy storage systems. Conventional lithium sources, brines in salt flats and pegmatites, face growing environmental constraints and supply chain pressures, making formation waters co-produced in oil and gas fields an underexplored alternative. The present study evaluates the lithium extraction potential from formation waters of the Itapema Formation, in the Buzios Field, Santos Basin. Geochemical data from 14 wells, provided by the Brazilian National Petroleum, Natural Gas and Biofuels Agency (ANP), were analyzed through descriptive statistics and Principal Component Analysis (PCA). Two hydrochemical principal components were identified: HQ1, associated with salinity (Na^+, K^+, Cl^-), and HQ2, which showed an inverse relationship with lithium concentrations, suggesting its use as an indirect indicator of element enrichment. Analysis of physicochemical parameters identified component FQ1, associated with salinity and slightly acidic pH (mean of 6.6). Lithium concentrations exceeding the economic viability threshold of 100 mg/L were recorded in 10 wells, with a maximum value of 257 mg/L. Spatial distribution maps of lithium concentrations, Mg^{2+}/Li^+ and Ca^{2+}/Li^+ ratios, formation thickness, and fluid contacts indicate that the southern and central portions of the Buzios Field present the most favorable conditions for extraction, combining high concentrations with reduced interference ratios. The results demonstrate that the waters of the Itapema Formation in the Santos Basin hold significant potential as a complementary lithium source, contributing to the repositioning of mature hydrocarbon assets within the energy transition context.

Keywords: lithium; formation water; pre-salt; Santos Basin; Buzios Field; PCA.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, pelo amor incondicional, pelo apoio em cada etapa desta jornada e por sempre acreditarem em mim.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Antonio Fernando Freire Menezes, pela orientação dedicada, pela confiança depositada neste trabalho e pelos ensinamentos que foram fundamentais para o meu desenvolvimento acadêmico e científico.

Ao professor Ricardo Jahnert, pela coorientação e pelas contribuições que enriqueceram substancialmente esta pesquisa.

Ao Departamento de Geologia e Geofísica da Universidade Federal Fluminense, pela estrutura acadêmica e pelo ambiente de formação que tornaram possível a realização deste trabalho.

À minha família, pelo apoio incondicional ao longo de toda a minha trajetória acadêmica, e aos meus amigos, pela compreensão e incentivo nos momentos de maior dedicação a esta pesquisa.

Ao Hugo Yamassaki, pelo companheirismo, pela paciência e pelo suporte constante durante todas as etapas deste trabalho.

Por último, gostaria de agradecer a Petrobras pelos dados e à ANP por ter fornecidos os mesmo para estudo.

EPÍGRAFE

"A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez." - George Bernard Shaw

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Demanda global projetada por baterias de íons de lítio (GWh), por região, entre 2022 e 2030. Fonte: McKinsey & Company (2023), adaptado pela Autora. 12
Figura 2 Localização dos principais depósitos de lítio do tipo pegmatito (quadrado) e salmoura (cruz) no mundo. Fonte: Kesler *et al.* (2012). 13
Figura 3 Sonda de perfuração do primeiro poço de lítio da ExxonMobil, sudoeste do Arkansas, EUA, ilustrando o avanço da extração direta de lítio (DLE) a partir de águas de formação em campos de petróleo e gás. Fonte: ExxonMobil apud Upholt (2024, Yale Environment 360). 14
Figura 4 Mapa de localização da Bacia de Santos com os principais elementos do seu arcabouço estrutural regional. Fonte: Garcia *et al.* (2012), modificado de ANP (2017). 17
Figura 5 Carta Cronoestratigráfica da Bacia de Santos. Fonte: Moreira *et al.* (2007). .. 19
Figura 6 Carta Cronoestratigráfica da Bacia de Santos. Fonte: Moreira *et al.* (2007). .. 20
Figura 7 Localização do Campo de Búzios na Bacia de Santos. Fonte: Guerrero *et al.* (2024). 21
Figura 8 Carta estratigráfica com ênfase no Cretáceo Inferior, Bacia de Santos. 23
Figura 9 Tabela periódica com destaque para o lítio (Z = 3), pertencente ao Grupo dos metais alcalinos. Fonte: tabelaperiodica.org (2026). 24
Figura 10 Distribuição percentual dos usos globais do lítio em 2024. Fonte: Adaptado de USGS (2025). 25
Figura 11 Distribuição percentual dos tipos de depósitos de lítio; (B) recursos globais de lítio por país em 2021; (C) produção global de lítio por país em 2021. Adaptado de Gutiérrez *et al.* (2022). 27
Figura 12 Vista sul sobre a cava principal da Mina de Greenbushes a partir do mirante público, Austrália Ocidental. Fonte: ORDERINCHAOS (2022). Wikimedia Commons. Licença CC BY-SA 4.0. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Greenbushes_mine_lookou 28
Figura 13 Operação de extração de lítio no Salar de Salinas Grandes, província de Jujuy, Argentina. Fonte: Dominish, Florin e Teske (2019). 29

Figura 14 Principais tecnologias de extração direta de lítio (DLE): adsorção, troca iônica, extração por solvente, membrana e eletroquímica. Fonte: Adaptado de WERNY *et al.* (2023, online).....30
Figura 15 Comparação esquemática entre o processo convencional de extração de lítio por evaporação em lagoas (Lagoa de Evaporação Tradicional) e o processo de extração direta de lítio (DLE). Fonte: Adaptado de Goldman Sach (2023). 31
Figura 16 Localização dos 14 poços utilizados no estudo, Campo de Búzios, Bacia de Santos. Sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Escala 1:250.000. Fonte: Elaborado pela autora (2025).....32
Figura 17 Fluxograma das etapas metodológicas adotadas no estudo. Fonte: Elaborado pela autora (2025). 33
Figura 18 Scree Plot dos componentes principais hidroquímicos (HQ1 a HQ9), com destaque para os componentes HQ1 e HQ2, responsáveis por 56% da variância total dos dados. Fonte: Elaborado pela Autora (2025).....36
Figura 19 Círculo de correlações da Análise de Componentes Principais (PCA) hidroquímica, exibindo a contribuição e a direção das variáveis nos componentes HQ1 e HQ2. 37
Figura 20 Scree Plot e círculo de correlações da Análise de Componentes Principais (PCA) físico-química, indicando a variância explicada por cada componente e a contribuição das variáveis nos componentes FQ1 (52,69%) e FQ2 (20,31%), responsáveis por 73% da variância total dos dados. Fonte: Elaborado pela autora (2025).....38
Figura 21 Distribuição espacial das concentrações de lítio (Li^+, mg/L) nos poços da Formação Itapema, Campo de Búzios, Bacia de Santos. Sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Fonte: Elaborado pela autora (2025). 40
Figura 22 Distribuição espacial dos escores do componente principal HQ1 (32,48% da variância), associado à salinidade da água de formação, nos poços da Formação Itapema, Campo de Búzios, Bacia de Santos. Sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Fonte: Elaborado pela autora (2025).....41
Figura 23 Distribuição espacial dos escores do componente principal HQ2 (23,99% da variância), associado à presença de lítio na água de formação. Regiões com valores negativos indicam maior concentração de Li^+. Formação Itapema, Campo de Búzios, Bacia de Santos. 42
Figura 24 Distribuição espacial da razão Mg^{2+}/Li^+ nos poços da Formação Itapema, Campo de Búzios, Bacia de Santos. Valores elevados indicam maior interferência do

magnésio no processo de separação do lítio. Sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Fonte: Elaborado pela autora (2025). 43
Figura 25 Distribuição espacial da razão Ca^{2+}/Li^{+} nos poços da Formação Itapema, Campo de Búzios, Bacia de Santos. Valores elevados indicam maior interferência do cálcio no processo de separação do lítio. Sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Fonte: Elaborado pela autora (2025). 44
Figura 26 Mapa de isópacas da Formação Itapema no Campo de Búzios, Bacia de Santos, com a localização dos poços utilizados no estudo. Sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Fonte: Adaptado de Silva (2024). 45
Figura 27 Distribuição espacial do contato óleo/água (Free Water Level – FWL) na Formação Itapema, Campo de Búzios, Bacia de Santos, com a localização dos poços utilizados no estudo. Sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Fonte: Adaptado de Silva (2024). 46
Figura 28 Distribuição espacial da densidade da água de formação na Formação Itapema, Campo de Búzios, Bacia de Santos, com a localização dos poços utilizados no estudo. Sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Fonte: Adaptado de Silva (2024). 47
Figura 29 Gráfico de observações da Análise de Componentes Principais hidroquímica, com distribuição dos poços no espaço bidimensional definido pelos componentes HQ1 (32,48%) e HQ2 (23,99%). Os poços destacados em verde correspondem ao grupo de maior potencial para extração de lítio.Fonte: Elaborado pela autora (2025). 50
Figura 30 Distribuição espacial dos poços com maior potencial para extração de lítio (destacados em verde) no Campo de Búzios, Bacia de Santos. Projeção SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Escala 1:250.000. Fonte: Elaborado pela autora (2025). 51
Figura 31 Gráfico de observações da Análise de Componentes Principais hidroquímica, com distribuição dos poços no espaço bidimensional definido pelos componentes HQ1 (32,48%) e HQ2 (23,99%). Os poços destacados em laranja correspondem ao grupo de potencial intermediário para extração de lítio. Fonte: Elaborado pela autora (2025). ... 52
Figura 32 Distribuição espacial dos poços de potencial intermediário para extração de lítio (destacados em laranja) no Campo de Búzios, Bacia de Santos. Projeção SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Escala 1:250.000. Fonte: Elaborado pela autora (2025). 53
Figura 33 Gráfico de observações da Análise de Componentes Principais hidroquímica, com distribuição dos poços no espaço bidimensional definido pelos componentes HQ1 (32,48%) e HQ2 (23,99%). Os poços destacados em vermelho correspondem ao grupo de menor potencial para extração de lítio. Fonte: Elaborado pela autora (2025). 54

Figura 34 Distribuição espacial dos poços de menor potencial para extração de lítio (destacados em vermelho) no Campo de Búzios, Bacia de Santos. Projeção SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Escala 1:250.000. Fonte: Elaborado pela autora (2025). 55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 12
2. OBJETIVO 16
3. CONTEXTO GEOLÓGICO 17
3.1 A Bacia de Santos *17*
3.2 O Campo de Búzios *21*
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 24
4.1 O Lítio como Elemento Químico e sua Distribuição Natural *24*
4.2 Demanda e Aplicações do Lítio no Mercado Global *25*
4.3 O Lítio como Mineral Estratégico *26*
4.4 Recursos e Produção de Lítio: Pegmatitos e Salmouras *27*
4.5 Extração direta de lítio (Direct Lithium Extraction – DLE) *29*
5. MATERIAIS E MÉTODOS 32
5.1 Revisão bibliográfica *33*
5.2 Análise química das águas de formação *33*
5.3 Controle de qualidade de dados *34*
5.4 Utilização da técnica de PCA *34*
5.5 Identificação de condições favoráveis para extração de lítio *34*
5.6 Geração de mapas para visualizar a distribuição espacial dos fatores influenciáveis a extração de Lítio *34*
6. RESULTADOS 35
6.1 Análise de Componentes Principais (PCA) — Parâmetros Hidroquímicos *35*
6.2 Análise de Componentes Principais (PCA) — Parâmetros Físico-Químicos *37*
6.3 Concentrações de Lítio nos Poços *38*
6.4 Distribuição Espacial e Mapas Geoquímicos *39*
7. DISCUSSÕES 48
7.1 Interpretação dos Componentes Principais Hidroquímicos *48*
7.2 Interpretação dos Componentes Principais Físico-Químicos *48*
7.3 Viabilidade de extração por poço *49*
7.3.1 Poços mais promissores 49
7.3.2 Poços moderadamente promissores 51
7.3.3 Poços menos promissores 53
7.4 Distribuição Espacial e Controles Geológicos *55*
7.5 Comparação com a Literatura e Perspectivas *56*
8. HIPÓTESES SOBRE A ORIGEM DO LÍTIO NA FORMAÇÃO ITAPEMA 57

8.1 Hipótese 1 - Migração do Lítio a partir do manto litosférico juntamente com o CO2 57
8.2 Hipótese 2 - Migração de Fluidos a Partir da Sequência Evaporítica 58
8.3 Hipótese 3 - Interação Água-Rocha 59
9. CONCLUSÕES 60
9.1 Sobre os controles geoquímicos da distribuição do lítio 60
9.2 Sobre as concentrações de lítio e a viabilidade econômica 61
9.3 Sobre a distribuição espacial e os controles geológicos 61
9.4 Sobre as limitações do estudo 61
9.5 Considerações finais 62
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 63

1. INTRODUÇÃO

A transição energética global constitui um dos maiores desafios do século XXI. O crescimento da demanda por energia limpa e sustentável, associado às pressões internacionais por redução das emissões de gases de efeito estufa, tem impulsionado mudanças profundas na matriz energética mundial. Nesse cenário, a eletrificação dos transportes, o desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia em larga escala e a integração de fontes renováveis intermitentes, como a solar e a eólica, dependem diretamente da disponibilidade de minerais estratégicos, entre os quais se destaca o Lítio (IEA, 2025). A projeção dessa demanda por região é apresentada na Figura 1.

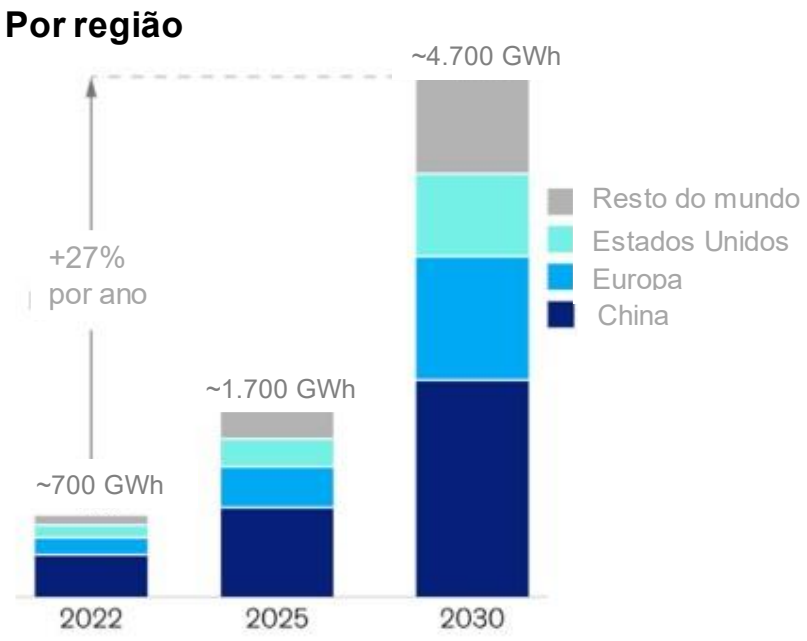

Figura 1 Demanda global projetada por baterias de íons de lítio (GWh), por região, entre 2022 e 2030. Fonte: McKinsey & Company (2023), adaptado pela Autora.

O Lítio, considerado um dos elementos-chave da transição energética, é insumo essencial para a produção de baterias recarregáveis de íons de lítio. Essas baterias alimentam desde dispositivos eletrônicos portáteis até veículos elétricos, além de serem fundamentais para o armazenamento de energia renovável em larga escala. A alta densidade de energia, a durabilidade e a capacidade de recarga rápida tornam o Lítio um recurso de valor estratégico crescente (KAVANAGH *et al.*, 2018).

Porém, a produção global de lítio está historicamente concentrada em fontes convencionais: salmouras em salares e pegmatitos (Figura 2) (KESLER *et al.*, 2012). Ambas as fontes apresentam limitações ambientais e econômicas significativas, com preocupações crescentes sobre o consumo de água, os impactos socioambientais nas comunidades locais e a volatilidade dos preços no mercado internacional (IEA, 2025). Esse cenário contribui para o aumento exponencial da demanda, que deve continuar crescendo ao longo das próximas décadas. Projeções indicam que a demanda global por baterias de íons de lítio pode crescer mais de 27% ao ano entre 2022 e 2030. (McKINSEY & COMPANY, 2023).

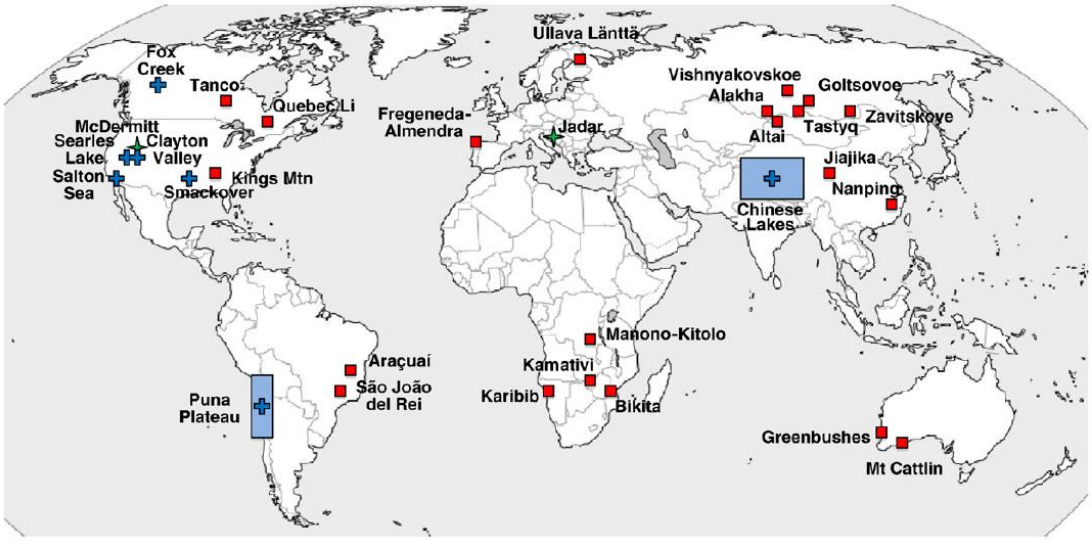

Figura 2 Localização dos principais depósitos de lítio do tipo pegmatito (quadrado) e salmoura (cruz) no mundo. Fonte: Kesler et al. (2012).

O Brasil, reconhecido mundialmente como potência energética em razão de sua vasta produção de petróleo no *Pré-sal*, ainda não se consolidou como produtor de minerais críticos. O Campo de Búzios, localizado na Bacia de Santos, se destaca atualmente como o maior campo produtor de petróleo do país, tendo superado o Campo de Tupi em agosto de 2025 com uma produção de 821,88 mil barris por dia, e com perspectiva de alcançar 1,8 milhão de barris por dia no pico, projetado para 2033 (BARUZZI apud CNN BRASIL, 2025; PETROBRAS, 2025). Apesar de sua relevância, especialistas indicam que campos como Búzios e Mero, atualmente em crescimento, deverão entrar em fase de declínio após atingir o seu pico. Esse cenário levanta questões fundamentais sobre o futuro aproveitamento da

infraestrutura já instalada e a necessidade de planejar alternativas que assegurem a relevância do *Pré-sal* no contexto da transição energética.

Diante desse quadro, as águas de formação coproduzidas em campos de petróleo emergem como alternativa ainda pouco explorada para a obtenção de lítio. Tradicionalmente, essas águas são descartadas ou reinjetadas nos próprios reservatórios, sendo tratadas como subproduto sem valor agregado. Ainda assim, avanços recentes apontam para seu reaproveitamento como fonte de minerais estratégicos (KNAPIK *et al.*, 2023; ETTEHADI *et al.*, 2024). Nos Estados Unidos, empresas e órgãos governamentais já vêm testando a viabilidade de extrair lítio de águas produzidas em campos de petróleo e gás. Projetos-piloto em formações como a *Smackover formation*, nos estados do Arkansa, Louisiana e Texas, além do Golfo do México, e na Bacia do Permiano demonstram que é possível transformar ativos maduros de hidrocarbonetos em fontes alternativas de insumos críticos para a transição energética, com potencial de recuperação de até 90% do lítio presente nas salmouras por métodos eletroquímicos avançados (S&P GLOBAL COMMODITY INSIGHTS, 2024) (Figura 3).



Figura 3 Sonda de perfuração do primeiro poço de lítio da ExxonMobil, sudoeste do Arkansas, EUA, ilustrando o avanço da extração direta de lítio (DLE) a partir de águas de formação em campos de petróleo e gás. Fonte: ExxonMobil apud Upholt (2024, Yale Environment 360).

Replicar essa lógica no Brasil, particularmente no Campo de Búzios, abre um novo horizonte de exploração. Ao invés de se restringir ao papel de produtor de petróleo, o *Pré-sal* pode ser reposicionado como um sistema integrado de energia e recursos

estratégicos, capaz de fornecer hidrocarbonetos, mas também minerais essenciais à transição energética. O Campo de Búzios, pela sua dimensão, pela riqueza dos dados disponíveis e pela singularidade geoquímica de seus reservatórios carbonáticos, configura-se como laboratório natural para testar hipóteses e propor metodologias que poderão ser replicadas em outros campos do *Pré-sal* brasileiro.

Assim, a presente pesquisa busca não apenas avaliar o potencial da extração de Lítio das águas de formação da Formação Itapema, mas também demonstrar que o *Pré-sal* pode ser mais do que uma reserva de petróleo, podendo ser parte da solução energética global.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de extração de lítio das águas de formação da Formação Itapema no Campo de Búzios, Bacia de Santos, a partir de dados químicos da água de 14 poços, utilizando técnica de estatística multivariada e representados espacialmente.

Para o alcance desse objetivo, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. Determinar as concentrações de lítio e os principais parâmetros hidroquímicos das águas de formação dos poços do Campo de Búzios.
2. Aplicar a Análise de Componentes Principais (PCA) para identificar os principais fatores que controlam a variabilidade geoquímica das águas de formação e sua relação com o enriquecimento em lítio;
3. Avaliar a viabilidade de extração de lítio nos poços estudados com base em critérios estabelecidos na literatura, incluindo concentração mínima de 100 mg/L e razões Mg^{2+}/Li^{+} e Ca^{2+}/Li^{+};
4. Mapear a distribuição espacial das variáveis geoquímicas mais relevantes no Campo de Búzios, identificando as regiões com maior potencial para extração.

3. CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1 A Bacia de Santos

A Bacia de Santos (Figura 4) abrange uma área de aproximadamente 350.000 km², com seu maior eixo disposto paralelamente ao litoral dos estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Santa Catarina, entre os paralelos 23° e 28°S, estendendo-se em direção ao mar até cotas batimétricas de aproximadamente 3.000 m (Moreira *et al.*, 2007). De acordo com Moreira *et al.* (2007), a bacia é limitada a norte pelo Alto de Cabo Frio, fronteira com a Bacia de Campos, e a sul pelo Alto de Florianópolis, que a separa da Bacia de Pelotas. O limite oeste é definido pelas serras costeiras, compreendendo o Maciço da Carioca, a Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira, enquanto o limite leste se estende até o sopé do Platô de São Paulo (MACEDO, 1989).

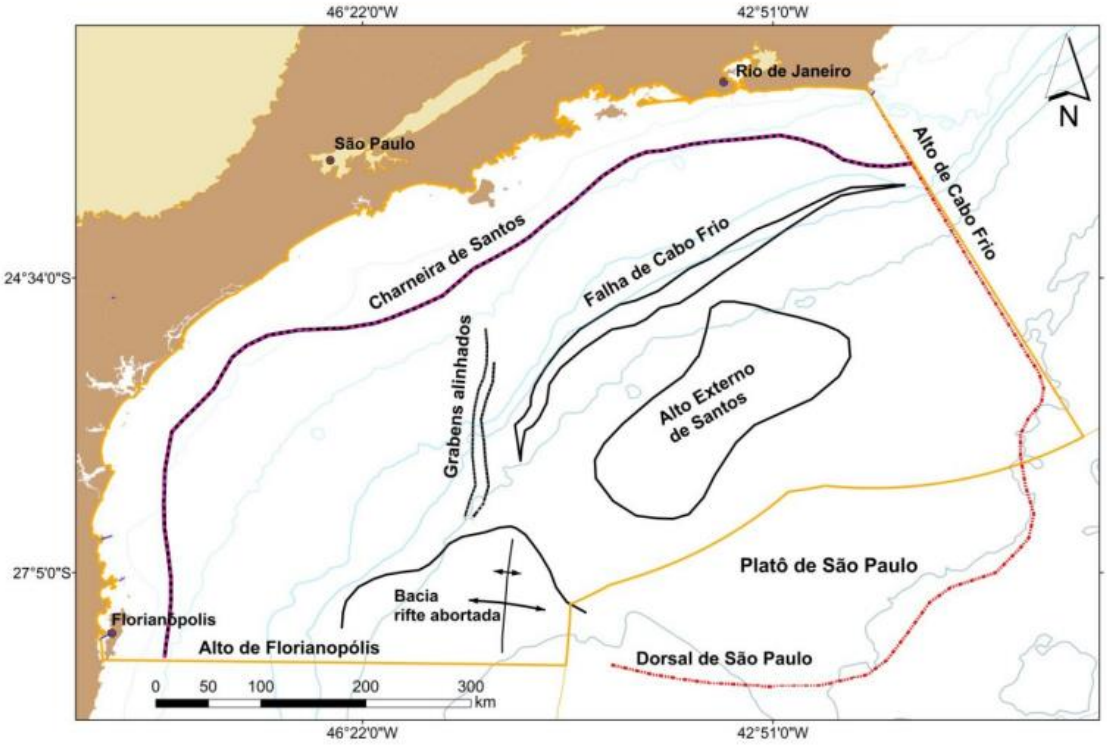

Figura 4 Mapa de localização da Bacia de Santos com os principais elementos do seu arcabouço estrutural regional. Fonte: Garcia et al. (2012), modificado de ANP (2017).

O processo de fragmentação do Gondwana e a consequente abertura do Oceano Atlântico Sul, iniciados no Cretáceo Inferior, constituem os principais condicionantes da evolução tectono-sedimentar da Bacia de Santos (MOREIRA *et al.*, 2007). A sucessão sedimentar resultante pode ser compartimentada em quatro estágios

evolutivos distintos: (i) estágio pré-rifte, de natureza continental; (ii) estágio rifte, caracterizado pelo desenvolvimento de sistemas lacustres continentais; (iii) estágio proto-oceânico, marcado por condições de golfo restrito e expressiva deposição de evaporitos; e (iv) estágio de margem passiva (drift), inserido em contexto de oceano aberto, com a instalação de plataformas carbonáticas progressivamente substituídas por sequências terrígenas (RICCOMINI *et al.*, 2012), a evolução estratigráfica da bacia está sumarizada na Carta Cronoestratigráfica apresentada na Figura 5 e 6.

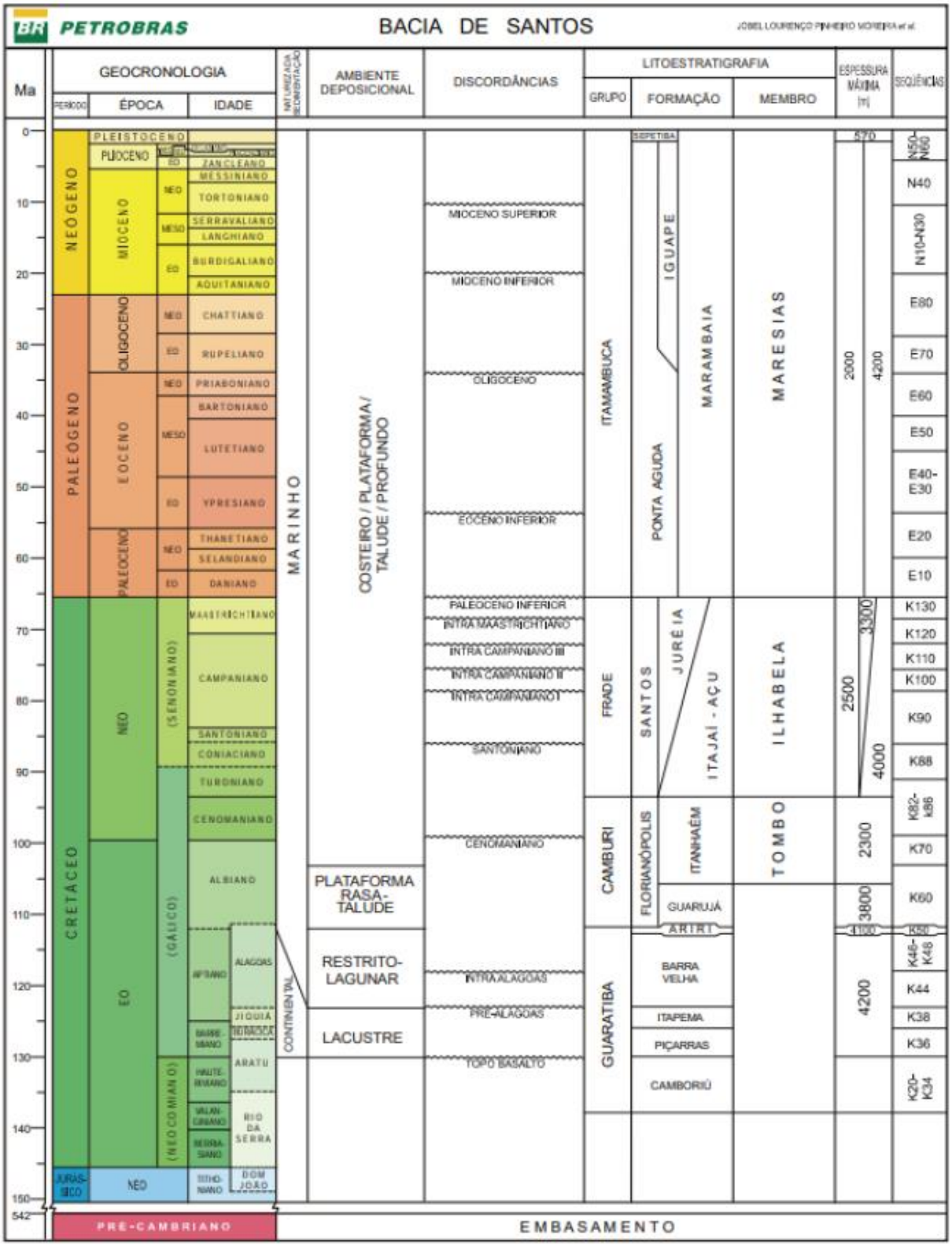

Figura 5 Carta Cronoestratigráfica da Bacia de Santos. Fonte: Moreira et al. (2007).

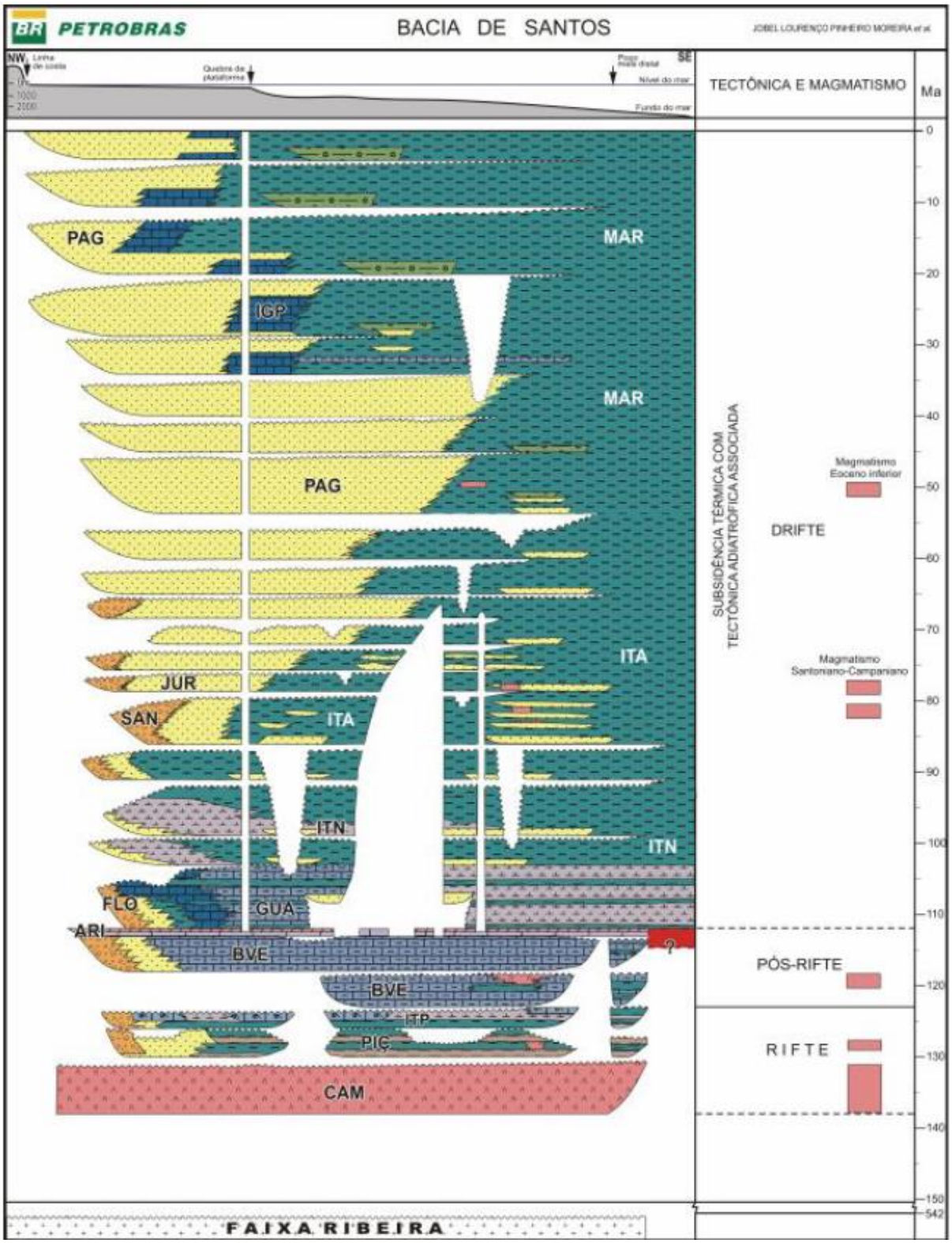

Figura 6 Carta Cronoestratigráfica da Bacia de Santos. Fonte: Moreira et al. (2007).

3.2 O Campo de Búzios

Situado na feição estrutural regional conhecida como Alto Externo da Bacia de Santos (Figura 7), o Campo de Búzios encontra-se a aproximadamente 180 km do litoral do Rio de Janeiro, em lâminas d'água superiores a 2.000 m.

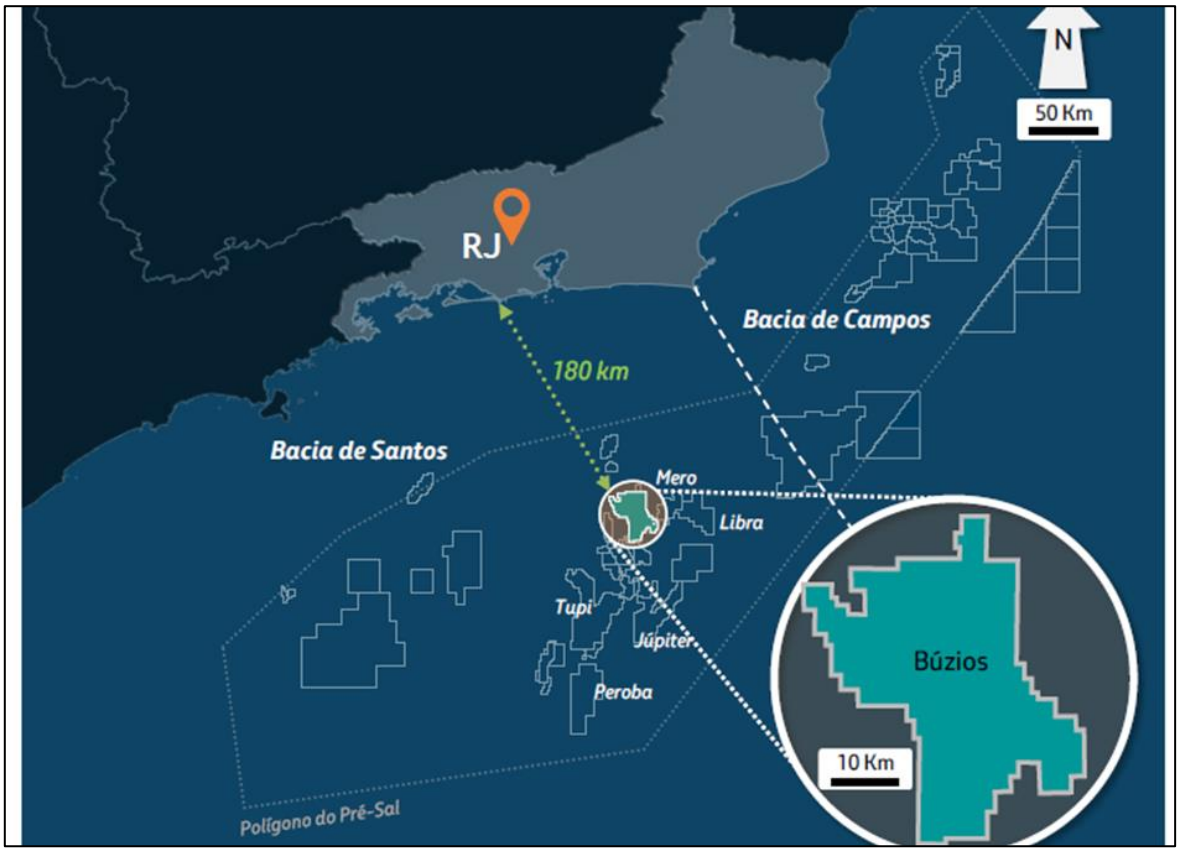

Figura 7 Localização do Campo de Búzios na Bacia de Santos. Fonte: Guerrero *et al.* (2024).

O campo está inserido no contexto tectono-sedimentar da Bacia de Santos, cuja evolução está relacionada à abertura do Atlântico Sul durante o Cretáceo Inferior. O arcabouço estrutural da bacia foi desenvolvido durante um regime de rifteamento oblíquo com componente sinistral, resultando na formação de falhas distensionais e zonas de transferência que controlam a arquitetura estrutural regional. Essa configuração estrutural é frequentemente descrita como o padrão conhecido como “S de Santos”, responsável por influenciar a distribuição dos principais depocentros e a organização dos depósitos sedimentares do *Pré-sal* (GUERRERO *et al.*, 2024).

Segundo Guerrero *et al.* (2024), a sucessão estratigráfica (Figura 8) associada aos reservatórios do campo inclui unidades formadas durante as fases rifte e pós-rifte da

evolução da bacia. Na base da seção ocorre o embasamento representado pelos derrames basálticos da Formação Camboriú, relacionados ao início da fragmentação continental. Sobre esse intervalo deposita-se a Formação Piçarras, composta predominantemente por sedimentos continentais que registram as primeiras etapas de preenchimento da bacia durante a fase rifte. Acima dessa unidade ocorre a Formação Itapema, correspondente à sequência K38, caracterizada por depósitos carbonáticos lacustres associados ao sistema rifte. Esses depósitos apresentam forte controle estrutural, refletindo a influência das falhas ativas e das zonas de transferência na distribuição das espessuras sedimentares e dos ambientes deposicionais. Sobrepostos aos depósitos da Formação Itapema encontram-se os carbonatos lacustres da Formação Barra Velha, associados às sequências K44 e K46/K48, que constituem o principal intervalo reservatório do campo de Búzios. Esses depósitos incluem litologias como estromatólitos, grainstones intraclásticos e esferulíticos, formados em ambientes lacustres rasos com ampla distribuição areal. As propriedades petrofísicas desses carbonatos resultam da interação entre processos deposicionais e diagenéticos, que controlam a geração e preservação da porosidade e permeabilidade no sistema reservatório. O intervalo reservatório apresenta subdivisões estratigráficas controladas por importantes superfícies regionais, como a Discordância Pré-Alagoas e a Discordância Intra-Alagoas, que delimitam diferentes zonas estratigráficas dentro das formações Barra Velha e Itapema e exercem controle na compartimentação vertical dos reservatórios e no fluxo de fluidos. Com o término da fase rifte ocorre a transição para um regime de subsidência térmica característico da fase sag da bacia, seguido pela deposição da seção evaporítica da Formação Ariri, que atua como selo regional do sistema petrolífero do *Pré-sal* da Bacia de Santos.

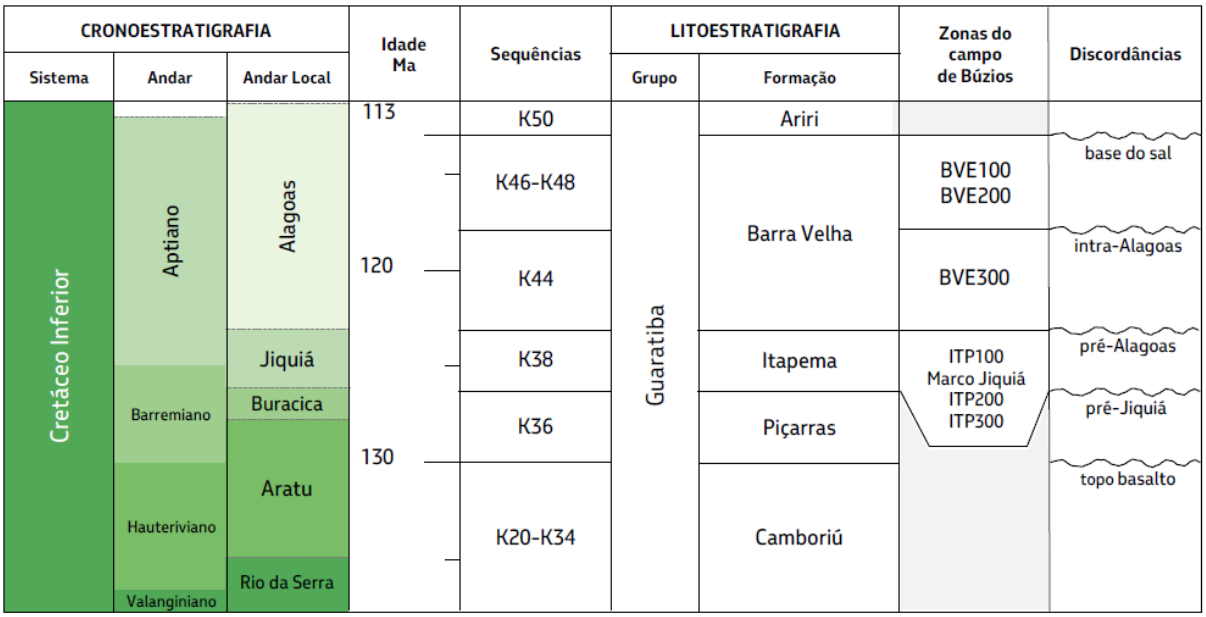

Figura 8 Carta estratigráfica com ênfase no Cretáceo Inferior, Bacia de Santos. Fonte: adaptado de Moreira et al. (2007) e Beurlen et al. (2007).

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 O Lítio como Elemento Químico e sua Distribuição Natural

O lítio é o terceiro elemento da tabela periódica e o mais leve dos metais alcalinos, representado pelo símbolo Li (Figura 9). Sua elevada reatividade química impede que ocorra na natureza em estado elementar, sendo encontrado combinado em minerais ou dissolvido em soluções aquosas (SPEIRS *et al.*, 2014).

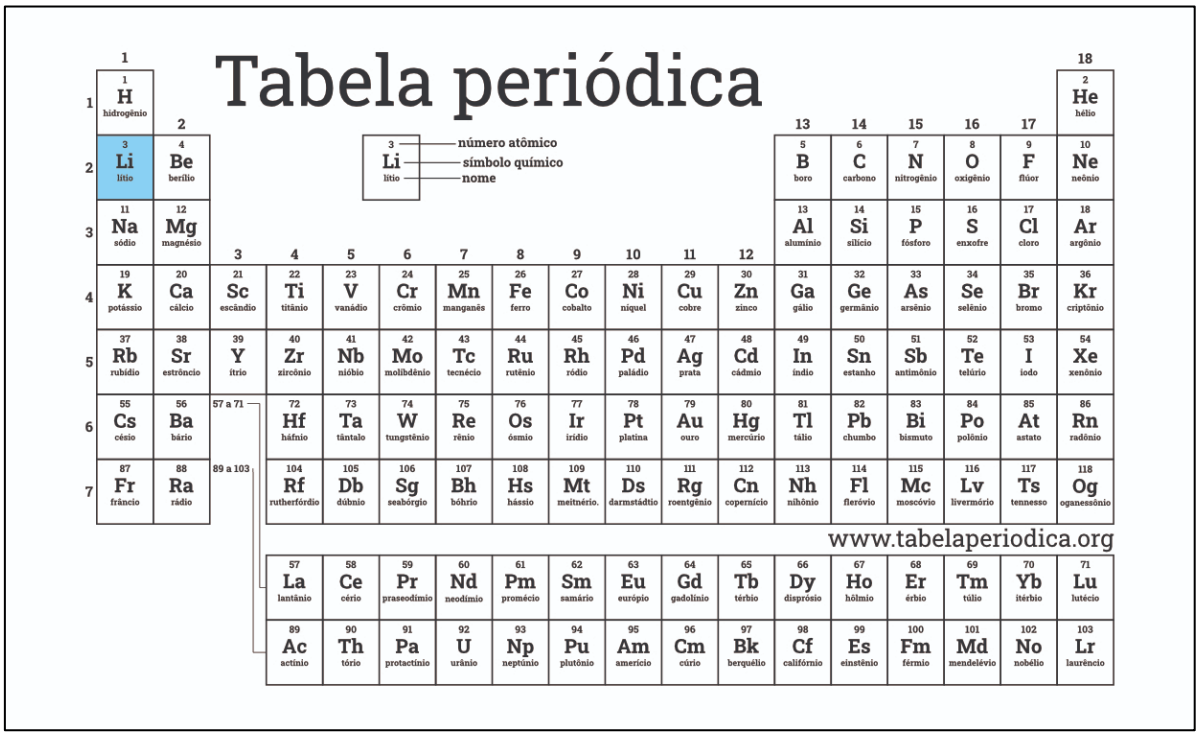

Figura 9 Tabela periódica com destaque para o lítio (Z = 3), pertencente ao Grupo dos metais alcalinos. Fonte: tabelaperiodica.org (2026).

O lítio possui elevado potencial eletroquímico e alta capacidade de armazenamento de energia química, propriedades diretamente ligadas à sua estrutura eletrônica e que explicam sua centralidade em sistemas de baterias recarregáveis (KAVANAGH *et al.*, 2018).

Na crosta terrestre, o elemento ocorre de forma dispersa, em concentrações da ordem de dezenas de ppm na maioria das rochas (BRADLEY *et al.*, 2013). Sua concentração em níveis economicamente exploráveis depende de contextos geológicos específicos: pegmatitos graníticos, bacias evaporíticas continentais e salmouras profundas, onde atuam mecanismos como diferenciação magmática, interação água-rocha e evaporação (KESLER *et al.*, 2012).

Mais recentemente, as águas de formação coproduzidas em reservatórios petrolíferos passaram a ser investigadas como fonte alternativa. Nessas salmouras profundas, o lítio ocorre dissolvido, enriquecido pela interação prolongada entre fluidos e rochas em subsuperfície (DAITCH, 2018).

4.2 Demanda e Aplicações do Lítio no Mercado Global

O lítio tem usos industriais consolidados: cerâmicas, vidros, graxas lubrificantes e compostos farmacêuticos, mas foi a expansão das baterias recarregáveis que transformou sua posição no mercado global (Figura 10). As baterias de íons de lítio, em particular, tornaram-se o principal destino do elemento nas últimas décadas (KESLER *et al.*, 2012).

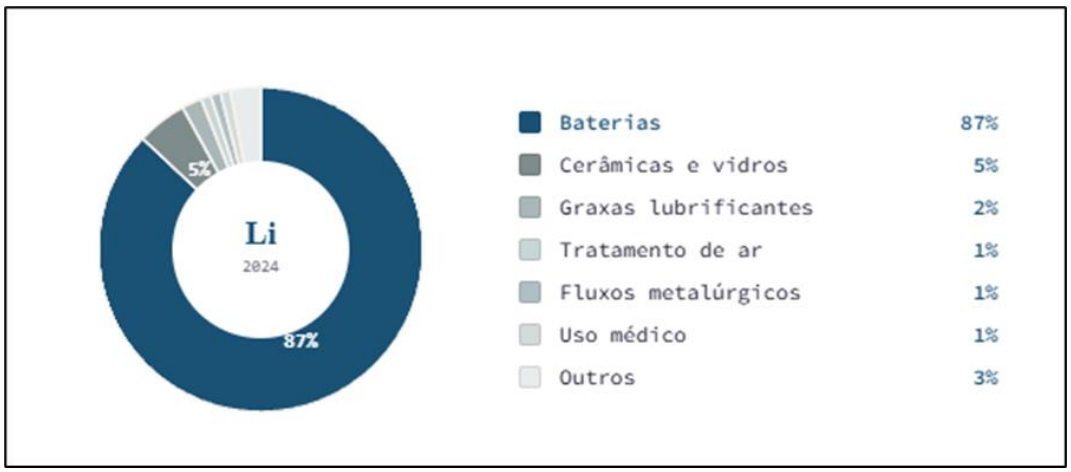

Figura 10 Distribuição percentual dos usos globais do lítio em 2024. Fonte: Adaptado de USGS (2025).

A elevada densidade energética e a eficiência de carga das baterias de íons de lítio impulsionaram sua adoção em dispositivos eletrônicos portáteis, veículos elétricos e sistemas estacionários de armazenamento, setores que respondem hoje pela maior parte da demanda global pelo elemento (MARTIN *et al.*, 2017; KESLER *et al.*, 2012). Projeções indicam crescimento contínuo dessa demanda nas próximas décadas, associado principalmente à eletrificação do transporte e à expansão de fontes renováveis intermitentes (MARTIN *et al.*, 2017).

Usos industriais tradicionais como cerâmicas, vidros, graxas lubrificantes e fluxos metalúrgicos ainda representam parcela relevante do consumo, embora sua participação relativa venha diminuindo frente ao crescimento do setor de baterias (JASKULA, 2018).

4.3 O Lítio como Mineral Estratégico

Diversos países e organismos internacionais classificam o lítio como mineral crítico, definido como de alta importância econômica e tecnológica com risco potencial de interrupção no fornecimento (IEA, 2021). Essa classificação reflete tanto a centralidade do elemento na transição energética quanto a vulnerabilidade da cadeia de suprimentos: Austrália, Chile, China e Argentina concentram a maior parte da produção mundial (Figura 11), o que expõe os países importadores a riscos geopolíticos e de abastecimento (KESLER *et al.*, 2012).

A União Europeia, por exemplo, reconhece formalmente o lítio como matéria-prima crítica para o desenvolvimento de tecnologias de neutralidade climática (EUROPEAN COMMISSION, 2020) postura que se repete em diferentes formas em blocos econômicos da Ásia e das Américas (IEA, 2021).

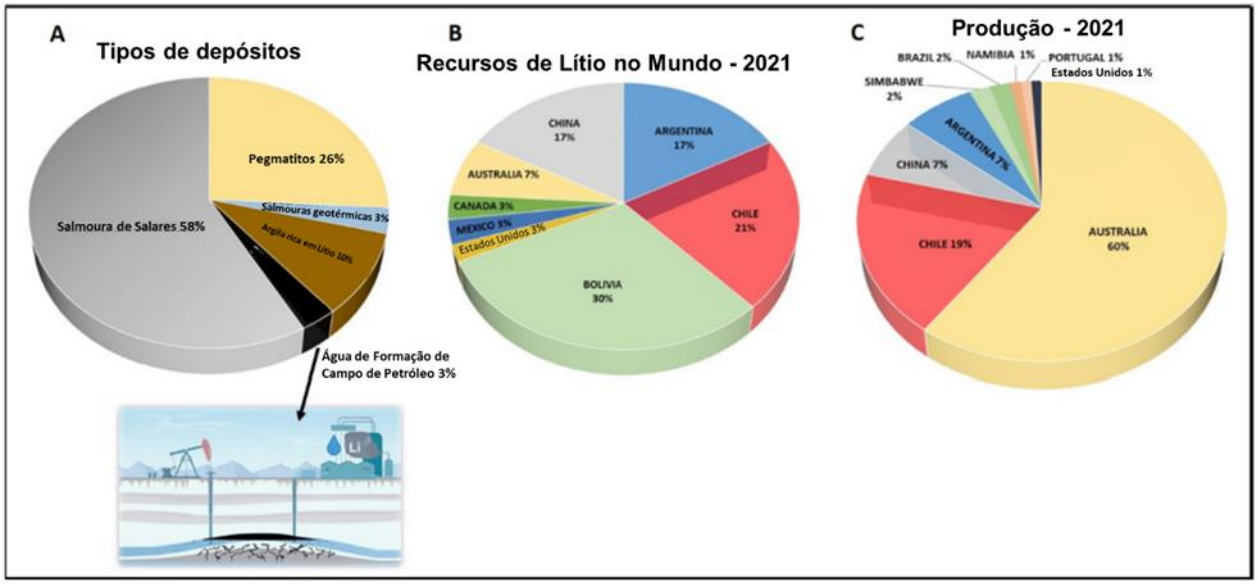

Figura 11 Distribuição percentual dos tipos de depósitos de lítio; (B) recursos globais de lítio por país em 2021; (C) produção global de lítio por país em 2021. Adaptado de Gutiérrez et al. (2022).

4.4 Recursos e Produção de Lítio: Pegmatitos e Salmouras

A produção comercial de lítio concentra-se em dois tipos de depósito: depósitos pegmatitos e salmouras em salares (KESLER *et al.*, 2012).

Nos pegmatitos, o lítio ocorre em minerais silicáticos, espodumênio, lepidolita e petalita cristalizados nas etapas finais da diferenciação magmática. A Mina de Greenbushes, na Austrália Ocidental (Figura 12), é o maior exemplo em operação: o minério é extraído por lavra a céu aberto, beneficiado e convertido quimicamente em carbonato ou hidróxido de lítio (KESLER *et al.*, 2012)



Figura 12 Vista sul sobre a cava principal da Mina de Greenbushes a partir do mirante público, Austrália Ocidental. Fonte: ORDERINCHAOS (2022). Wikimedia Commons. Licença CC BY-SA 4.0. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Greenbushes_mine_lookou

Os depósitos de salmouras (Figura 13) representam uma das principais fontes de produção de lítio no mundo. Esses depósitos são geralmente encontrados em bacias endorreicas localizadas em regiões áridas, onde processos de evaporação intensa levam à concentração progressiva de sais dissolvidos em águas subterrâneas. Em ambientes como os salares andinos da América do Sul, as salmouras podem atingir concentrações elevadas de lítio, permitindo sua extração por meio de processos de evaporação solar seguidos de etapas de purificação química (BRADLEY *et al.*, 2013).



Figura 13 Operação de extração de lítio no Salar de Salinas Grandes, província de Jujuy, Argentina. Fonte: Dominish, Florin e Teske (2019).

Além dessas fontes tradicionais, estudos recentes têm investigado o potencial de outras fontes de lítio, incluindo argilas ricas em lítio, salmouras geotérmicas e águas produzidas associadas à indústria de petróleo e gás. Nessas águas, o elemento pode ocorrer dissolvido em salmouras profundas, cuja composição química resulta de interações prolongadas entre fluidos e rochas em ambientes sedimentares profundos (DAITCH, 2018).

4.5 Extração direta de lítio (Direct Lithium Extraction – DLE)

A extração direta de lítio, ou *Direct Lithium Extraction* (DLE) (Figura 14) é um processo capaz de recuperar seletivamente o lítio diretamente de salmouras, sem a necessidade de extensas etapas de evaporação solar tradicionalmente utilizadas na indústria (SOLIĆ, 2024).

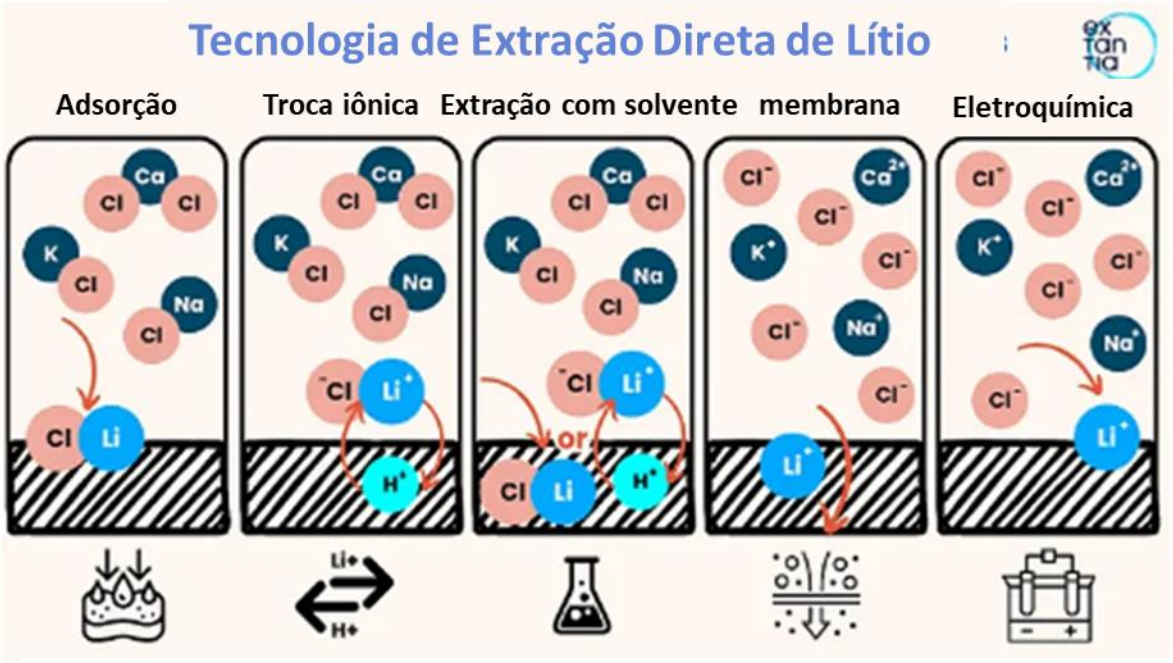

Figura 14 Principais tecnologias de extração direta de lítio (DLE): adsorção, troca iônica, extração por solvente, membrana e eletroquímica. Fonte: Adaptado de WERNY et al. (2023, online).

Nos métodos convencionais de produção de lítio a partir de salmouras, a extração ocorre por meio da evaporação solar em grandes lagoas, onde a água é gradualmente evaporada até que os sais dissolvidos atinjam concentrações suficientes para a precipitação de compostos de lítio. Esse processo pode levar dias ou meses para ser concluído, dependendo fortemente de condições climáticas favoráveis, com elevada radiação solar e baixa precipitação (KESLER *et al.*, 2012). Essa comparação é esquematizada na Figura 15.

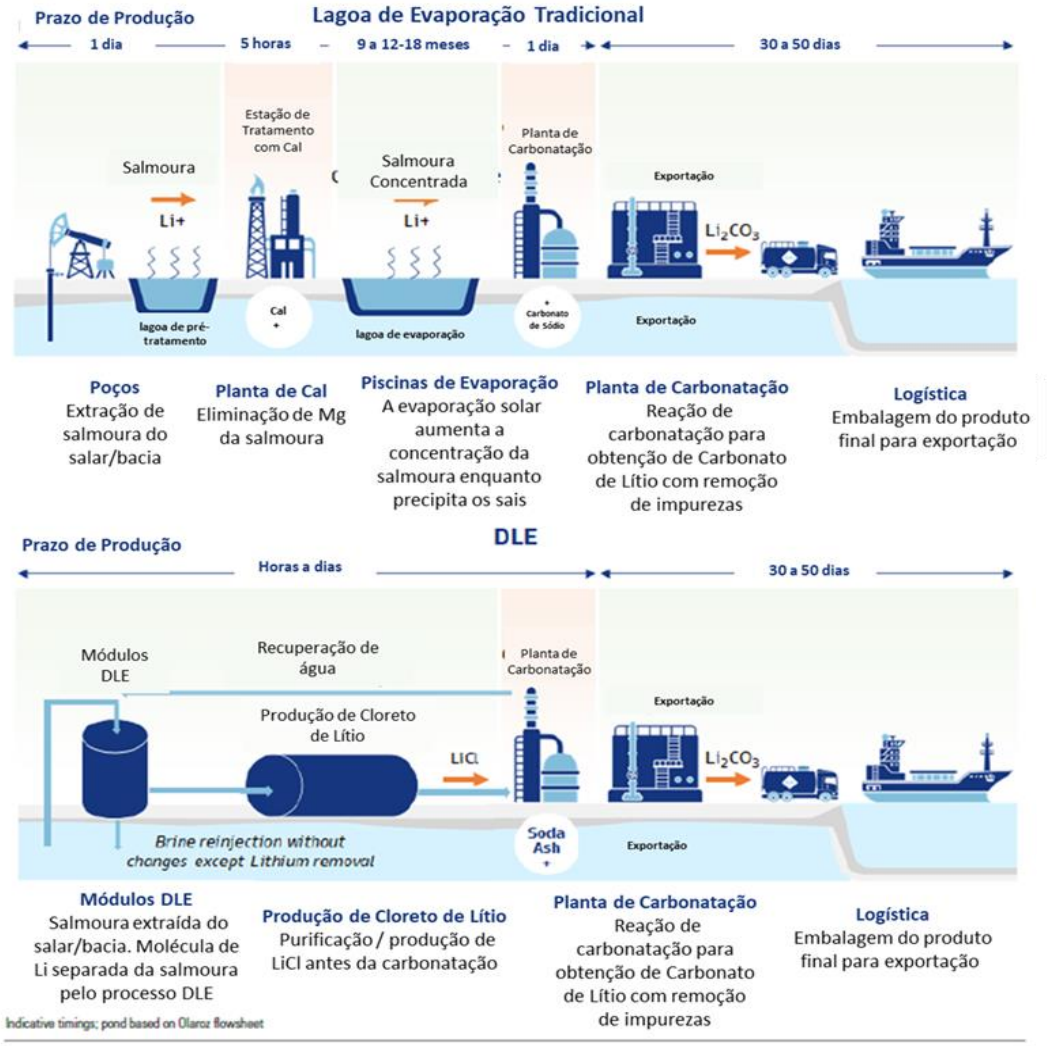

Figura 15 Comparação esquemática entre o processo convencional de extração de lítio por evaporação em lagoas (Lagoa de Evaporação Tradicional) e o processo de extração direta de lítio (DLE). Fonte: Adaptado de Goldman Sach (2023).

As tecnologias de DLE recuperam o lítio diretamente da salmoura, sem evaporação solar, por meio de quatro abordagens principais: adsorção seletiva, troca iônica, separação por membranas e métodos eletroquímicos (SOLIĆ, 2024). Na adsorção, a mais estudada para águas de formação, materiais com estrutura cristalina específica incorporam o íon Li^+ seletivamente, liberando-o posteriormente por eluição. A seletividade do processo é crítica em salmouras com alta razão Mg^{2+}/Li^+, como as analisadas neste estudo, onde magnésio e cálcio competem diretamente com o lítio nos sítios adsorventes (KNAPIK *et al.*, 2023).

A principal vantagem operacional do DLE frente à evaporação convencional é o tempo de processamento, horas a dias contra meses ou anos (SOLIĆ, 2024). Essas características tornam o DLE particularmente adequado para a coprodução de lítio em

campos de petróleo e gás, onde a infraestrutura já existe e a salmoura é gerada como subproduto da produção de hidrocarbonetos (DAITCH, 2018).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Como material, para o estudo desse trabalho, foi utilizado dados geoquímicos de 14 poços do Campos de Búzios (Figura 16), fornecidos pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

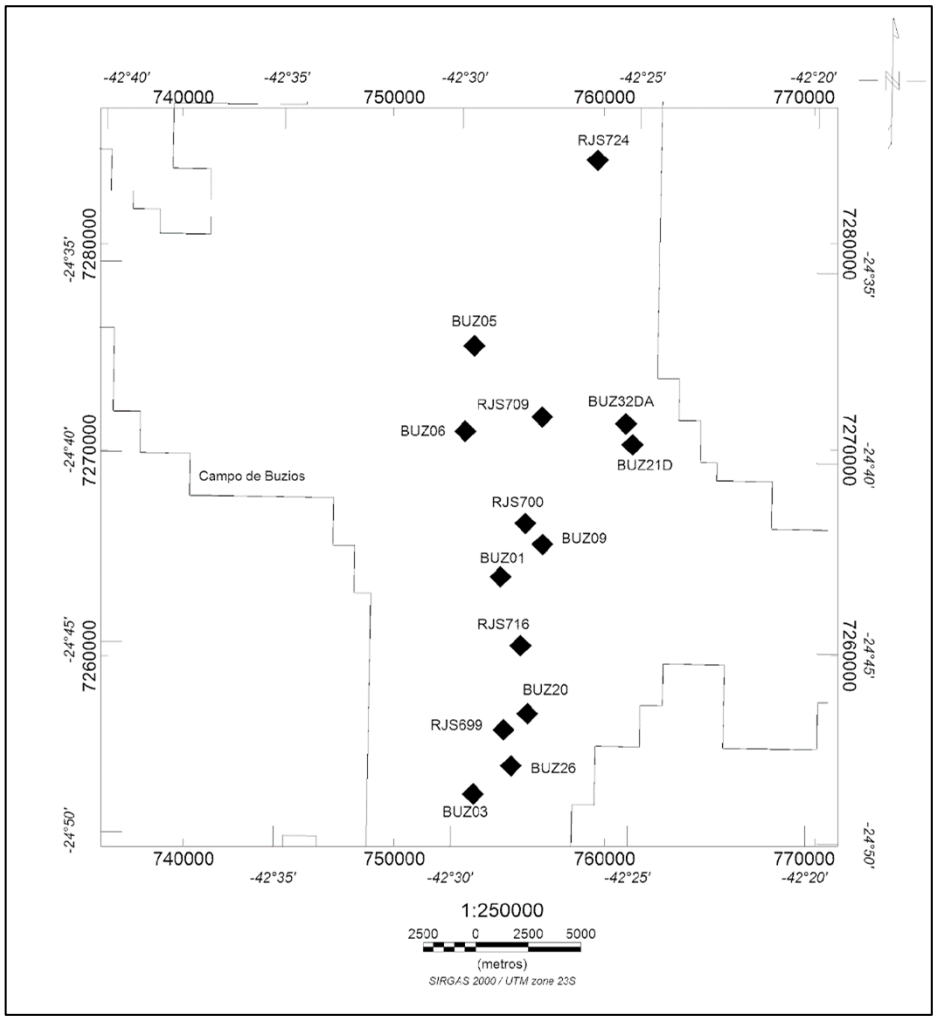

Figura 16 Localização dos 14 poços utilizados no estudo, Campo de Búzios, Bacia de Santos. Sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Escala 1:250.000. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A metodologia desse trabalho seguiu a estrutura mostrada no fluxograma abaixo (Figura 17), e sua explicação mais detalhadamente encontra-se nos tópicos seguintes.

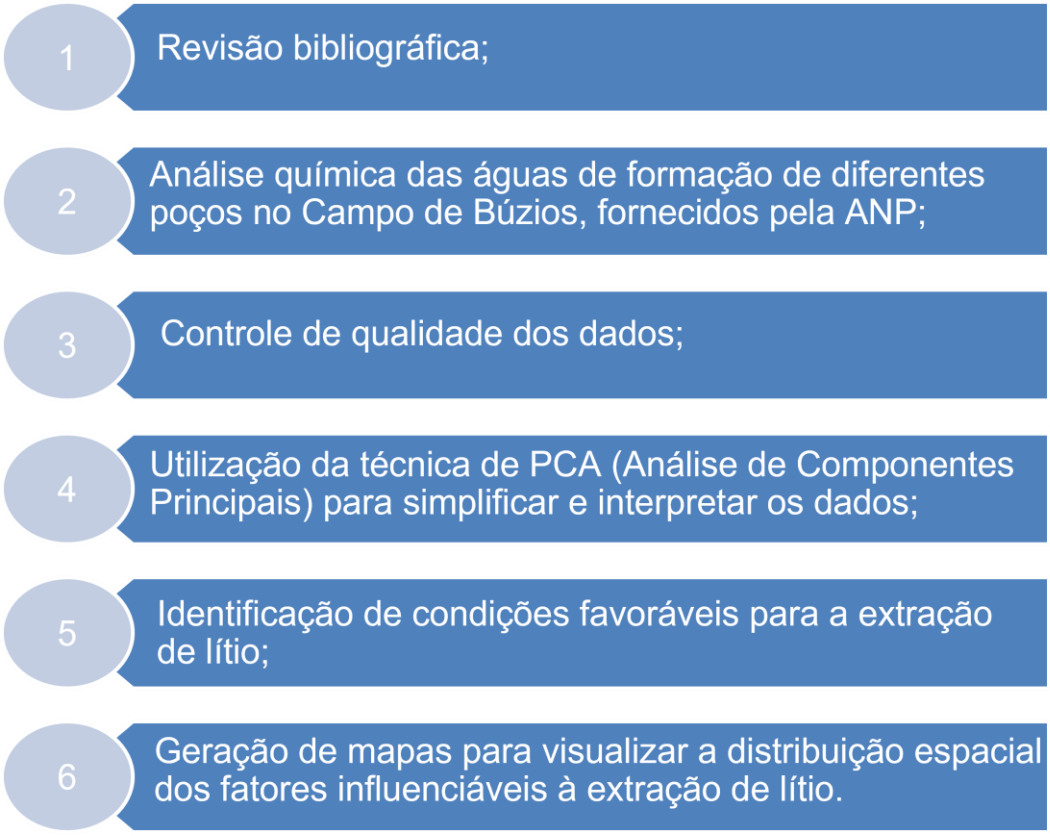

Figura 17 Fluxograma das etapas metodológicas adotadas no estudo. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.1 Revisão bibliográfica

A primeira etapa consistiu em uma revisão bibliográfica abrangente sobre a extração de lítio em diferentes contextos, com foco em salmouras naturais, pegmatitos e, mais recentemente, águas de formação associadas à produção de hidrocarbonetos. Foram consultados artigos científicos e relatórios técnicos.

5.2 Análise química das águas de formação

Na segunda etapa, foram reunidos os dados químicos das águas de formação provenientes de diferentes poços localizados no Campo de Búzios, disponibilizados pela ANP. As variáveis consideradas incluíram cátions e ânions principais (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-}), além do lítio (Li^+), elemento de interesse central desta

investigação, assim como elementos físico químicos. Os dados foram organizados em planilhas para posterior tratamento estatístico e espacial.

5.3 Controle de qualidade de dados

A terceira etapa foi dedicada ao controle de qualidade, a fim de eliminar inconsistências e valores discrepantes que poderiam comprometer a análise. Foram realizadas estatísticas descritivas e análises exploratórias para identificar outliers. Nesse processo, também foi realizada a separação sistemática entre variáveis de natureza hidroquímica e parâmetros físico-químicos, de modo a estruturar adequadamente as bases utilizadas nas análises subsequentes.

5.4 Utilização da técnica de PCA

Na quarta etapa, aplicou-se a Análise de Componentes Principais (PCA), técnica estatística multivariada. Essa abordagem permitiu reduzir a dimensionalidade dos dados, destacando os componentes que mais contribuem para a variabilidade observada.

5.5 Identificação de condições favoráveis para extração de lítio

Com base nos resultados da PCA e na avaliação direta das concentrações, foram estabelecidos critérios de seleção das áreas mais favoráveis à extração. Os principais parâmetros considerados foram: concentrações de lítio superiores a 100 mg/L (KNAPIK *et al.*, 2023), baixos valores de HQ2 (segunda componente principal dos elementos hidroquímicos), além de razões Mg/Li e Ca/Li baixos, uma vez que magnésio e cálcio podem dificultar a eficiência dos processos de separação do lítio.

5.6 Geração de mapas para visualizar a distribuição espacial dos fatores influenciáveis a extração de Lítio

A última etapa consistiu na elaboração de mapas temáticos que representassem a distribuição espacial das variáveis mais relevantes. Foram produzidos mapas de concentração de lítio, razões Mg/Li e Ca/Li, além de mapas de espessura da Formação Itapema e de gradiente de pressão. Esses mapas permitiram visualizar

padrões regionais no Campo de Búzios avaliar sobre o potencial de extração de lítio na região.

6. RESULTADOS

A análise geoquímica das águas de Formação do Campo de Búzios possibilitou identificar padrões relacionados à presença e à distribuição espacial do lítio. Foram analisados dados de 14 poços disponibilizados pela ANP, considerando que, em alguns casos, havia informações de água em diferentes profundidades no mesmo poço. Para uniformizar o conjunto, calculou-se a média das concentrações, obtendo-se um valor representativo único por poço.

Em seguida, avaliaram-se as amostras provenientes tanto da Formação Barra Velha quanto da Formação Itapema. Verificou-se que os valores de concentração de lítio na Formação Barra Velha eram expressivamente mais baixos, razão pela qual o estudo foi restrito aos dados da Formação Itapema. O tratamento subsequente incluiu a avaliação da consistência interna do conjunto, a exclusão dos poços 3-RJS-724 e 9-BUZ-1-RJS, cujas concentrações se encontravam abaixo do limiar mínimo de 100 mg/L estabelecido na literatura (KNAPIK *et al.*, 2023), e a remoção do poço 9-BUZ-3-RJS, identificado como outlier em razão de valores muito superiores à média geral. Após essas etapas, o conjunto final foi composto por dez poços representativos, distribuídos em diferentes setores do campo.

6.1 Análise de Componentes Principais (PCA) — Parâmetros Hidroquímicos

A Análise de Componentes Principais (PCA) foi aplicada ao conjunto de variáveis hidroquímicos com o objetivo de reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar os fatores que mais contribuem para a variabilidade observada entre os poços

O Scree Plot (Figura 18) evidenciou que os dois primeiros componentes principais, HQ1 e HQ2, explicam conjuntamente 56,47% da variância total dos dados, HQ1 com 32,48% e HQ2 com 23,99%, sendo considerados suficientes para a análise. Os demais componentes apresentaram contribuição marginal e não foram interpretados.

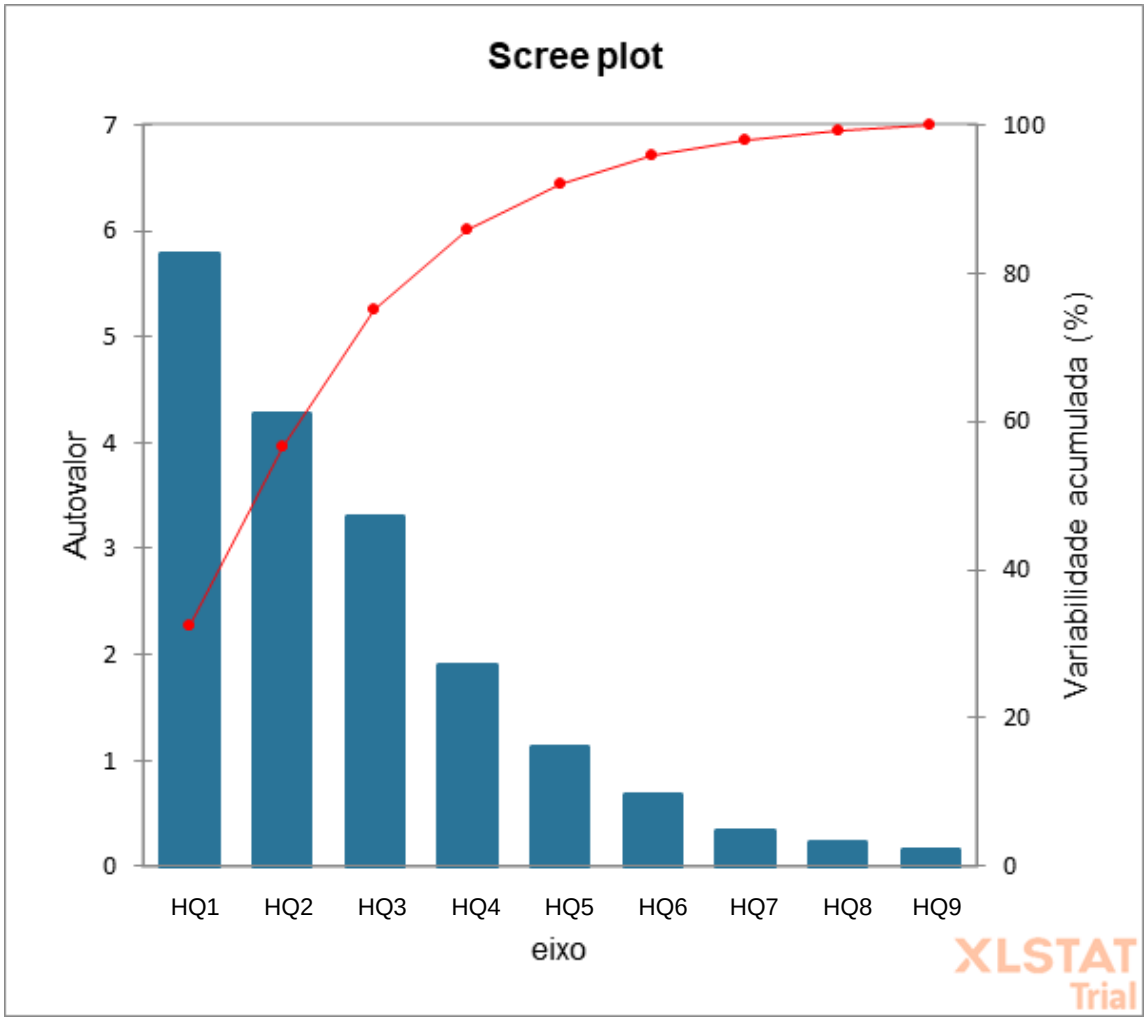

Figura 18 Scree Plot dos componentes principais hidroquímicos (HQ1 a HQ9), com destaque para os componentes HQ1 e HQ2, responsáveis por 56% da variância total dos dados. Fonte: Elaborado pela Autora (2025).

O componente HQ1 apresentou correlação positiva com sódio (Na^+), potássio (K^+) e cloreto (Cl^-), sendo interpretado como representativo da salinidade da água de formação. O componente HQ2, por sua vez, revelou associação positiva com magnésio (Mg^{2+}), boro (B^{3+}) e cálcio (Ca^{2+}), e correlação negativa com lítio (Li^+), conforme evidenciado no círculo de correlações (Figura 19). Essa relação inversa indica que, à medida que os valores de HQ2 diminuem, as concentrações de lítio tendem a aumentar.

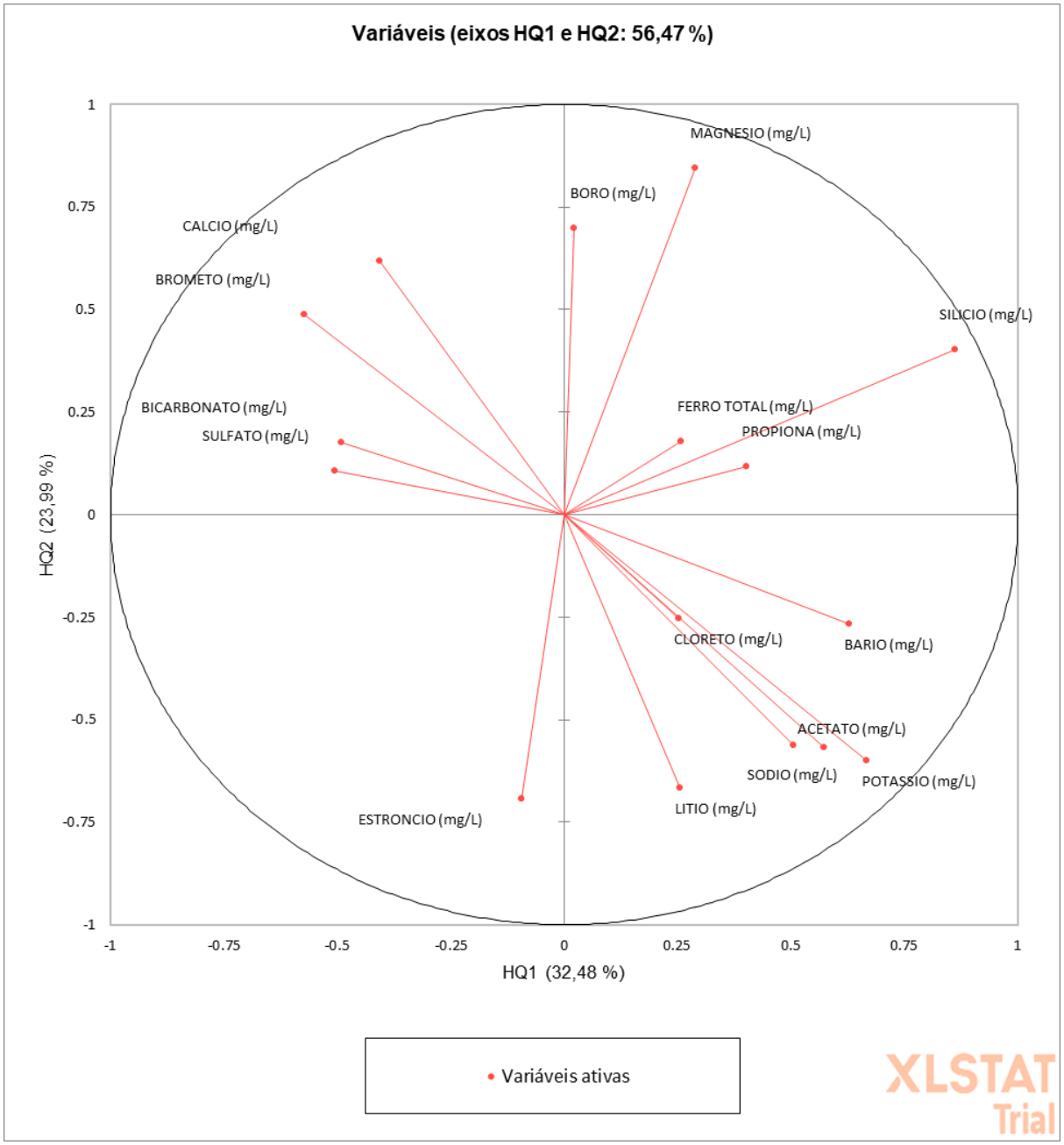

Figura 19 Círculo de correlações da Análise de Componentes Principais (PCA) hidroquímica, exibindo a contribuição e a direção das variáveis nos componentes HQ1 e HQ2.

6.2 Análise de Componentes Principais (PCA) — Parâmetros Físico-Químicos

A PCA foi também aplicada ao conjunto de parâmetros físico-químicos. O Scree Plot (Figura 20) indicou que os dois primeiros componentes, FQ1 e FQ2, explicam 73% da variância total, FQ1 com 52,69% e FQ2 com 20,31%.

O componente FQ1 apresentou correlação positiva com pH, salinidade e alcalis totais, sendo associado à salinidade e à acidez da água (pH médio de 6,6). O

componente FQ2 evidenciou relação inversa entre balanço iônico e densidade da água.

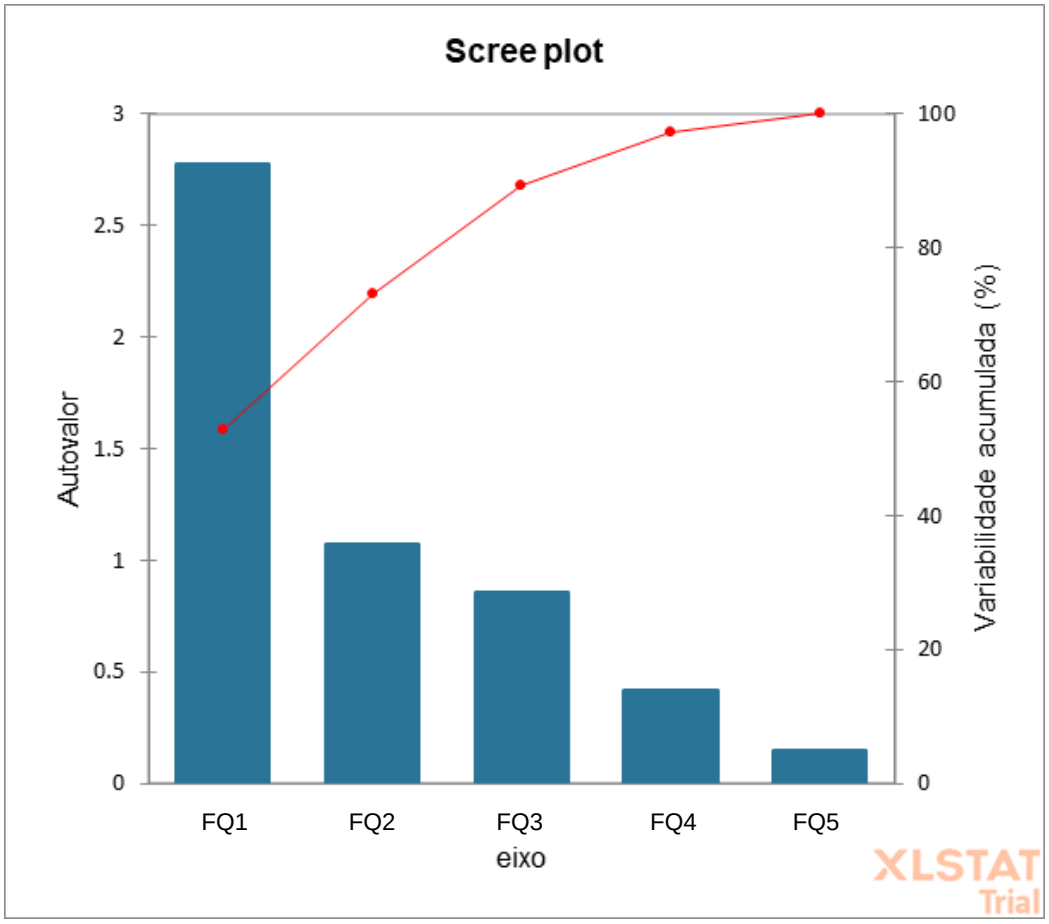

Figura 20 Scree Plot e círculo de correlações da Análise de Componentes Principais (PCA) físico-química, indicando a variância explicada por cada componente e a contribuição das variáveis nos componentes FQ1 (52,69%) e FQ2 (20,31%), responsáveis por 73% da variância total dos dados. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

6.3 Concentrações de Lítio nos Poços

As concentrações de lítio nos dez poços analisados situam-se entre 113 mg/L e 257 mg/L. A Tabela 1 apresenta os valores de concentração de lítio, valores dos componentes HQ1 e HQ2, e as razões Mg^{2+}/Li^{+} e Ca^{2+}/Li^{+} para os dez poços selecionados.

Tabela 1 Concentrações de lítio (mg/L), escores dos componentes principais HQ1 e HQ2, e razões Mg^{2+}/Li^{+} e Ca^{2+}/Li^{+} dos dez poços selecionados para análise no Campo de Búzios, Formação Itapema. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

BR	ANP	Poço	Li (mg/L)	HQ1	HQ2	Mg/Li	Ca/Li
RJS699	BRSA-1053	3-RJS-699	113	0.68	2.46	7.93	66.09
RJS700	BRSA-1064	3-RJS-700	121	-0.29	1.96	8.24	70.25
RJS709	BRSA-1159	9-RJS-709	118	-0.55	1.55	6.78	72.50
BUZ05	BUZ05	8-BUZ-5-RJS	131	-5.47	-3.02	4.15	61.20
BUZ06	BUZ06	7-BUZ-6-RJS	131	-2.34	2.03	7.63	73.41
BUZ09	BUZ09	8-BUZ-9-RJS	131	-0.36	0.64	6.92	62.60
BUZ20	BUZ20	8-BUZ-20-RJS	200	2.19	-2.16	3.74	34.30
BUZ21D	BUZ21D	8-BUZ-21D-RJS	144	3.59	-2.00	5.77	54.38
BUZ26	BUZ26	8-BUZ-26-RJS	257	0.74	-2.61	2.43	23.68
BUZ32DA	BUZ32DA	8-BUZ-32DA-RJS	121	1.81	1.14	7.73	67.72

O poço 8-BUZ-26-RJS registrou a maior concentração de lítio do conjunto, com 257 mg/L, acompanhada de valor negativo de HQ2 (−2,61), escore positivo de HQ1 (0,74) e razões Mg^{2+}/Li^{+} de 2,43 e Ca^{2+}/Li^{+} de 23,68. O poço 8-BUZ-20-RJS apresentou concentração de 200 mg/L, com HQ1 de 2,19 e HQ2 de −2,16, e razões Mg^{2+}/Li^{+} de 3,74 e Ca^{2+}/Li^{+} de 34,30. O poço 8-BUZ-21D-RJS registrou 144 mg/L, com HQ1 de 3,59 e HQ2 de −2,00, e razões Mg^{2+}/Li^{+} de 5,77 e Ca^{2+}/Li^{+} de 54,38. O poço 9-RJS-709, apesar de exibir valor negativo de HQ2 (−0,55), apresentou razões Mg^{2+}/Li^{+} e Ca^{2+}/Li^{+} elevadas, de 6,78 e 72,50, respectivamente.

6.4 Distribuição Espacial e Mapas Geoquímicos

A distribuição espacial das variáveis geoquímicas foi representada em mapas de concentração gerados no Geosoft, cobrindo concentração de lítio, valores de HQ1 e HQ2, razões Mg^{2+}/Li^{+} e Ca^{2+}/Li^{+}, espessura da Formação Itapema, contato óleo/água (FWL) e densidade da água de formação (Figuras 21 a 28).

Os mapas de concentração de lítio (Figura 21) e de HQ2 (Figura 23) revelam padrão espacial consistente: as porções sul e central do Campo de Búzios concentram simultaneamente os maiores teores de lítio e os escores mais negativos de HQ2, reforçando a utilidade desse componente como indicador geoquímico do enriquecimento em lítio.

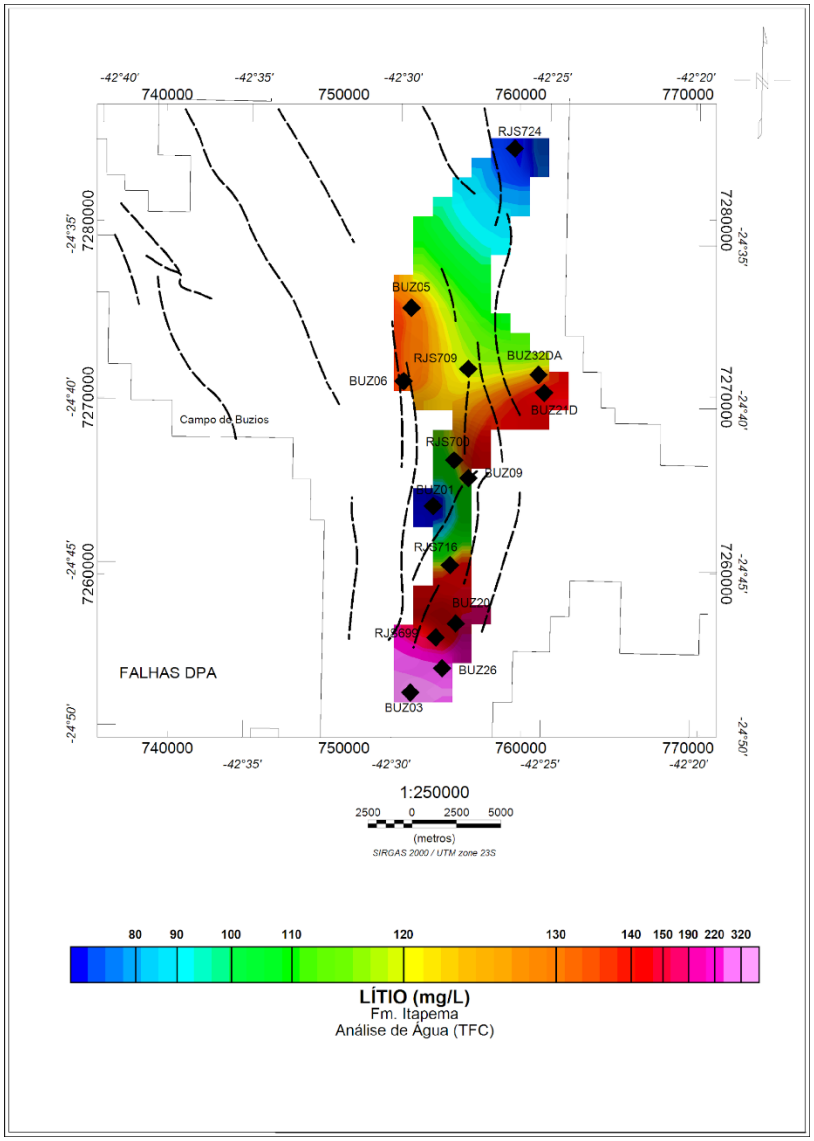

Figura 21 Distribuição espacial das concentrações de lítio (Li^+, mg/L) nos poços da Formação Itapema, Campo de Búzios, Bacia de Santos. Sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

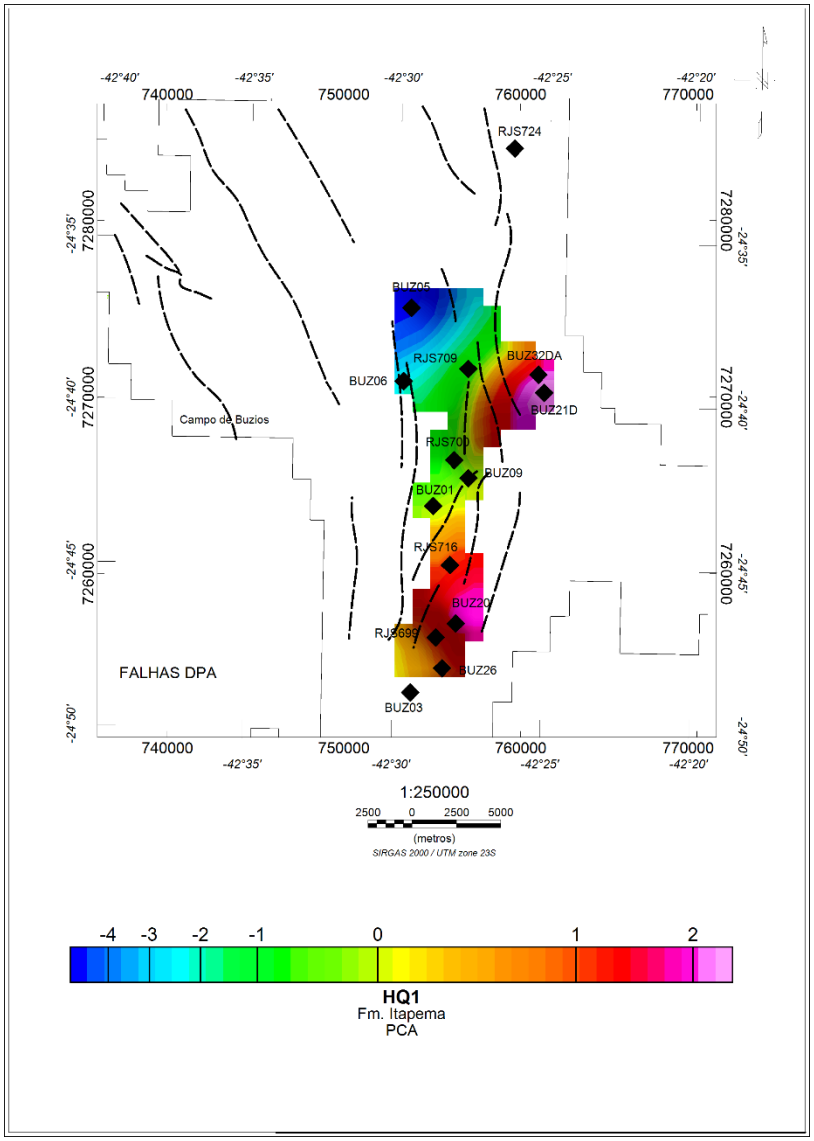

Figura 22 Distribuição espacial dos escores do componente principal HQ1 (32,48% da variância), associado à salinidade da água de formação, nos poços da Formação Itapema, Campo de Búzios, Bacia de Santos. Sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

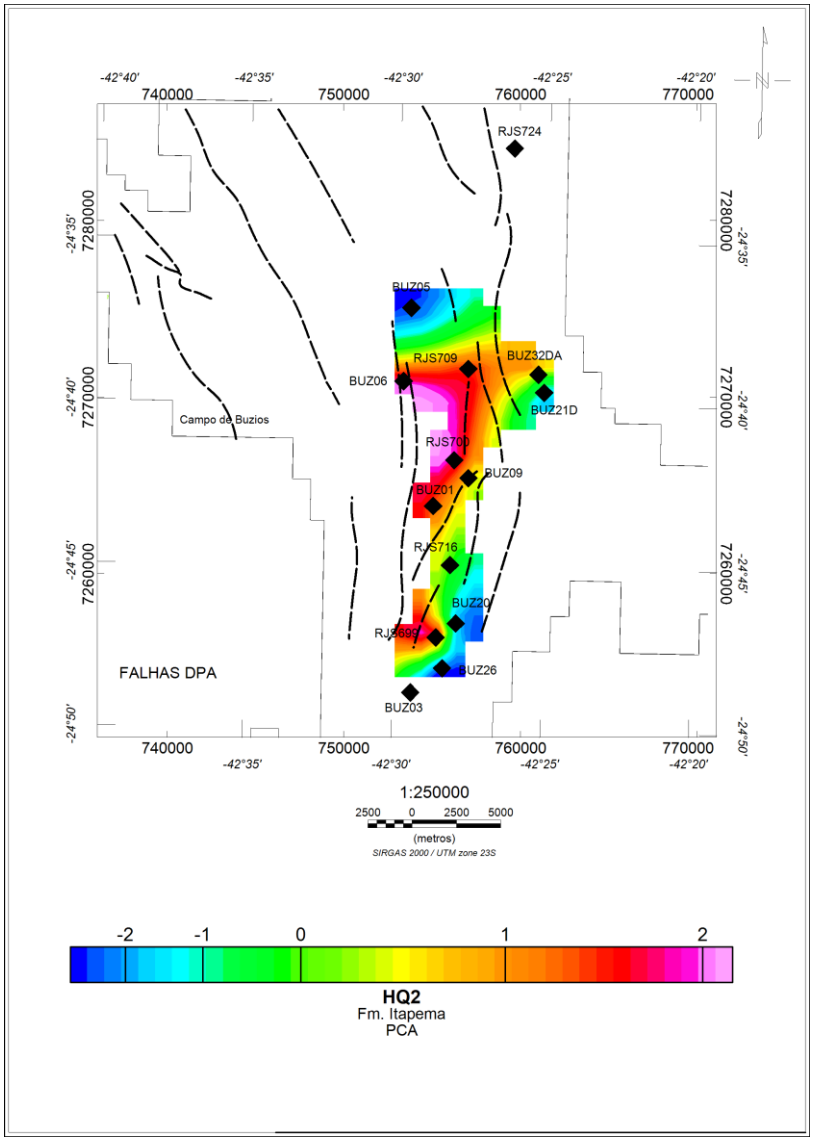

Figura 23 Distribuição espacial dos escores do componente principal HQ2 (23,99% da variância), associado à presença de lítio na água de formação. Regiões com valores negativos indicam maior concentração de Li^+. Formação Itapema, Campo de Búzios, Bacia de Santos.

Os mapas das razões Mg^{2+}/Li^+ (Figura 24) e Ca^{2+}/Li^+ (Figura 25) mostram que as regiões norte e central do campo tendem a apresentar valores mais elevados dessas razões, enquanto a porção sul registra os menores valores.

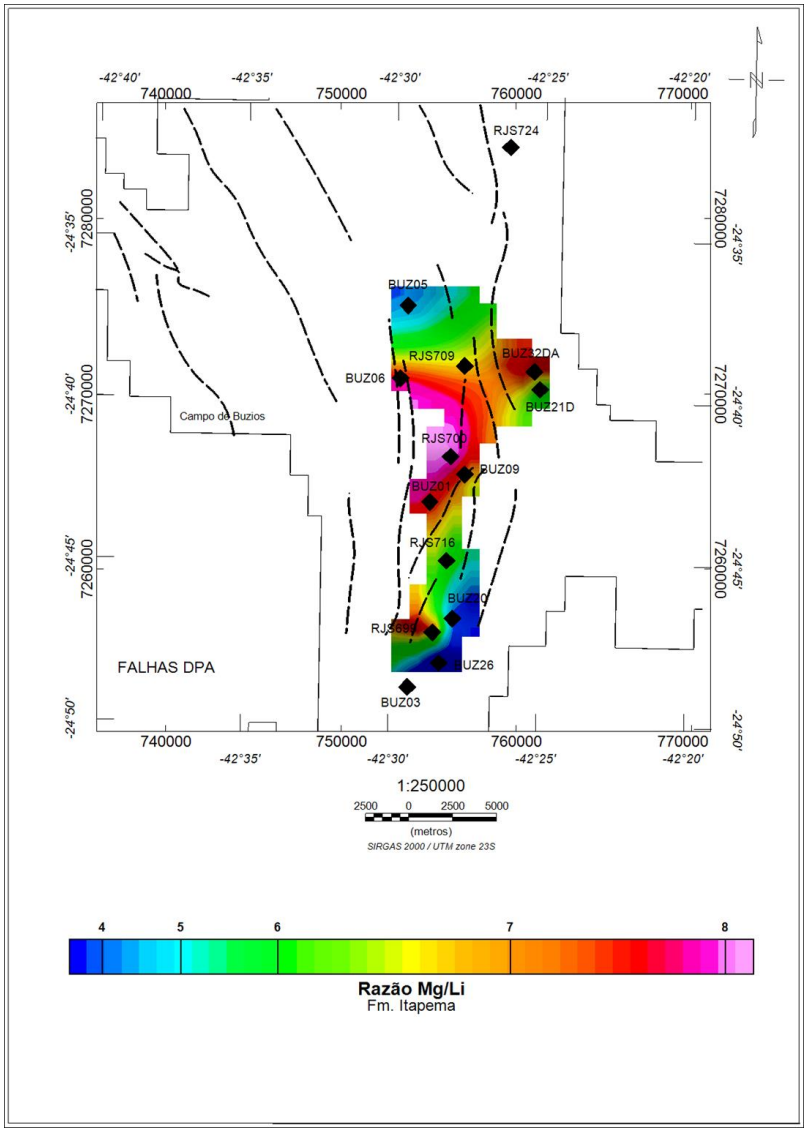

Figura 24 Distribuição espacial da razão Mg^{2+}/Li^{+} nos poços da Formação Itapema, Campo de Búzios, Bacia de Santos. Valores elevados indicam maior interferência do magnésio no processo de separação do lítio. Sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

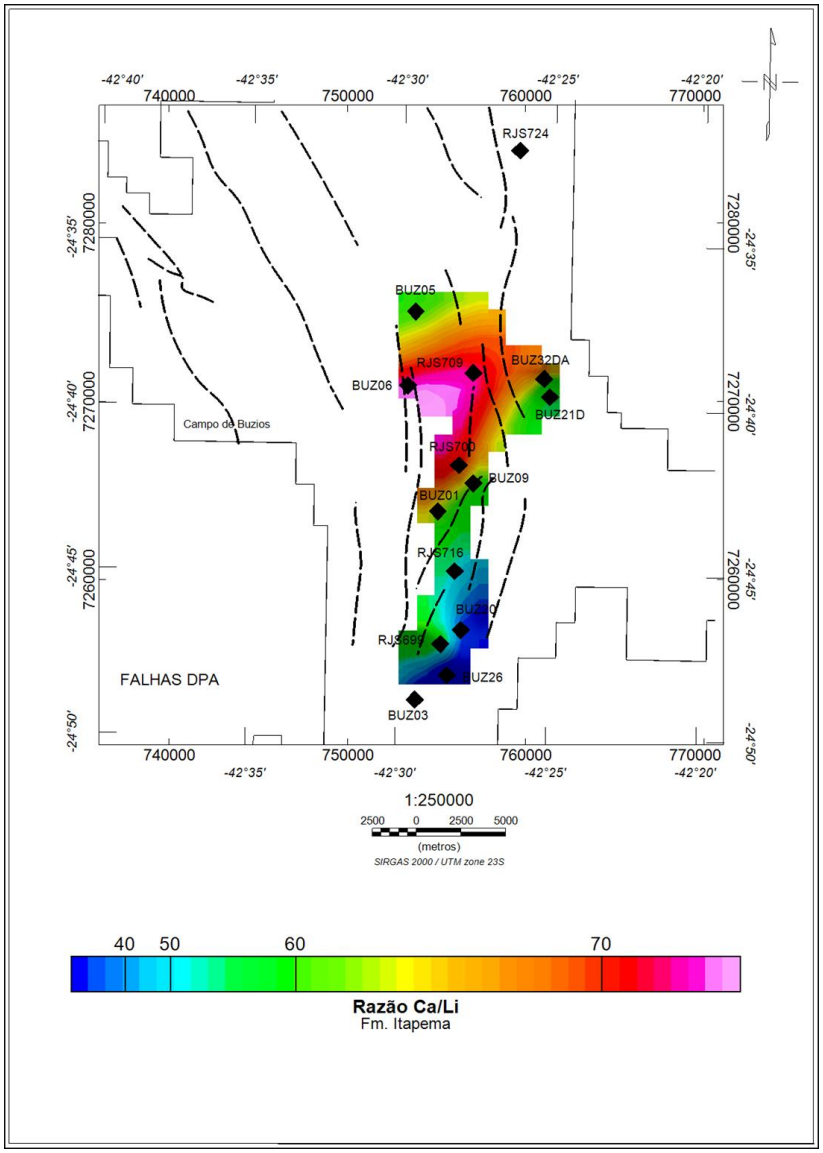

Figura 25 Distribuição espacial da razão Ca^{2+}/Li^{+} nos poços da Formação Itapema, Campo de Búzios, Bacia de Santos. Valores elevados indicam maior interferência do cálcio no processo de separação do lítio. Sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O mapa de isópacas da Formação Itapema (Figura 26) indica que a espessura nas zonas mais ricas em lítio situa-se entre 150 m e 250 m (Silva, 2024). O mapa de contato óleo/água (Figura 27) demonstra que a zona de interesse se encontra saturada por água. O mapa de densidade da água (Figura 28), obtido a partir de gradientes de pressão, complementa a caracterização dos fluidos na formação (Silva, 2024).

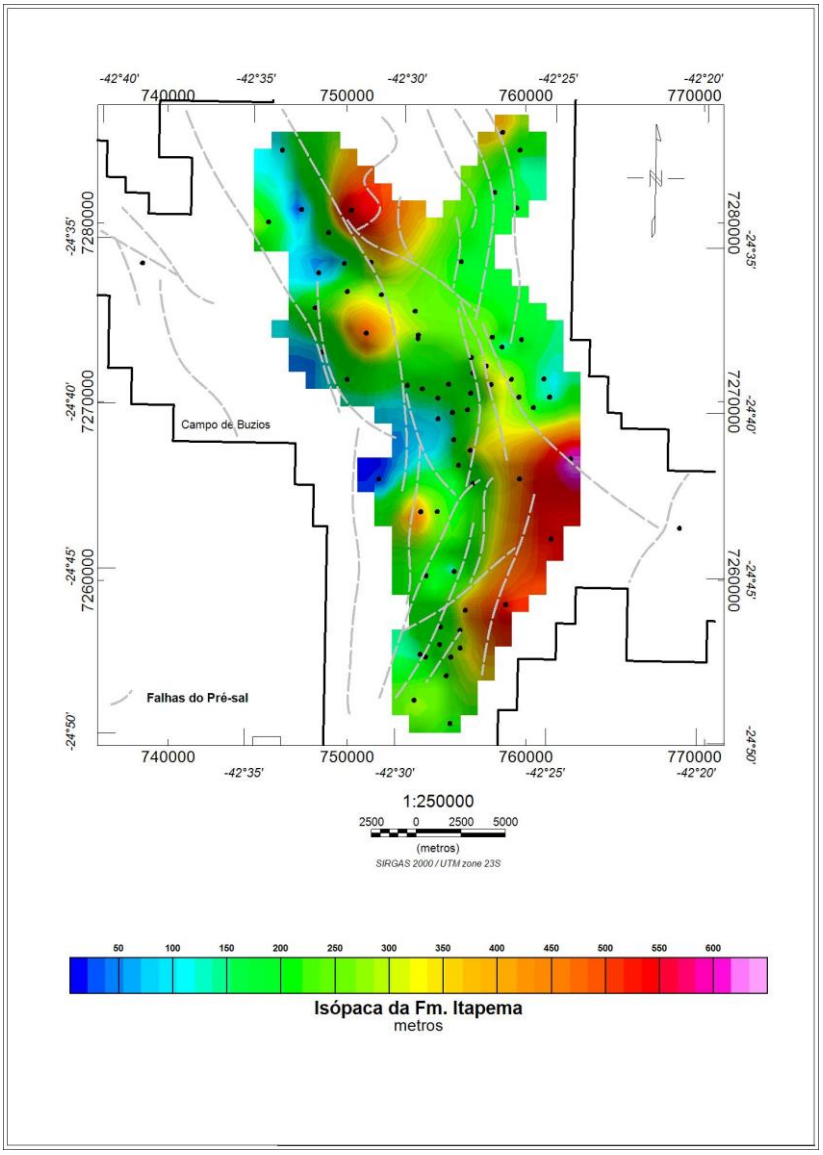

Figura 26 Mapa de isópacas da Formação Itapema no Campo de Búzios, Bacia de Santos, com a localização dos poços utilizados no estudo. Sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Fonte: Adaptado de Silva (2024).

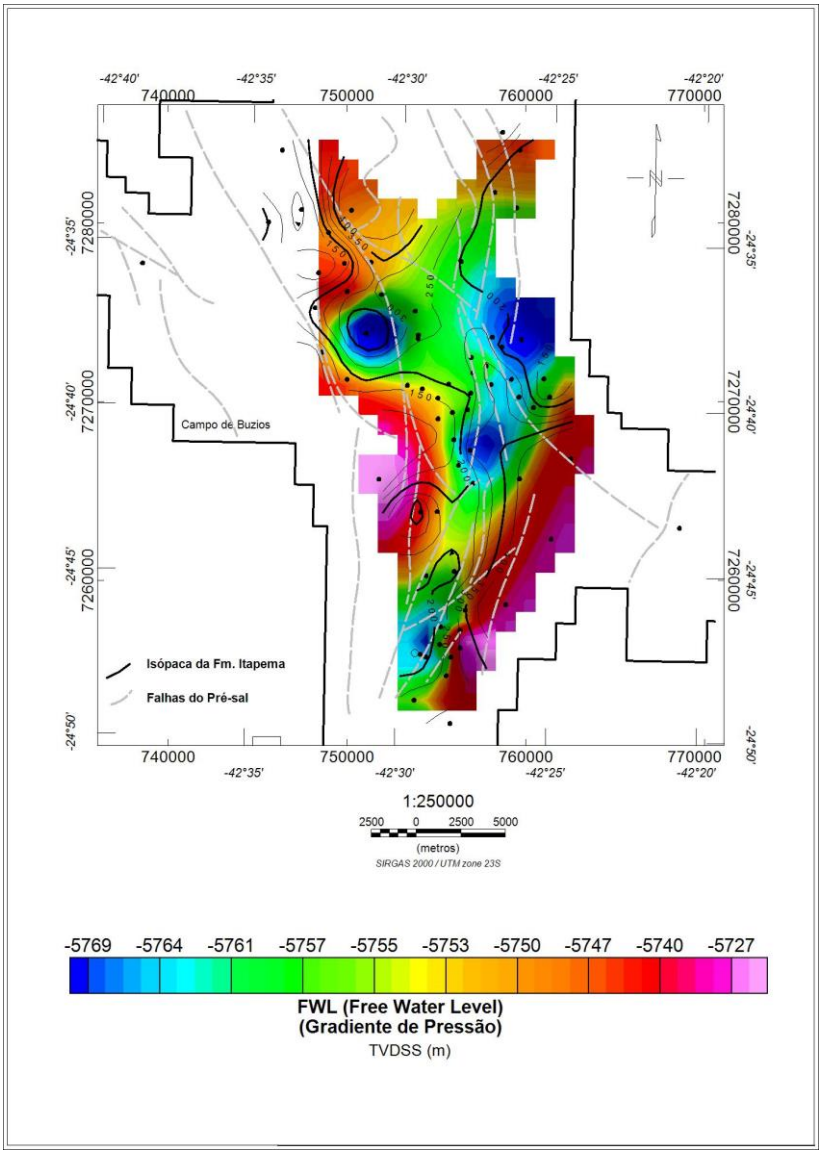

Figura 27 Distribuição espacial do contato óleo/água (Free Water Level – FWL) na Formação Itapema, Campo de Búzios, Bacia de Santos, com a localização dos poços utilizados no estudo. Sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Fonte: Adaptado de Silva (2024).

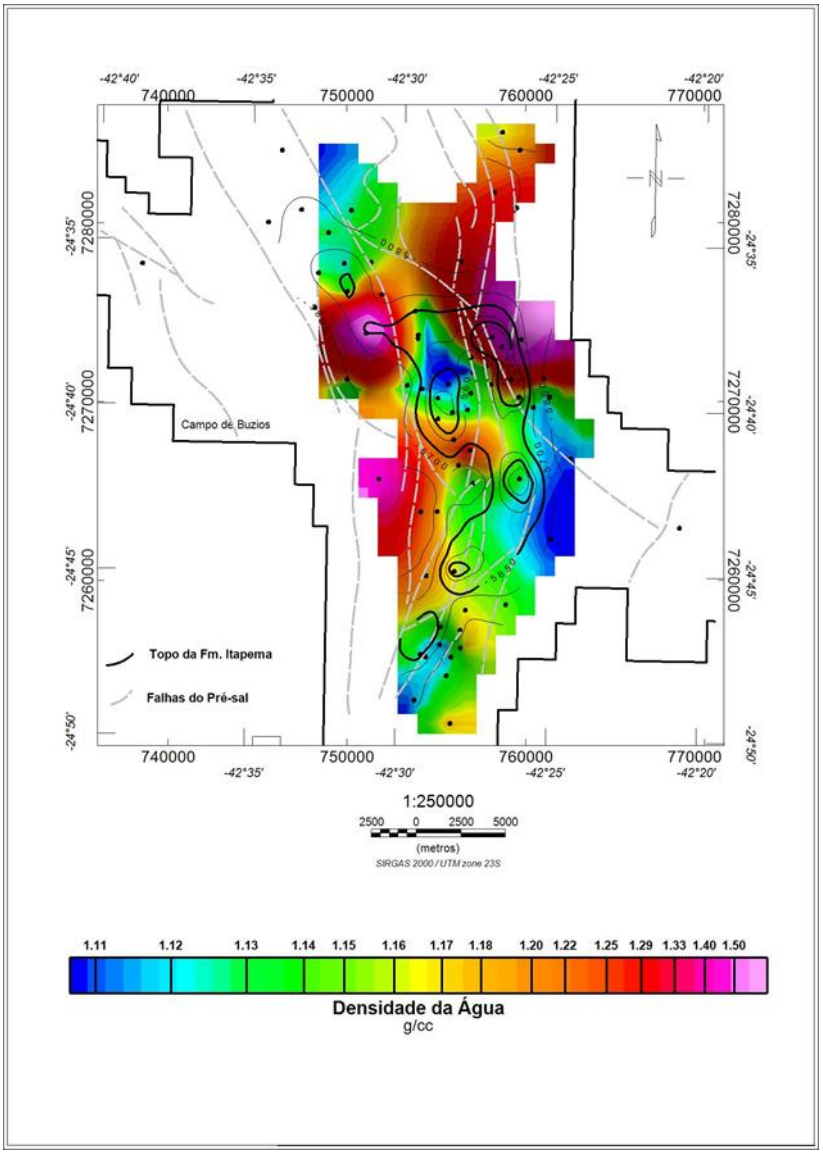

Figura 28 Distribuição espacial da densidade da água de formação na Formação Itapema, Campo de Búzios, Bacia de Santos, com a localização dos poços utilizados no estudo. Sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Fonte: Adaptado de Silva (2024).

7. DISCUSSÕES

Os resultados obtidos permitem discutir a viabilidade e os condicionantes geoquímicos da extração de lítio a partir das águas de formação da Formação Itapema no Campo de Búzios, considerando tanto os aspectos estatísticos quanto a distribuição espacial dos parâmetros analisados.

7.1 Interpretação dos Componentes Principais Hidroquímicos

O componente HQ1, fortemente associado ao Na^+, K^+ e Cl^-, reflete o grau de salinidade da água de formação, conforme evidenciado pela análise estatística dos dados hidroquímicos dos poços estudados. A variação desse componente entre os poços estudados indica heterogeneidade na composição hidroquímica do reservatório, possivelmente associada a diferenças locais nas condições de confinamento e na evolução diagenética dos fluidos.

O componente HQ2 é o de maior relevância para os objetivos deste estudo. A relação inversa entre HQ2 e as concentrações de lítio indica que os poços com valores mais negativos nesse componente tendem a apresentar maior enriquecimento em Li^+, ao mesmo tempo em que exibem menores concentrações de Mg^{2+} e Ca^{2+}. Esse padrão é consistente com a literatura, que aponta a ausência de correlação linear entre o teor de lítio e os demais íons principais em águas de formação de campos petrolíferos, incluindo o Mg^{2+} (KNAPIK *et al.*, 2023; YU *et al.*, 2023). Dessa forma, o lítio responde a controles geoquímicos independentes da salinidade geral da salmoura, o que justifica a utilização de HQ2 como indicador indireto do potencial de enriquecimento em lítio neste estudo.

7.2 Interpretação dos Componentes Principais Físico-Químicos

O componente FQ1, associado à salinidade e ao pH, reforça que as águas de formação do Campo de Búzios apresentam caráter levemente ácido (pH médio de 6,6). Esse pH pode influenciar a especiação do lítio em solução e a eficiência de métodos de extração direta de lítio (DLE) baseados em adsorção reportados para salmouras aquosas, uma vez que a capacidade de adsorção de adsorventes seletivos é reconhecidamente dependente do pH da solução (XU *et al.*, 2016). O componente

FQ2, que evidencia relação inversa entre balanço iônico e densidade, aponta para variações na composição química que afetam diretamente a densidade da salmoura, parâmetro relevante para o dimensionamento de processos de extração.

7.3 Viabilidade de extração por poço

A avaliação conjunta das concentrações de lítio, dos escores nos componentes principais e das razões iônicas permite classificar os poços em três grupos de viabilidade para extração.

7.3.1 Poços mais promissores

A Figura 29 apresenta o gráfico de observações da Análise de Componentes Principais, no qual cada ponto representa um poço posicionado no espaço bidimensional definido pelos dois primeiros componentes principais (HQ1 e HQ2), responsáveis por 56,47% da variância total dos dados. A distribuição dos poços nos quadrantes reflete suas similaridades e diferenças geoquímicas: poços próximos compartilham perfis hidroquímicos semelhantes, enquanto poços distantes apresentam características contrastantes. Os poços 8-BUZ-26-RJS, 8-BUZ-20-RJS e 8-BUZ-21D-RJS, posicionados no quadrante de HQ1 positivo e HQ2 negativo, configuram o grupo de maior potencial para extração de lítio, cuja distribuição espacial no Campo de Búzios é apresentada na Figura 30.

O poço 8-BUZ-26-RJS destaca-se como o mais favorável do conjunto, combinando a maior concentração de lítio (257 mg/L) com o menor escore de HQ2 (-2,61) e as menores razões Mg^{2+}/Li^{+} (2,43) e Ca^{2+}/Li^{+} (23,68). O poço 8-BUZ-20-RJS também integra esse grupo, com concentração de 200 mg/L e escore HQ2 negativo (-2,16), indicando condições geoquímicas favoráveis à extração. O poço 8-BUZ-21D-RJS apresenta concentração de lítio intermediária (144 mg/L), com razões Mg^{2+}/Li^{+} (5,77) e Ca^{2+}/Li^{+} (54,38) ainda favoráveis em relação à maioria dos poços do conjunto, justificando sua inclusão neste grupo. A baixa proporção de íons competidores é um fator crítico para a eficiência dos processos de separação, pois magnésio e cálcio tendem a competir com o lítio nos adsorventes seletivos utilizados na extração direta (KNAPIK *et al.*, 2023). Nota-se que os três poços se concentram na porção sul do campo, sugerindo que essa região apresenta condições hidroquímicas mais favoráveis ao enriquecimento em lítio.

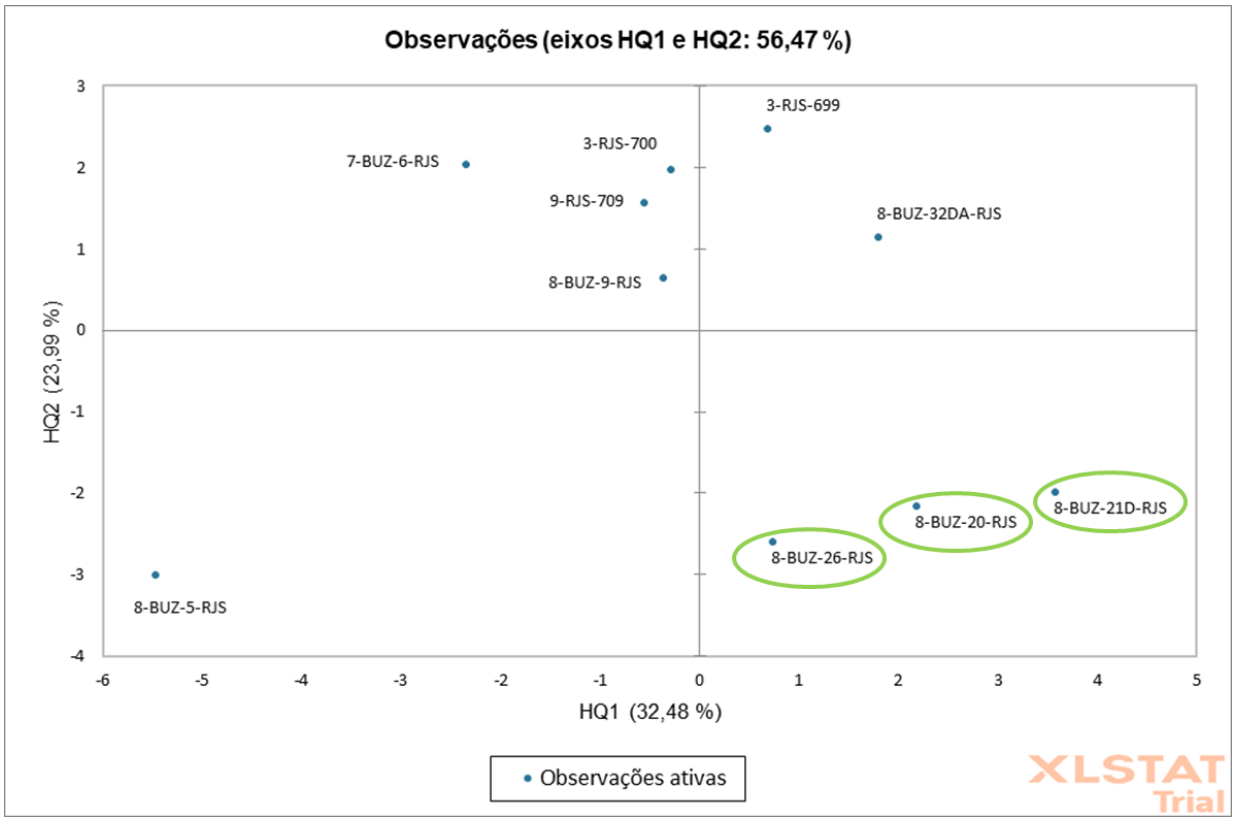

Figura 29 Gráfico de observações da Análise de Componentes Principais hidroquímica, com distribuição dos poços no espaço bidimensional definido pelos componentes HQ1 (32,48%) e HQ2 (23,99%). Os poços destacados em verde correspondem ao grupo de maior potencial para extração de lítio. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

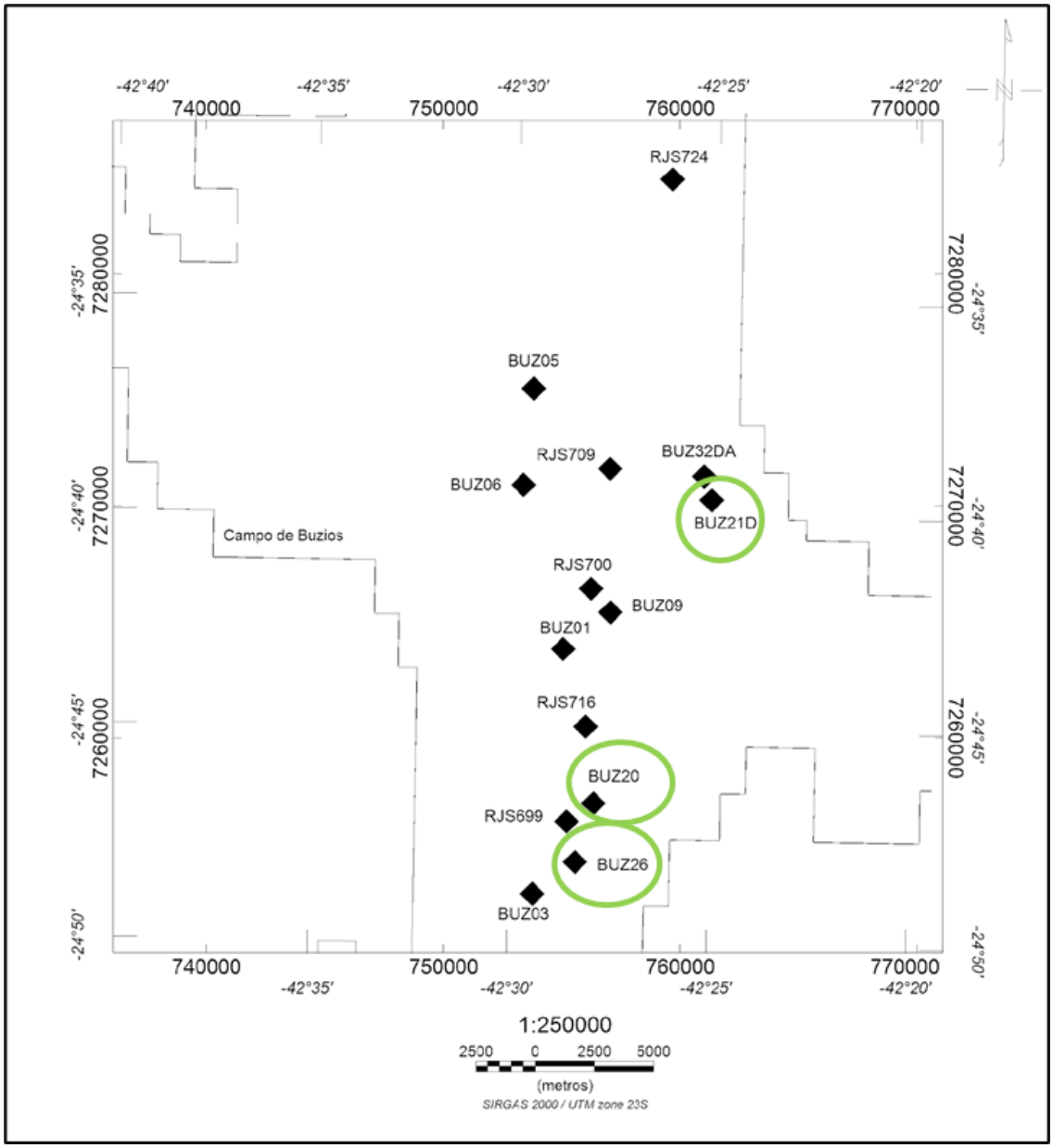

Figura 30 Distribuição espacial dos poços com maior potencial para extração de lítio (destacados em verde) no Campo de Búzios, Bacia de Santos. Projeção SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Escala 1:250.000. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

7.3.2 Poços moderadamente promissores

Os poços 3-RJS-699 e 8-BUZ-32DA-RJS, posicionados no quadrante de HQ1 positivo e HQ2 positivo (Figura 31), configuram o grupo de potencial intermediário para extração de lítio. Embora apresentem concentrações de lítio dentro do intervalo considerado economicamente relevante para águas de formação — 113 mg/L e 121 mg/L, respectivamente —, seus escores positivos em HQ2 indicam razões Mg^{2+}/Li^{+} e

Ca^{2+}/Li^{+} menos favoráveis em comparação ao grupo anterior. A distribuição espacial desses poços no Campo de Búzios é apresentada na Figura 32.

O poço 3-RJS-699 apresenta razões Mg^{2+}/Li^{+} de 7,93 e Ca^{2+}/Li^{+} de 66,09, enquanto o poço 8-BUZ-32DA-RJS registra valores similares de 7,73 e 67,75, respectivamente. Esses valores indicam maior proporção relativa de íons competidores, o que pode reduzir a seletividade e a eficiência dos processos de extração direta por adsorção (KNAPIK *et al.*, 2023). No entanto, a concentração absoluta de lítio nesses poços não é desprezível, e a viabilidade de sua exploração dependerá do pré-tratamento da salmoura para remoção parcial de magnésio e cálcio antes da etapa de adsorção seletiva.

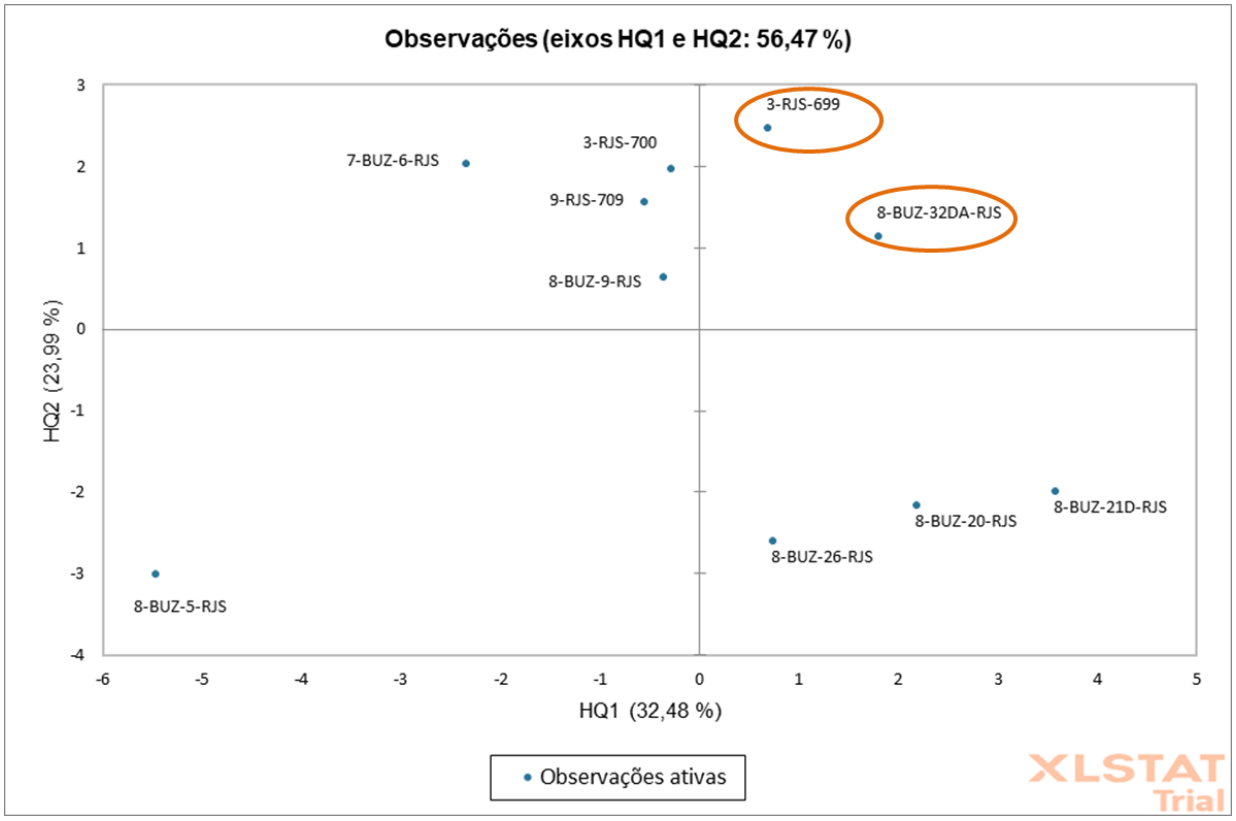

Figura 31 Gráfico de observações da Análise de Componentes Principais hidroquímica, com distribuição dos poços no espaço bidimensional definido pelos componentes HQ1 (32,48%) e HQ2 (23,99%). Os poços destacados em laranja correspondem ao grupo de potencial intermediário para extração de lítio. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

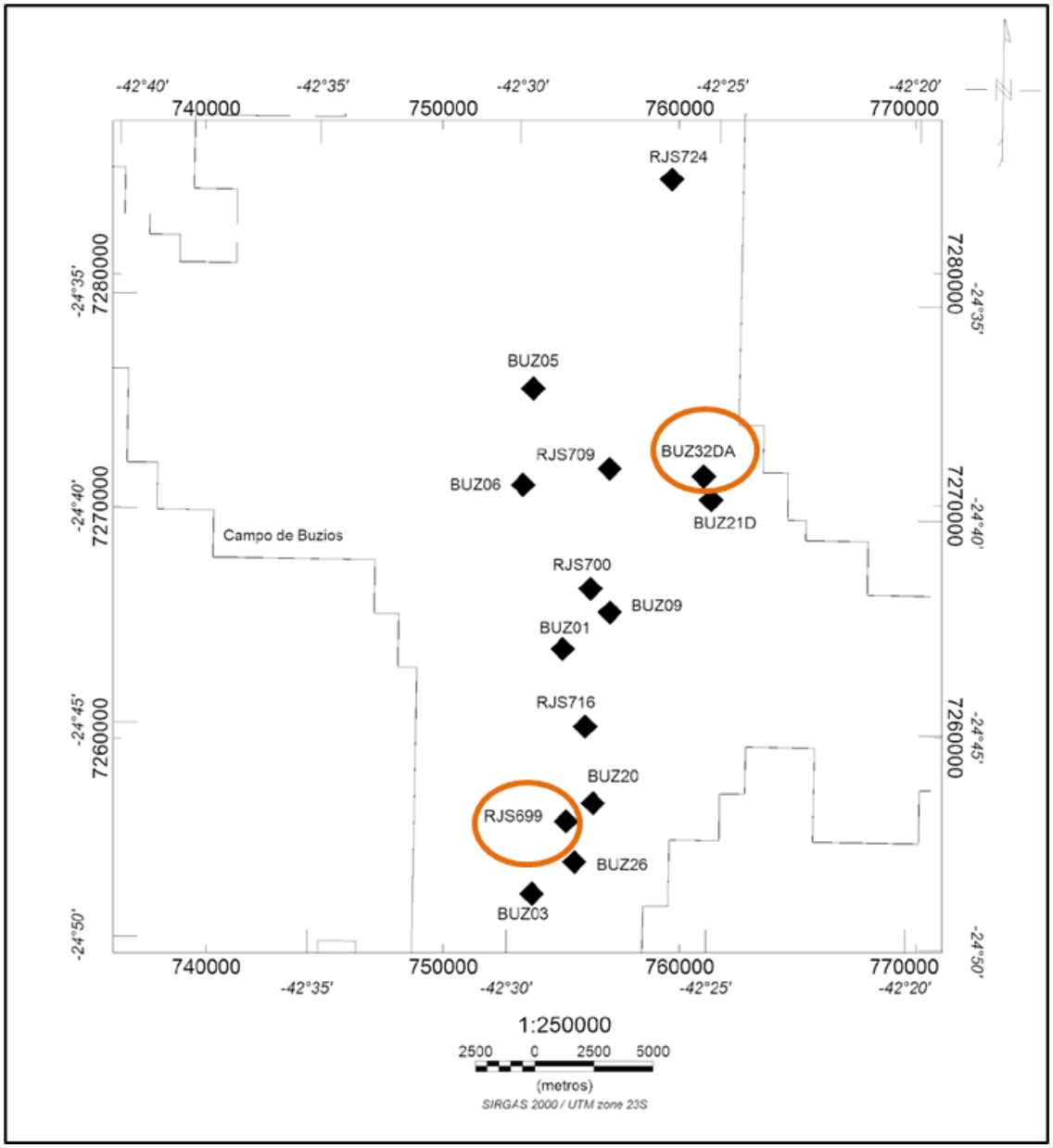

Figura 32 Distribuição espacial dos poços de potencial intermediário para extração de lítio (destacados em laranja) no Campo de Búzios, Bacia de Santos. Projeção SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Escala 1:250.000. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

7.3.3 Poços menos promissores

Os poços 7-BUZ-6-RJS, 3-RJS-700, 9-RJS-709 e 8-BUZ-9-RJS, posicionados no quadrante de HQ1 negativo e HQ2 positivo (Figura 33), configuram o grupo de menor potencial para extração de lítio. Apesar de apresentarem concentrações de lítio entre 118 e 131 mg/L, seus escores positivos em HQ2 associados a escores negativos em HQ1 indicam perfil hidrogeoquímico desfavorável, com razões Mg^{2+}/Li^{+} entre 6,78 e 8,24 e Ca^{2+}/Li^{+} entre 62,60 e 73,41 — os valores mais elevados do conjunto analisado.

A distribuição espacial desses poços no Campo de Búzios é apresentada na Figura 34.

O poço 8-BUZ-5-RJS constitui um caso particular, posicionado no quadrante de HQ1 muito negativo e HQ2 negativo, com o escore HQ1 mais extremo do conjunto (-5,47). Embora apresente concentração de lítio de 131 mg/L e razões Mg^{2+}/Li^{+} (4,15) e Ca^{2+}/Li^{+} (61,20) não necessariamente desfavoráveis, sua composição hidrogeoquímica é marcadamente distinta dos demais poços, sugerindo condições de reservatório diferenciadas cuja origem requer investigação adicional.

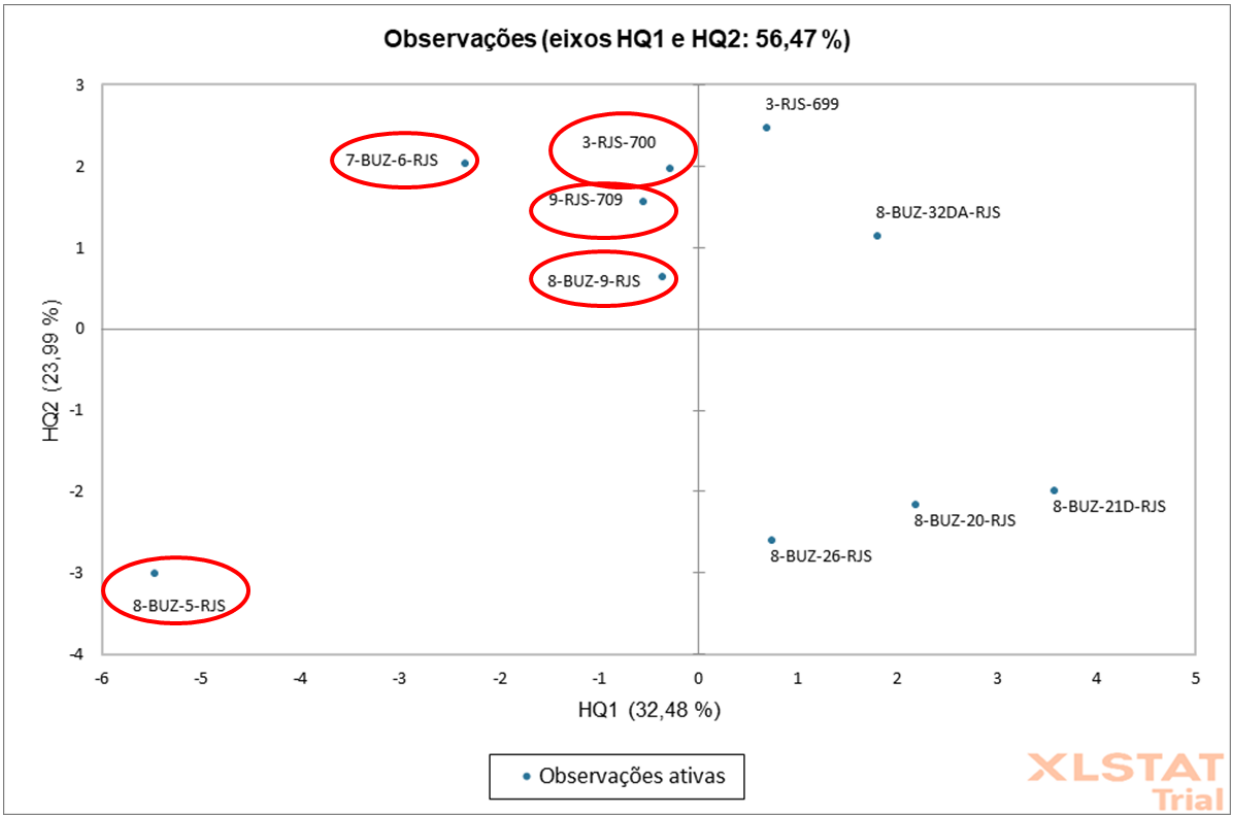

Figura 33 Gráfico de observações da Análise de Componentes Principais hidroquímica, com distribuição dos poços no espaço bidimensional definido pelos componentes HQ1 (32,48%) e HQ2 (23,99%). Os poços destacados em vermelho correspondem ao grupo de menor potencial para extração de lítio. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

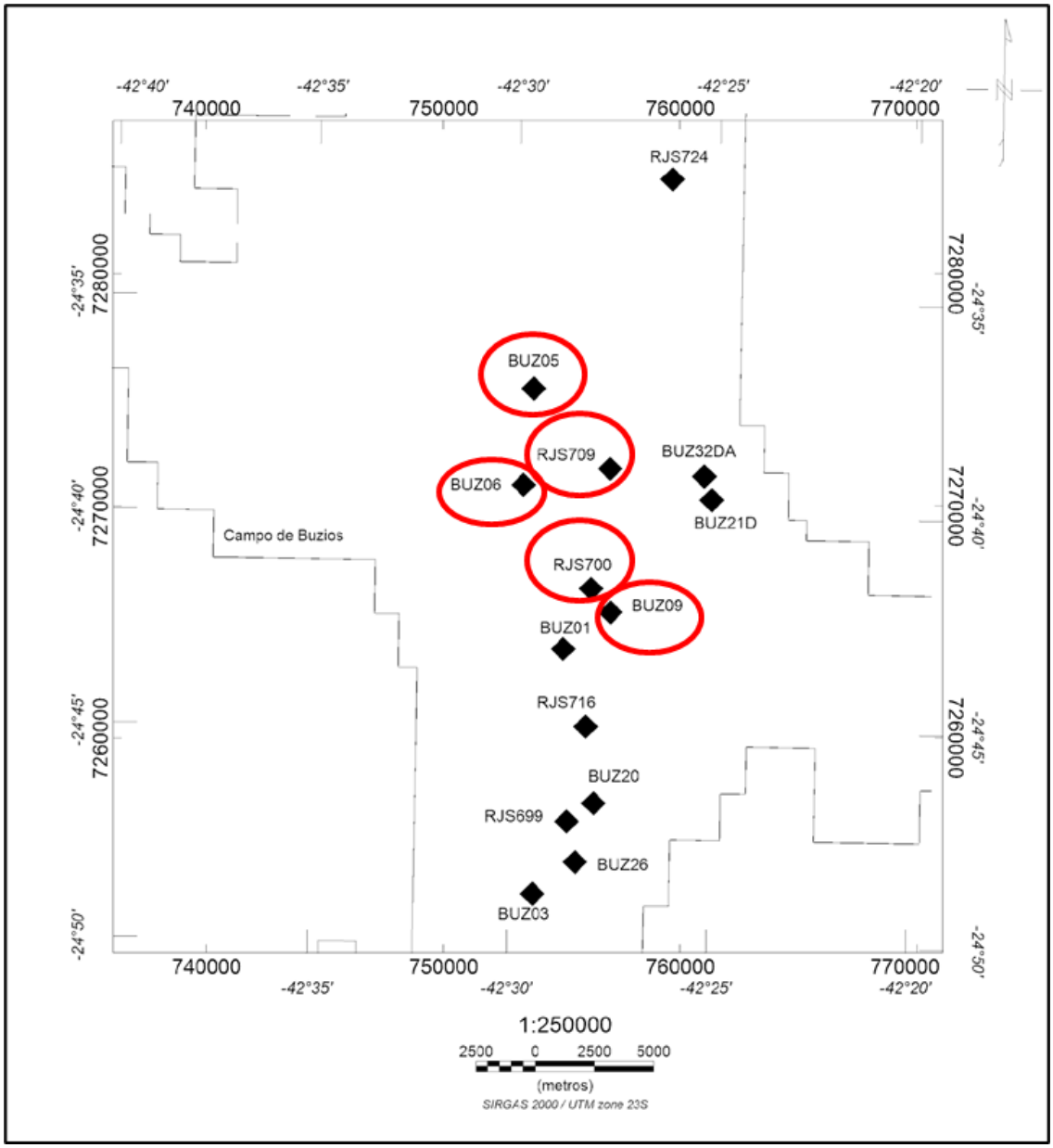

Figura 34 Distribuição espacial dos poços de menor potencial para extração de lítio (destacados em vermelho) no Campo de Búzios, Bacia de Santos. Projeção SIRGAS 2000 / UTM zona 23S. Escala 1:250.000. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

7.4 Distribuição Espacial e Controles Geológicos

A análise integrada dos mapas temáticos revela que a porção sul do Campo de Búzios concentra as condições mais favoráveis para a extração de lítio, combinando altas concentrações do elemento com baixas razões Mg^{2+}/Li^{+} e Ca^{2+}/Li^{+} e valores negativos de HQ2. Essa distribuição espacial não é aleatória e provavelmente reflete controles geológicos relacionados à compartimentação estrutural do campo.

O Campo de Búzios está estruturado por falhas distensionais de direção NNE e NNW, com zonas de transferência de orientação NW-SE, formadas durante a fase rifte da Bacia de Santos (GUERRERO *et al.*, 2024). Essa compartimentação pode ter criado condições de isolamento hidráulico diferenciado entre os blocos, favorecendo o enriquecimento em lítio nas porções onde a circulação de fluidos foi mais restrita e o tempo de residência da água de formação foi maior (DUGAMIN *et al.*, 2023). A maior espessura da Formação Itapema na região sul (150–250 m, segundo Silva, 2024) amplia o volume potencial de salmoura disponível, reforçando o interesse dessa área.

A confirmação do contato óleo/água (FWL) na zona de interesse indica que os intervalos analisados estão efetivamente saturados por água de formação, e não por hidrocarbonetos, o que é condição necessária para o aproveitamento da salmoura como fonte de lítio (SILVA, 2024). A densidade da água, obtida a partir dos gradientes de pressão, é compatível com salmouras de alta salinidade, característica dos reservatórios analisados.

7.5 Comparação com a Literatura e Perspectivas

As concentrações de lítio identificadas no Campo de Búzios são compatíveis com as reportadas em estudos de viabilidade de extração a partir de águas de formação em outras bacias produtoras. Knapik *et al.* (2023) indicam que concentrações acima de 100 mg/L são consideradas economicamente viáveis, sendo que os valores encontrados nos poços mais promissores de Búzios (200–257 mg/L) situam-se dentro da faixa de interesse comercial. O mesmo estudo demonstra a viabilidade técnica da coprodução de lítio com petróleo utilizando tecnologias de Extração Direta de Lítio (Direct Lithium Extraction - DLE), que operam com baixo consumo de água e podem ser integradas à infraestrutura já existente nos campos produtores.

No contexto brasileiro, a presente pesquisa constitui uma contribuição pioneira ao demonstrar o potencial das águas de formação do *Pré-sal* como fonte de lítio. A infraestrutura instalada no Campo de Búzios, aliada à proximidade do pico de produção de petróleo e à necessidade de planejamento para o pós-produção, cria uma janela de oportunidade para o desenvolvimento de projetos-piloto de extração de lítio que poderiam estender a vida útil econômica do campo e inserir o Brasil no cenário global de produção de minerais críticos para a transição energética.

Cabe ressaltar que as análises realizadas baseiam-se em dados de 10 poços, o que representa uma amostragem limitada diante da extensão do Campo de Búzios. A

ampliação do conjunto de dados, a realização de ensaios laboratoriais de extração com as salmouras reais e a modelagem hidrogeológica da circulação de fluidos na Formação Itapema são etapas fundamentais para a progressão deste estudo em direção a uma avaliação de viabilidade econômica completa.

8. HIPÓTESES SOBRE A ORIGEM DO LÍTIO NA FORMAÇÃO ITAPEMA

A presença de lítio nas águas da Formação Itapema no Campo de Búzios pode ser explicada por diferentes mecanismos geoquímicos, não necessariamente excludentes entre si. Três hipóteses principais são discutidas a seguir: migração do Lítio a partir do manto litosférico juntamente com o CO_2, contribuição da sequência evaporítica aptiana, e interação água-rocha.

8.1 Hipótese 1 - Migração do Lítio a partir do manto litosférico juntamente com o CO2

Essa hipótese para a origem do lítio nas águas da Fm. Itapema considera sua migração ascendente desde o manto litosférico, em conjunto com o CO_2 e demais voláteis profundos. O modelo apoia-se em evidências geoquímicas e estruturais documentadas para o Pré-sal da Bacia de Santos por Santos Neto et al. (2025).

O estiramento crustal associado à abertura do Atlântico Sul produziu falhas profundas que atingem o manto sob o Alto Externo da bacia, evidenciadas em seções crustais que integram dados sísmicos ultraprofundos, gravimétricos e magnéticos. Essas falhas, somadas ao underplate magmático na base da crosta estirada, constituem as vias de ascensão dos fluidos mantélicos até o pacote sedimentar do Pré-sal (Santos Neto et al., 2025).

A origem mantélica do CO_2 é demonstrada pelos isótopos de hélio. As razões $^3He/^4He$ nos reservatórios variam entre R/Ra = 1,81 e 5,60, as mais altas registradas em bacias brasileiras, contra R/Ra ≈ 0,01 esperado para fontes crustais e R/Ra ≈ 8,00 para o manto. Estima-se que entre 92% e 98% do CO_2 presente no Pré-sal seja de origem mantélica. Os valores de $\delta^{13}C$ entre -5,5‰ e -6,0‰ são compatíveis com essa interpretação. Argônio, criptônio e xenônio acompanham o hélio e funcionam como traçadores inertes da mesma fonte profunda (Santos Neto et al., 2025).

A distribuição do CO_2 segue tendência NE–SW e aumenta para SE, com máximos em Peroba (96%), Abaré Oeste (80%), Júpiter (77–79%) e Libra (44–65%). Búzios situa-se a NE desse eixo, com média de 22,75% de CO_2, posição intermediária entre o trend de máxima desgaseificação e os campos da porção continental, onde o CO_2 cai abaixo de 5% (Santos Neto et al., 2025).

Assumida a operação desse sistema de transporte profundo, a migração de Li^+ junto aos fluidos torna-se plausível. O lítio é incompatível, particionado para a fase fluida durante fusão parcial, e mobilizável por fluidos aquo-carbônicos sob alta P-T. A interação desses fluidos com as rochas atravessadas durante a ascensão deixa registro diagenético claro nos reservatórios do Pré-sal: nos campos de Libra e Júpiter, observa-se corrosão de cimento calcítico, geração de porosidade vugular e precipitação de anidrita, megaquartzo, dolomita-sela e dawsonita, esta última indicadora de alta pressão parcial de CO_2. Inclusões fluidas com CO_2 em megaquartzo e dolomita-sela confirmam a presença do gás durante esses eventos diagenéticos (Santos Neto et al., 2025).

8.2 Hipótese 2 - Migração de Fluidos a Partir da Sequência Evaporítica

A segunda hipótese considera que parte do lítio presente nas águas da Formação Itapema possa ser derivada de salmouras associadas à sequência evaporítica aptiana sobrejacente. Durante a evaporação progressiva da água do mar, o lítio comporta-se como íon incompatível com as estruturas cristalinas dos sais comuns como halita e carnalita, e permanece concentrado nas salmouras residuais intersticiais. Essas salmouras podem atingir concentrações elevadas de Li^+ e ficar aprisionadas no pacote evaporítico mesmo após a precipitação dos sais (Garrett, 2004). A sequência evaporítica da Formação Ariri, que sela os reservatórios do Pré-sal na Bacia de Santos, é extensa e espessa (Moreira et al., 2007).

Embora a Formação Itapema esteja separada dos evaporitos pela Formação Barra Velha, salmouras residuais aprisionadas no pacote da Fm. Ariri poderiam migrar verticalmente por gradientes de densidade e pressão ou ao longo de zonas de falha que cortam o pacote pós-Itapema. Mecanismos análogos foram propostos para outras bacias com pacotes evaporíticos espessos sobrejacentes a reservatórios carbonáticos (Dugamin et al., 2023).

A lixiviação concomitante de anidrita enriqueceria também o Mg^{2+} e o Ca^{2+}, o que poderia elevar as razões Mg^{2+}/Li^{+} e Ca^{2+}/Li^{+}. Contudo, os poços mais promissores do Campo de Búzios apresentam exatamente os menores valores dessas razões, o que, à primeira vista, parece contradizer a hipótese evaporítica como fonte exclusiva. Esse padrão pode ser explicado por processos diagenéticos posteriores que removeriam preferencialmente o Mg^{2+} e o Ca^{2+} da solução. A dolomitização, documentada nos carbonatos lacustres do Pré-sal da Bacia de Campos por Herlinger, Zambonato e De Ros (2017), envolve a substituição do Ca^{2+} por Mg^{2+} nas rochas carbonáticas, alterando as razões iônicas dos fluidos nos poros. Considerando a similaridade entre as bacias de Campos e Santos quanto ao contexto deposicional do Pré-sal lacustre, é razoável supor que mecanismos diagenéticos análogos operem no Campo de Búzios. A hipótese evaporítica permanece, portanto, como contribuição complementar, não excludente das demais.

A componente HQ1, que explica 32,48% da variância total na ACP hidroquímica e está fortemente correlacionada com Na^{+}, K^{+} e Cl^{-}, é consistente com a presença de salmouras derivadas da sequência evaporítica e reforça a possibilidade de contribuição dessa fonte para a química geral das águas de formação do campo.

8.3 Hipótese 3 - Interação Água-Rocha

A terceira hipótese considera que a interação geoquímica entre as águas de formação e as rochas encaixantes, tanto as coquinas da Formação Itapema quanto o embasamento basáltico, possam ter contribuído para o enriquecimento em lítio. Carbonatos puros não constituem fontes primárias expressivas de lítio, e a mobilização desse elemento em águas de formação carbonáticas associa-se mais frequentemente à interação com silicatos e outros minerais enriquecidos em lítio (Dugamin et al., 2023).

Diversos processos diagenéticos relevantes nos carbonatos lacustres do Pré-sal foram descritos por Herlinger, Zambonato e De Ros (2017) para a Bacia de Campos, incluindo a dolomitização, que ocorre tanto por processos eodiagenéticos quanto por alterações de soterramento associadas a fluidos hidrotermais conduzidos por falhas e fraturas. Tais processos modificam as razões iônicas das águas de formação e podem mobilizar elementos menores, incluindo o lítio, para os fluidos contidos nos poros.

Dada a similaridade do contexto deposicional entre as bacias de Campos e Santos, processos análogos são esperados no Campo de Búzios.

No Campo de Búzios, o embasamento corresponde aos basaltos eocretáceos da Formação Camboriú, depositados em discordância sobre rochas pré-Cambrianas durante o início do rifteamento (Guerrero et al., 2024; Moreira et al., 2007). Rochas basálticas hospedam lítio em minerais primários como piroxênios e em vidros vulcânicos, podendo liberá-lo por dissolução e troca iônica durante a interação com águas de formação quentes e salinas. A alteração hidrotermal de rochas basálticas em contato com salmouras aquecidas é um mecanismo reconhecido de enriquecimento em lítio em sistemas de água de formação (Dugamin et al., 2023).

9. CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou o potencial de extração de lítio a partir das águas de formação da Formação Itapema no Campo de Búzios, Bacia de Santos, por meio da análise da água de formação de 14 poços e da aplicação da técnica de PCA. Os resultados obtidos confirmam a existência de condições favoráveis à extração de lítio dos poços analisados. As conclusões são organizadas a seguir.

9.1 Sobre os controles geoquímicos da distribuição do lítio

A PCA hidroquímica reteve dois componentes com interpretação geológica clara. HQ1, associado à Na^+, K^+ e Cl^-. HQ2 é o componente mais informativo para os objetivos deste estudo: poços com coordenadas negativas nesse eixo concentram simultaneamente maior Li^+ e menor Mg^{2+} e Ca^{2+}, ou seja, maior potencial de extração com menor interferência iônica.

A PCA físico-química indicou pH médio de 6,6. O valor é levemente ácido e tem implicação prática direta: adsorventes seletivos de lítio, principal tecnologia de DLE candidata para águas de formação, têm eficiência reconhecidamente dependente do pH da solução (XU *et al.*, 2016), o que torna o pré-tratamento do pH uma variável a considerar em ensaios futuros.

9.2 Sobre as concentrações de lítio e a viabilidade econômica

Das 14 amostras iniciais, 10 poços apresentaram concentrações de lítio superiores ao limiar mínimo de 100 mg/L estabelecido na literatura como referência de viabilidade econômica para extração em salmouras (KNAPIK *et al.*, 2023). Os poços 8-BUZ-26-RJS (257 mg/L) e 8-BUZ-20-RJS (200 mg/L) destacaram-se como os mais promissores, combinando altas concentrações de lítio com valores negativos de HQ2 e razões Mg^{2+}/Li^{+} e Ca^{2+}/Li^{+} reduzidas, que minimizam as dificuldades associadas à separação do elemento. Esses valores situam-se dentro da faixa de interesse comercial reportada por empresas de extração direta de lítio em operação internacional, o que reforça a relevância do Campo de Búzios como alvo potencial.

9.3 Sobre a distribuição espacial e os controles geológicos

A análise integrada dos mapas de concentração demonstrou que a porção sul do Campo de Búzios concentra as condições mais favoráveis para a extração de lítio, reunindo altas concentrações do elemento, valores negativos de HQ2, baixas razões iônicas e espessura adequada da Formação Itapema (150–250 m). A confirmação da saturação por água na zona de interesse, obtida a partir do mapa de contato óleo/água, valida o uso dessas amostras como representativas das águas de formação da Formação Itapema.

9.4 Sobre as limitações do estudo

As conclusões aqui apresentadas baseiam-se em um conjunto de 10 poços, o que representa uma amostragem limitada diante da extensão e complexidade do Campo de Búzios. A ausência de amostras de rocha dos intervalos analisados impede a caracterização petrográfica e mineralógica do reservatório, o que limita a identificação das possíveis fontes litológicas do lítio e dos processos diagenéticos que controlam seu enriquecimento nas águas de formação. A ausência de ensaios laboratoriais de extração com as salmouras reais impede a confirmação experimental da viabilidade dos processos de separação nas condições específicas do campo. Além disso, a modelagem hidrogeológica da circulação de fluidos na Formação Itapema não foi

realizada no escopo deste trabalho, o que limita a compreensão dos mecanismos de enriquecimento em lítio e da conectividade entre os poços.

9.5 Considerações finais

A metodologia aqui aplicada, é diretamente replicável em outros campos do *Pré-sal* onde dados de águas de formação estejam disponíveis pela ANP.

A coprodução de lítio no Campo de Búzios não é uma ideia distante. A infraestrutura já existe, os dados de química da água já são coletados rotineiramente, e as concentrações identificadas estão dentro da faixa de interesse comercial para DLE.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Bacia de Santos: sumário geológico e setores em oferta. Rio de Janeiro: ANP, 2017.

BRADLEY, Dwight C.; MUNK, LeeAnn; JOCHENS, Hillary; HYNEK, Scott; LABAY, Keith. A preliminary deposit model for lithium brines. Reston: U.S. Geological Survey, 2013. 6 p. (Open-File Report, 2013-1006).

CNN BRASIL. Petrobras diz que Búzios pode dobrar produção para 2 milhões de barris/dia. São Paulo: CNN Brasil, 28 out. 2025. Disponível em: https://www.cnnbrasil.com.br/economia/negocios/petrobras-diz-que-buzios-pode-dobrar-producao-para-2-milhoes-de-barris-dia/. Acesso em: 17/12/2025.

DAITCH, Pamela Joy. Lithium extraction from oilfield brine. 2018. Dissertação (Master of Science in Energy and Earth Resources; Master of Business Administration) – Graduate School, The University of Texas at Austin, Austin, 2018.

DUGAMIN, E. J. M. *et al.* Lithium enrichment processes in sedimentary formation waters. Chemical Geology, v. 635, p. 121626, 2023. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2023.121626.

EUROPEAN COMMISSION. Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability. Brussels: European Commission, 2020. (COM(2020) 474 final). Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0474. Acesso em: 20/02/2026.

ETTEHADI, A. *et al.* Lithium recovery from produced water: Status, challenges and opportunities. Desalination, v. 578, 2024.

GARRETT, Donald E. Handbook of lithium and natural calcium chloride: their deposits, processing, uses and properties. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2004. 476 p. ISBN 0-12-276152-9.

GOLDMAN SACHS. Direct lithium extraction: a potential game changing technology. New York: Goldman Sachs Global Investment Research, 2023.

GUERRERO, T. *et al.* Structural geology of the Santos Basin pre-salt play. Marine and Petroleum Geology, v. 160, 2024.

GUTIÉRREZ, R. *et al.* Potential resources of lithium from oilfield brines in Neuquén Basin, Argentina. In: CONGRESO DE EXPLORACIÓN Y DESARROLLO DE

HIDROCARBUROS, 11., 2022, Buenos Aires. Anais... Buenos Aires: IAPG, 2022. p. 215–235.

HERLINGER, R. Jr.; ZAMBONATO, E. E.; DE ROS, L. F. Influence of diagenesis on the quality of Lower Cretaceous Pre-Salt lacustrine carbonate reservoirs from Northern Campos Basin, Offshore Brazil. Journal of Sedimentary Research, v. 87, n. 12, p. 1285–1313, 2017. DOI: 10.2110/jsr.2017.70.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Paris: IEA, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global Critical Minerals Outlook 2025. Paris: International Energy Agency, 2025.

JASKULA, Brian W. Lithium. In: U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Mineral commodity summaries 2018. Reston: U.S. Geological Survey, 2018.

JASKULA, Brian W. Lithium. In: U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Mineral commodity summaries 2025. Reston: U.S. Geological Survey, 2025.

KNAPIK, E.; ROTKO, G.; MARSZAŁEK, M. Recovery of lithium from oilfield brines. Energies, v. 16, n. 18, p. 6628, 2023. DOI: 10.3390/en16186628.

KAVANAGH, L. *et al.* Global lithium sources — industrial use and future in the electric vehicle industry: a critical review. Resources, v. 7, n. 3, 2018.

KESLER, S. E. *et al.* Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. Ore Geology Reviews, v. 48, p. 55–69, 2012.

MACEDO, J. M. Evolução tectônica da Bacia de Santos e áreas continentais adjacentes. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 3, n. 3, p. 159–173, 1989.

MARTIN, G.; RENTSCH, L.; HÖCK, M.; BERTAU, M. Lithium market research – global supply, future demand and price development. Energy Storage Materials, v. 6, p. 171–179, 2017. DOI: 10.1016/j.ensm.2016.11.004.

McKINSEY & COMPANY. Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular. New York: McKinsey & Company, 2023.

MOREIRA, J. L. P. *et al.* Bacia de Santos. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 15, n. 2, p. 531–549, 2007.

PETROBRAS. Campo de Búzios atinge produção recorde de 1 milhão de barris de petróleo por dia. Rio de Janeiro: Agência Petrobras, out. 2025. Disponível em: https://agencia.petrobras.com.br/w/campo-de-búzios-atinge-produção-recorde-de-1-milhão-de-barris-de-petróleo-por-dia. Acesso em: 17/12/2025.

RICCOMINI, C. *et al.* Evolução geológica do Atlântico Sul e bacias marginais brasileiras. In: HASUI, Y. *et al.* (orgs.) Geologia do Brasil. São Paulo: Beca, 2012.

S&P GLOBAL COMMODITY INSIGHTS. Lithium from oilfield brines: the next frontier. New York: S&P Global, 2024.

SILVA, Bruna Souza da. Inferências sobre fluidos do *Pré-sal* do Campo de Búzios, Bacia de Santos, através dos gradientes de pressão de poros. 2024. 96 f. Dissertação (Mestrado em Dinâmica dos Oceanos e da Terra) – Departamento de Geologia e Geofísica, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2024.

ŠOLIĆ, Luka. Attaining sustainability in lithium supply chains: an assessment of challenges and opportunities for application of direct lithium extraction on brine deposits. Vienna: Vienna University of Technology, 2024. 85 p. Dissertação (Mestrado) – MSc Program Environmental Technology & International Affairs.

SPEIRS, J. *et al.* A greener source of materials: lithium from geothermal brines. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 2014.

UPHOLT, Boyce. In rush for lithium, miners turn to the oil fields of Arkansas. Yale Environment 360, 2024. Disponível em: https://e360.yale.edu/features/arkansas-direct-lithium-extraction. Acesso em: 15/01/2026.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Mineral commodity summaries 2021 — Lithium. Reston: USGS, 2021.

WERNY, M.; REEM, Y.; TEN HAVE, I.; BARTELS, F. The technology overview: closing the lithium supply gap with direct lithium extraction (DLE) and battery recycling. Extantia Capital [Medium], 19 dez. 2023. Disponível em: https://medium.com/extantia-capital/the-technology-overview-closing-the-lithium-supply-gap-with-direct-lithium-extraction-dle-and-d686e0e7a923. Acesso em: 23/06/2025.

XU, W. *et al.* Lithium extraction from high Mg/Li brine via electrochemical method using $LiMn_2O_4$/graphite cell. Hydrometallurgy, v. 166, p. 90–97, 2016.

YU, X. *et al.* Lithium and brine geochemistry in the Qianjiang Formation. Scientific Reports, v. 13, p. 4445, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-31421-1.