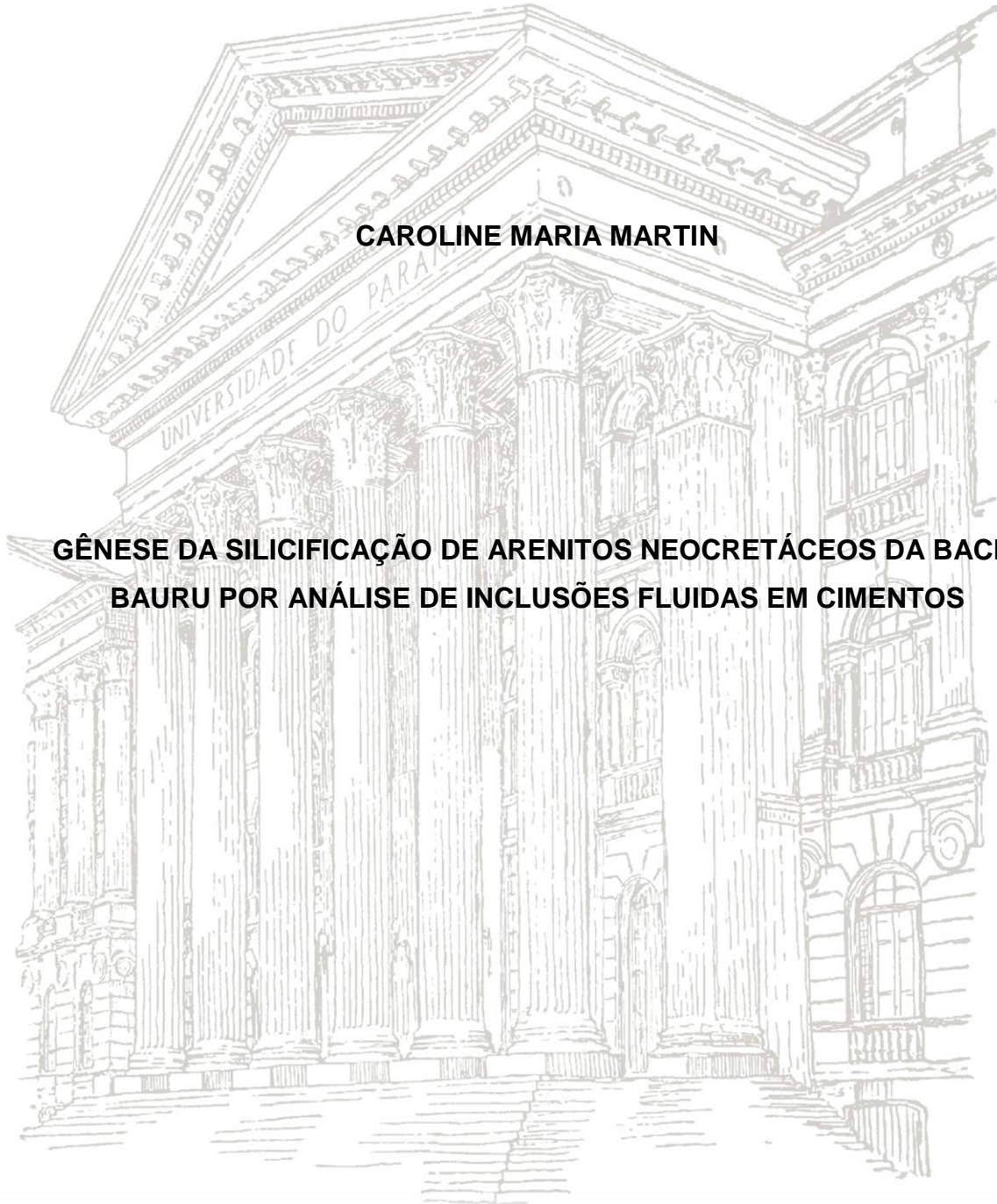


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA  
CURSO DE GEOLOGIA

**CAROLINE MARIA MARTIN**

**GÊNESE DA SILICIFICAÇÃO DE ARENITOS NEOCRETÁCEOS DA BACIA  
BAURU POR ANÁLISE DE INCLUSÕES FLUIDAS EM CIMENTOS**



CURITIBA

2017

**CAROLINE MARIA MARTIN**

**GÊNESE DA SILICIFICAÇÃO DE ARENITOS NEOCRETÁCEOS DA BACIA BAURU  
POR ANÁLISE DE INCLUSÕES FLUIDAS EM CIMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso da disciplina de TCC II (GC-132) do Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof.º Dr. Luiz Alberto Fernandes

Coorientador: Me. André Luiz Silva Pestilho

CURITIBA

2017

*“Living is easy with eyes closed, misunderstanding all you see”*

*(John Lennon)*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que me apoiaram e contribuíram para a realização deste trabalho e da minha graduação. Em especial aos meus pais, Simone Cristina S. Martin e Vinícius Caetano Martin, que sempre me incentivaram e me guiaram pelo melhor caminho, com todo o apoio e carinho. E também agradeço a toda a minha família, em especial ao meu avô Caetano Martin, por me inspirar a ingressar na universidade e avó Sonia Dorotea Martin pelo apoio. Também ao meu tio Paulo Caetano Martin, que contribuiu na realização deste trabalho.

Agradeço a todos os amigos que fiz, e que me acompanharam durante a graduação e sempre me ajudaram por todo este período. Principalmente a Thaís Zorzetto, Bianca Rocha, Janaína Duarte, Taís Muniz, Paula Neuburger, Isis Dias, Letícia Pastore, Luiza Freitas, Laisa Stingelin, Daiane Münch, Sérgio Jaensch e Alberto Botelho. Também agradeço especialmente ao André Leister, por todo o companheirismo e ajuda nas dificuldades da realização deste trabalho e na vida.

Agradeço muito ao professor Dr. Luiz Alberto Fernandes, que me orientou em todas as pesquisas da graduação, sempre me ajudando da melhor maneira possível. Também ao geólogo Me. André Luiz Silva Pestilho, que me orientou neste trabalho por completo, com muita paciência, ensinamentos e dedicação, durante todo o processo, tornando este trabalho uma oportunidade única e especial.

Por fim, agradeço à Universidade Federal do Paraná por todo o suporte e qualidade de ensino, ao LAMIR e ao CENPES, que contribuíram com a realização deste trabalho.

## RESUMO

A gênese da silicificação dos arenitos neocretáceos da Bacia Bauru foi interpretada com base em estudos petrográficos, estratigráficos e de evolução da bacia, como hidrotermal. Esta silicificação tem caráter localizado e afetou unidades litoestratigráficas distintas, com diferentes contextos diagenéticos. Os principais registros ocorrem em zona de intersecção de zonas de falhas regionais, têm extensão localizada e às vezes a mesma orientação das estruturas tectônicas. Durante a deposição dos arenitos neocretáceos também houve magmatismo alcalino, sobretudo ao redor dos limites atuais da bacia. A análise de inclusões fluidas forneceu informações sobre a temperatura e salinidade dos fluidos aprisionados no cimento silicoso. As inclusões fluidas encontradas têm como característica dimensões pequenas, da ordem de uma a duas micras, e são escassas, características comuns em inclusões fluidas aprisionadas em cimentos diagenéticos, o que dificultou as análises microtermométricas. Os resultados obtidos indicaram temperaturas altas de aprisionamento do fluido, entre 321,8°C e 388,8°C e salinidade baixa dos fluidos, entre 1,9 e 2,9 % eq. ms. NaCl, acima das diagenéticas conhecidas, e compatíveis com um agente modificador hidrotermal.

**Palavras chave:** arenitos silicificados, hidrotermal, inclusões fluidas, cimentos, microtermometria.

## ABSTRACT

The genesis of the silicification of the Neocretaceous sandstones of the Bauru Basin was interpreted, based on petrographic, stratigraphic and evolution studies of the basin, as hydrothermal. This silicification has localized aspect and has affected distinct lithostratigraphic units, with different diagenetic contexts. The main occurrences appear in the intersection zone of regional fault zones, with localized extension and sometimes the same orientation of the tectonic structures. During the deposition of the neocretaceous sandstones there was also alkaline magmatism, especially around the current limits of the basin. The fluid inclusions analysis provided information on the temperature and salinity of the trapped fluids in the siliceous cement. The fluid inclusions have small dimensions, of one to two microns, and are scarce, common characteristics in fluid inclusions trapped in diagenetic cements, that hinder the microthermometric analysis. The results of this work indicated high trapping temperatures between 321,8°C and 388,8°C and low salinity of the fluids, between 1,9 e 2,9 % eq. ms. NaCl, higher than diagenetics temperatures known, and compatible with a hydrothermal modifying agent.

*Keywords: silicified sandstones, hydrothermal, silicification, fluid inclusions, cement, microthermometry.*

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Mapa de localização dos arenitos silicificados dos Três Morrinhos – Terra Rica (PR). .....3
- Figura 2:** Mapa geológico da Bacia Bauru, Litoestratigrafia: 1. Fm. Rio Paraná, 2.Fm. Goio Erê , 3. Fm. Santo Anastácio, 4. Gr. Caiuá indiviso, 5. Fm. Vale do Rio do Peixe, 6. Fm. Araçatuba, 7. Fm. São José do Rio Preto, 8. Fm. Presidente Prudente, 9. Fm. Uberaba, Lineamentos: Rio Piquiri (Pi), Rio Alonzo (A), São Jerônimo-Curiúva (J), Guapiara (G), Paranapanema (Pb), Ibttinga-Botucatu (I), Rio Moji Guaçú (M), São Carlos Leme (S), Rio Paraná (P). Fonte: Fernandes (2004), CPRM (2001), Almeida (1980), Ferreira et al. (1981), Coimbra (1991), Riccomini (1997). .....4
- Figura 3:** Evolução Regional da Bacia Bauru (Macedo 1989). .....7
- Figura 4:** Evolução paleogeográfica da Bacia Bauru: 1.fase desértica inicial (lençóis de areia e depósitos paludiais); 2. Soerguimento das bordas e magmatismo alcalino; 3. Fase eólica-fluvial, clima predominante semiárido e condições desérticas, mas envolvendo maior disponibilidade de água (lençóis de areia, rios entrelaçados e depósitos de dunas); 4. Fase atual. Fonte: Fernandes e Ribeiro (2015). .....8
- Figura 5:** Locais de ocorrências mais importantes de arenitos silicificados na porção meridional da Bacia Bauru. 3M Três Morrinhos (PR); MD, Morro do Diabo (SP); SI, morro da fazenda Santa Ida (SP) e PR, morrote da fazenda Porto Rico. Fonte: Fernandes *et al.* (2012). .....12
- Figura 6:** morros dos Três Morrinhos, em Terra Rica – PR; b) Aspecto geral dos arenitos silicificados; c) detalhe da rocha em exposição de superfície, no topo da elevação NW dos Três Morrinhos. As fotografias são de autoria de Luiz Alberto Fernandes. ....14
- Figura 7:** Aspecto geral dos arenitos silicificados, Amostras a) 3M 17 B, b) A, c) e d) GC 62. Local de procedência: topo do morrote NW (das antenas) do conjunto Três Morrinhos.....17
- Figura 8:** a) Grãos de quartzo arredondados, com alta esfericidade, revestidos inicialmente por óxido de ferro e posteriormente por sobrecrescimento de quartzo sintaxial, formando textura poligonal com aparência de mosaico (10x; amostra 3M AB BP; PP). b) grãos de quartzo subarredondados, com baixa esfericidade, revestidos por

óxido de ferro e cimento de quartzo sintaxial, e por vezes com contatos pontuais (amostra GC 62; PX); c) grãos de quartzo subarredondados, com esfericidade alta, revestido por óxido de ferro e com cimento de quartzo sintaxial (amostra 3M 17 A BPx; PP); d) grãos de quartzo subarredondados e com esfericidade alta, revestidos por óxido de ferro e cimento sintaxial (amostra 3M 17 A; PX). Fotomicrografias de seções delgadas. Convenções: PX, polarizadores cruzados; PP, polarizadores paralelos. Local de procedência: topo do morrote NW (das antenas) do conjunto Três Morrinhos..... 19

**Figura 9:** a) Lâmina 3M 17 A, (20x; PP) e b) Lâmina GC 62 A1, (10x; PP). Exemplos de sílica microcristalina nos arenitos silicificados. Se encontram sem uma estrutura definida. Em c) Lâmina 3M 17 A, (20x; PX) e d) Lâmina 3M 17 B, (20x; PX), contatos diretos entre grãos e quartzo subarredondados, sem deposição de sílica. Em e) Lâmina 3M 17A, (10x; PP) e f) Lâmina 3M AB, (10x; PP), um crescimento secundário reliquiar (R), posteriormente envolvido pelo sobrecrecimento de quartzo (S). Abreviações: PX – polarizadores cruzados; PP – polarizadores paralelos. Fotomicrografias de seções delgadas; local de procedência: topo do morrote NW (das antenas) do conjunto Três Morrinhos.....20

**Figura 10:** Inclusões fluidas primárias hospedadas no cimento de quartzo dos arenitos silicificados de Três Morrinhos, Paraná: A) inclusão primária fluida ( amostra GC 62; PP); B) inclusão em cimento silicoso sintaxial, em arranjo de inclusões concêntrico (amostra GC 62; PP) C) Inclusão fluida 1 (amostra GC 62-1 PP); D) Inclusão fluida primária bifásica hospedada em sobrecrecimento de quartzo sintaxial (amostra GC 62-1; PP); E) em PP, e F) em PX, mostram inclusões fluidas bifásicas irregulares, em cimento silicoso sintaxial de revestimento de grão de quartzo, em arranjo aleatório de inclusões (amostra GC 62 1 A e B). Abreviações: PX – polarizadores cruzados; PP – polarizadores paralelos. ....22

**Figura 11:** Inclusões fluidas primárias hospedadas no cimento de quartzo dos arenitos silicificados de Três Morrinhos, Paraná em menor A) (100x1,75x) e maior B) (100x2,5x) aumento. Inclusão bifásica com aspecto alongado. ....23

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1:** Amostras e suas respectivas lâminas confeccionadas, dos arenitos silicificados dos Três Morrinhos (PR) ..... 15

**Tabela 2 :** Resultados da análise microtermométrica. Abreviações: Tfi – Temperatura de fusão inicial; Tfg – Temperatura de fusão do gelo; Th – Temperatura de homogeneização das fases líquida e vapor; Tfh – Temperatura de fusão da hidrohalita; NIF – Número da inclusão fluida. ....23

## LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1** – Histograma e diagrama de caixa das temperaturas de fusão de gelo (Tfg) das inclusões primárias da assembleia A dos arenitos silicificados, com número total de análises (N) igual a cinco.....24
- Gráfico 2** - Histograma e diagrama de caixa das temperaturas de homogeneização das inclusões primárias da assembleia A dos arenitos silicificados, com número total de análises (N) igual a cinco.....24
- Gráfico 3** - Histograma e diagrama de caixa da salinidade das inclusões primárias da assembleia A dos arenitos silicificados, com número total de análises (N) igual a cinco. ....25
- Gráfico 4** – Gráfico de dispersão de pontos da Salinidade x Th calculada para o total (N) de cinco inclusões fluidas analisadas.....25
- Gráfico 5** – Gráfico de distribuições de soluções de diferentes origens. O campo dos dados de inclusões fluidas estudadas encontra-se nos campos de Fluidos Geotermiais e Fluidos Metamórficos. S = água do mar (3,5%); M = meteórica. Fonte: Bodnar (1999); Dados de MVT de Bodnar *et al.*, 2014; Dados de depósito tipo Irlanda de Wilkinson (2001). ....26
- Gráfico 6** - Projeção PT de isopleias (classificadas em ms% NaCl) para a região onde as equações de baixas temperaturas e altas temperaturas são vinculadas pela equação de fusão. Também são mostradas as curvas de líquido + vapor + halita (L + V + H) e o *locus* dos pontos críticos. Fonte: Atkinson (2002). ....27

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. CONTEXTO E PROBLEMA .....	1
1.2. OBJETIVO .....	2
1.3. LOCALIZAÇÃO .....	2
2. CONTEXTO GEOLÓGICO.....	3
2.1. BACIA BAURU .....	3
<b>2.1.1. EVOLUÇÃO TECTONO-SEDIMENTAR</b> .....	4
<b>2.1.2. LITOESTRATIGRAFIA</b> .....	9
2.1.1. GRUPO CAIUÁ.....	9
2.1.2. GRUPO BAURU .....	9
<b>2.1.3. MAGMATISMO ALCALINO E SILICIFICAÇÃO</b> .....	10
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
3.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.2. DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA E SELEÇÃO DE AMOSTRAS .....	13
3.3. CONFECÇÃO DE LÂMINAS.....	14
3.4. PETROGRAFIA .....	15
3.5. ANÁLISES DE INCLUSÕES FLUIDAS .....	15
3.5.1. PETROGRAFIA DE INCLUSÕES FLUIDAS .....	15
3.5.2. ANÁLISES MICROTERMOMÉTRICAS .....	16
4. RESULTADOS .....	17
4.1. DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA .....	17
4.2. PETROGRAFIA .....	18
4.3. PETROGRAFIA DE INCLUSÕES FLUIDAS.....	21
4.4. ANÁLISES MICROTERMOMÉTRICAS .....	23
4.4.1. MEDIDAS DE BAIXA TEMPERATURA - FUSÃO FINAL DO GELO (T <sub>fg</sub> )	23
4.4.2. MEDIDAS DE ALTA TEMPERATURA – TEMPERATURA DE HOMOGENEIZAÇÃO (T <sub>h</sub> ).....	24
4.4.3. CÁLCULO DA SALINIDADE.....	24
5. DISCUSSÃO .....	26

5.1. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE INCLUSÕES FLUIDAS.....	26
5.2. IMPLICAÇÕES PARA A DIAGÊNESE DOS ARENITOS SILICIFICADOS DE TRÊS MORRINHOS – PR. ....	27
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	28
REFERÊNCIAS.....	30

# 1. INTRODUÇÃO

Esta monografia é resultado do Trabalho de Conclusão de Curso de Geologia, da Universidade Federal do Paraná, realizado em 2017. Consiste em um estudo de inclusões fluidas analisadas através de microtermometria, encontradas em cimentos de arenitos silicificados neocretáceos da porção meridional da Bacia Bauru.

## 1.1. CONTEXTO E PROBLEMA

Os arenitos silicificados neocretáceos dos grupos Caiuá e Bauru ocorrem em diferentes locais da Bacia Bauru. Os registros mais notáveis destes processos estão em Três Morrinhos (PR), Morro do Diabo (SP), morro da fazenda Santa Ida (SP) e morrote da fazenda Porto Rico. As ocorrências mais expressivas concentram-se no cruzamento de lineamentos regionais de direção NE, como a Zona de Falhamento Loanda-Presidente Epitácio (Milani *et al.* 2007), com zonas de falha de direção NW, do Arco de Ponta Grossa, que representam algumas das principais direções estruturais reconhecidas na Bacia do Paraná (Fernandes e Coimbra 1993). Ocorrências de derrames de natureza analcimítica contemporâneos à sedimentação neocretácea e associação entre rochas siliciclásticas e vulcanoclásticas na borda setentrional da bacia sugerem a importância das atividades tectônicas e magmatismo alcalino associado na evolução da Bacia Bauru (Fernandes e Coimbra 1996).

A origem da silicificação dos arenitos tem sido considerada hidrotermal por alguns autores (*e.g.* Milani *et al.* 2007). Estas silicificações não correspondem intervalos estratigráficos específicos reconhecíveis em campo, ocorrendo em diferentes unidades litoestratigráficas. Estudos geotermométricos e de isótopos estáveis de inclusões fluidas podem permitir avanço na verificação de modelos para os processos de cimentação pós-sedimentar por sílica.

Diferentes processos diagenéticos podem ser responsáveis pela cimentação de arenitos por sílica, como a cimentação precoce (eodiagenética) na pedogênese, formando crostas (silcretas), ou em condições de soterramento (meso diagênese), ou ainda a circulação de fluidos aquecidos em eventos hidrotermais.

O estudo das inclusões fluidas fornece importantes informações relacionadas à natureza dos processos diagenéticos (Goldstein & Reynolds 1994, Goldstein 2001). A caracterização da temperatura e composição dos fluidos envolvidos

durante a diagênese permite inferir cenários geológicos nos quais a cimentação das rochas sedimentares ocorreu em condições de soterramento (e.g., Goldstein 2001) ou, por efeito de processos hidrotermais (e.g. Wilkinson 2001). Portanto, o estudo das inclusões presentes nos arenitos silicificados da área de Três Morrinhos pode trazer novas evidências com relação à gênese da silicificação dos arenitos neocretáceos da Bacia Bauru.

## **1.2. OBJETIVO**

.A pesquisa teve como objetivo obter informações adicionais sobre a origem do processo de silicificação dos arenitos eólicos do Grupo Caiuá, mediante medidas da temperatura e salinidade dos fluidos diagenéticos aprisionados em cimentos associados a silicificação.

Como objetivos específicos, buscou-se:

- 1) identificar e caracterizar os cimentos diagenéticos (composição mineral, hábitos, texturas e interrelações);
- 2) estabelecer a relação temporal de formação dos cimentos diagenéticos;
- 3) caracterizar as assembleias de inclusões fluidas (minerais hospedeiros, forma de ocorrência, número de fases fluidas, relação temporal entre diferentes assembleias); e
- 4) identificar as temperaturas mínimas de formação das inclusões fluidas e a composição dos fluidos aprisionados.

## **1.3. LOCALIZAÇÃO**

A área de estudo é composta por ocorrências localizadas de arenitos silicificados distribuídas na bacia, desde Uberaba (MG) até o norte do Paraná, onde as mais importantes se encontram nos morros do Diabo e morro da fazenda Santa Ida no município de Teodoro Sampaio (SP), morrote da fazenda Porto Rico, em Porto Rico (PR) e em Três Morrinhos, em Terra Rica (PR). Deste último local, de coordenadas UTM 330.649/7.479.616 provieram as amostras das rochas analisadas nesta pesquisa (Figura 1).

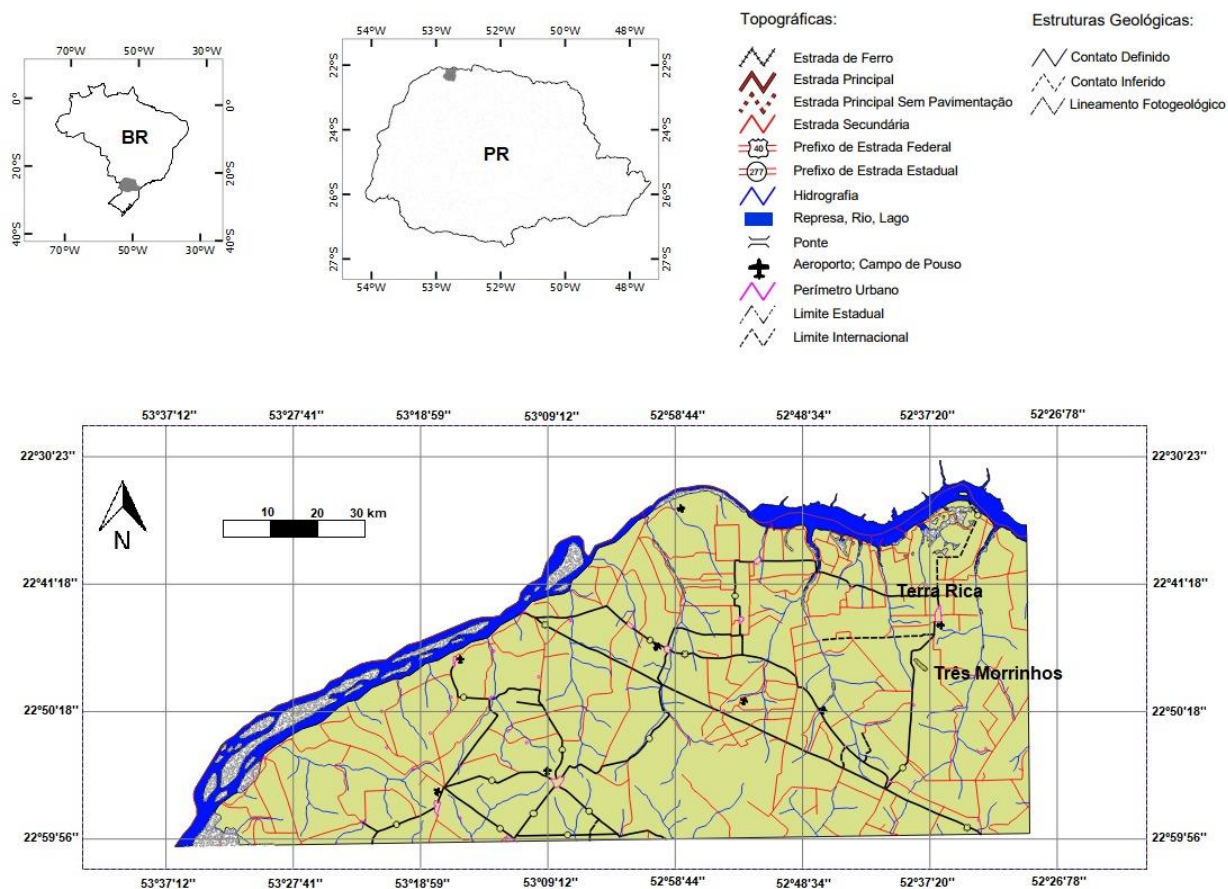


Figura 1: Mapa de localização dos arenitos silicificados dos Três Morrinhos – Terra Rica (PR).

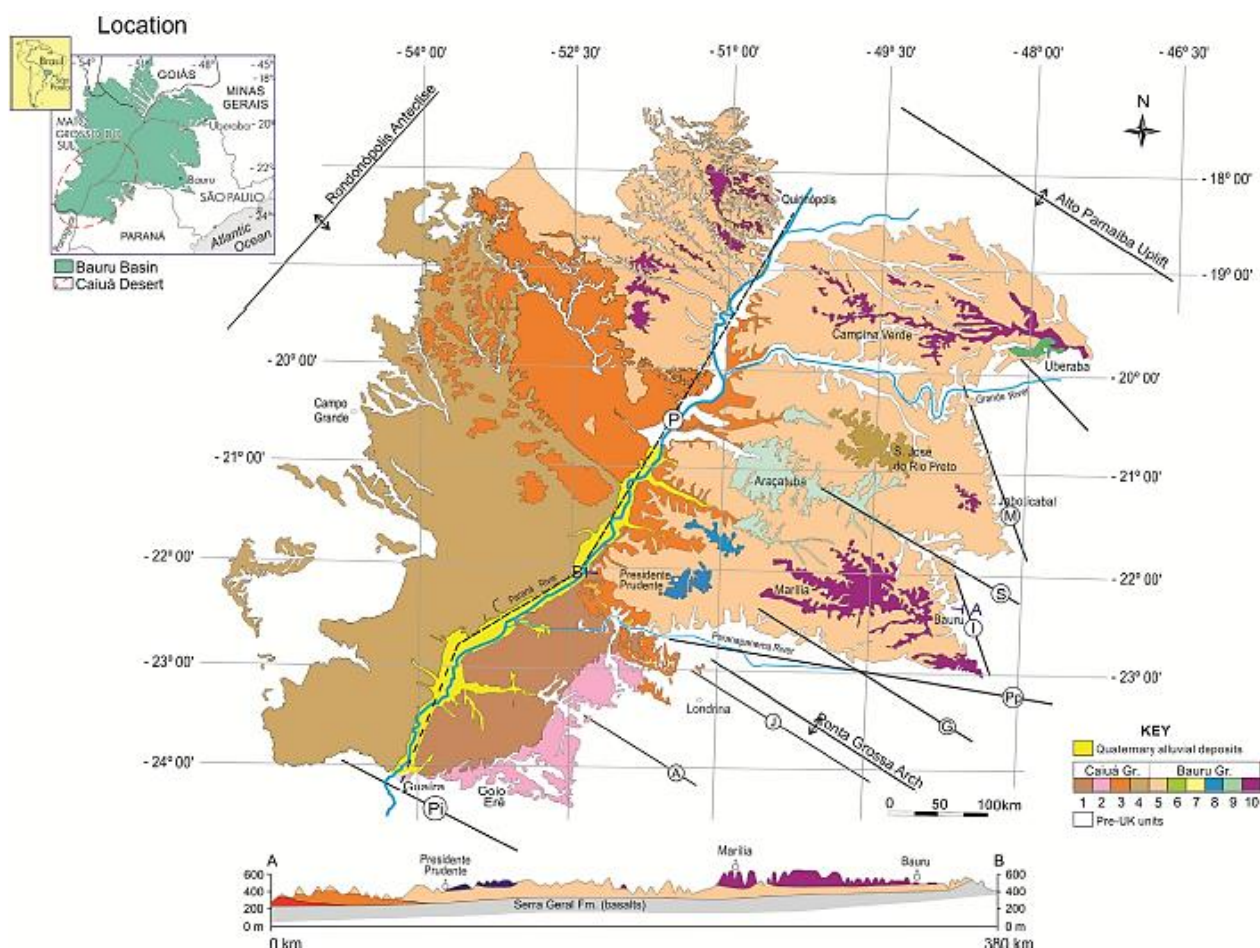
## 2. CONTEXTO GEOLÓGICO

As rochas silicificadas estudadas analisadas nesta pesquisa são provenientes do norte do Paraná, da porção meridional da Bacia Bauru.

### 2.1. BACIA BAURU

A Bacia Bauru foi preenchida por uma sequência siliciclástica essencialmente arenosa, com aproximadamente 480 m de espessura máxima preservada, hoje em

área de 370.000 km<sup>2</sup>. Os arenitos acumularam-se sobre uma inconformidade erosiva em rochas de fluxos basálticos da Província Paraná Etendeka, (Turner et al. 1994). A supersequência Bauru se formou durante o Cretáceo Superior (Milani et al 2007) e ocorre em porções dos estados de São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e Goiás no Brasil, e uma parte no nordeste do Paraguai (Figura 2).



**Figura 2:** Mapa geológico da Bacia Bauru, Litoestratigrafia: 1. Fm. Rio Paraná, 2. Fm. Goio Erê, 3. Fm. Santo Anastácio, 4. Gr. Caiuá indiviso, 5. Fm. Vale do Rio do Peixe, 6. Fm. Araçatuba, 7. Fm. São José do Rio Preto, 8. Fm. Presidente Prudente, 9. Fm. Uberaba, Lineamentos: Rio Piquiri (Pi), Rio Alonzo (A), São Jerônimo-Curiúva (J), Guapiara (G), Paranapanema (Pb), Ibitinga-Botucatu (I), Rio Moji Guaçu (M), São Carlos Leme (S), Rio Paraná (P). Fonte: Fernandes (2004), CPRM (2001), Almeida (1980), Ferreira et al. (1981), Coimbra (1991), Riccomini (1997).

### 2.1.1. EVOLUÇÃO TECTONO-SEDIMENTAR

O Derrame Magmático Continental Paraná-Etendeka ocorreu após um imenso fraturamento da crosta terrestre durante o Cretáceo Inferior, onde o seu principal

período de vulcanismo se deu entre 137 e 127 Ma (Turner *et al.* 1994). Tal evento magmático é associado à ruptura do Gondwana e início da evolução do Oceano Atlântico Sul, e que marcou o fim da sedimentação em extensas áreas intracratônicas, como a Bacia do Paraná (Fernandes e Ribeiro 2015). A acumulação de cerca de 2000 m de espessura de lavas basálticas causou uma inversão no comportamento crustal, resultando em um novo ajuste isostático na porção da Plataforma Sul Americana onde se depositaram os derrames Serra Geral, gerando uma depressão regional. Durante o Cretáceo Superior, houve um acúmulo de material siliciclástico nesta depressão. O material siliciclástico que abasteceu a sedimentação na bacia originou-se da alteração e erosão de rochas paleozoicas e pré-cambrianas expostas nas margens da Bacia Bauru (Fernandes e Ribeiro 2015). Considerando o rompimento do supercontinente Gondwana, Fernandes e Coimbra (1996) separaram a sequência sedimentar do Cretáceo Superior da Bacia do Paraná, afirmando que sua acumulação ocorreu em uma nova bacia, então denominada Bauru.

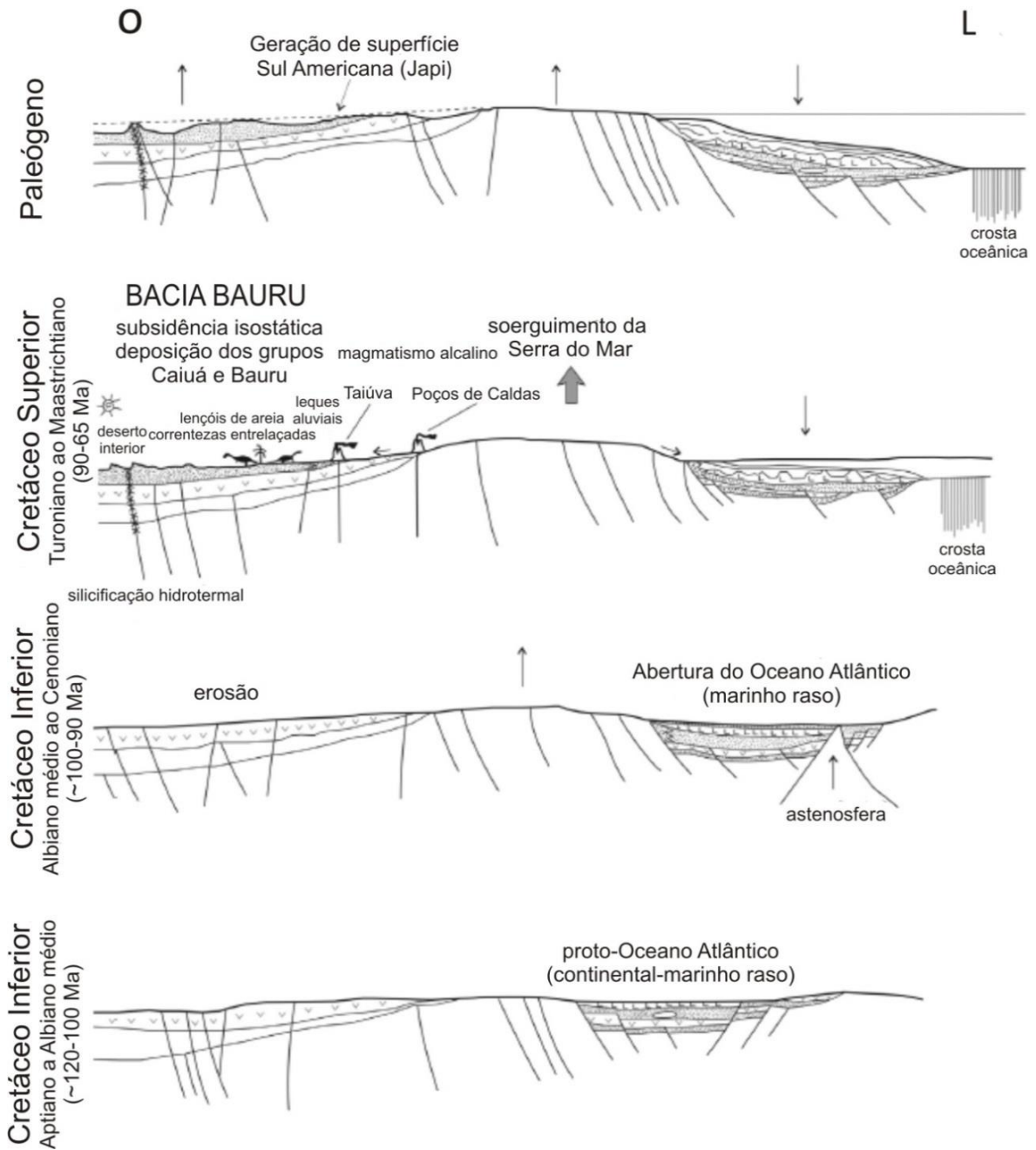
Segundo Fernandes e Coimbra (2015), o principal mecanismo de subsidência durante a evolução da Bacia Bauru foi a flexura litosférica causada pela sobrecarga basáltica. Os limites atuais da bacia são altos estruturais regionais, onde se localizam muitos centros de magmatismo alcalino localizados. Durante a deposição da supersequência Bauru houve dois períodos de maior intensidade de eventos alcalinos intrusivos: 87 – 80 Ma e 70-60 Ma (Almeida e Melo 1981). O registro desses eventos incluem corpos intrusivos que pontuam os limites da bacia, mais frequentes na borda nordeste.

O preenchimento da Bacia Bauru ocorreu simultaneamente com a lenta e contínua subsidência isostática do embasamento (Fernandes e Ribeiro 2015) (Figura 3). Esta situação é indicada pela ausência de movimentos tectônicos locais significantes, e pelo fato de que as maiores espessuras dos depósitos sedimentares coincidem com as áreas de maior acumulação de lavas basálticas.

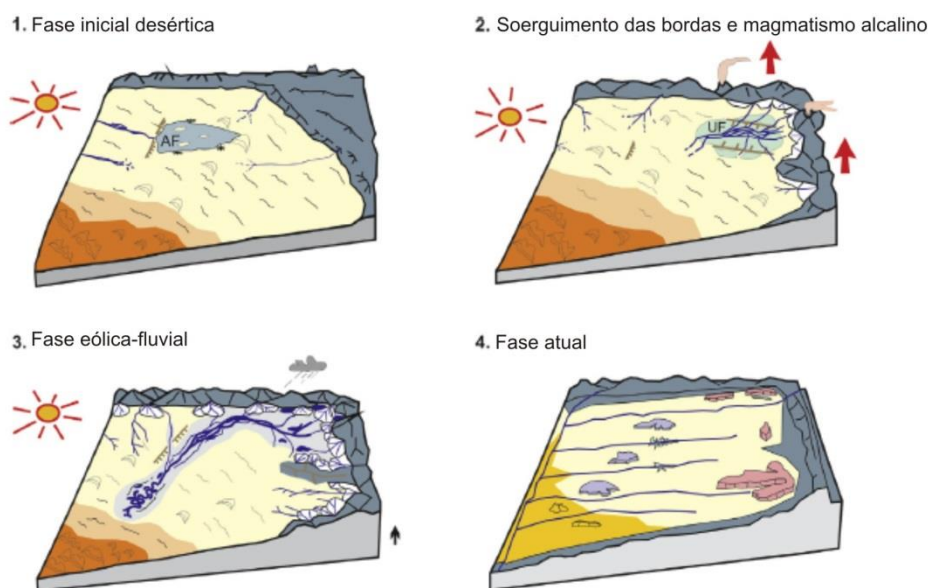
Durante a subsidência do embasamento, os principais padrões estruturais foram mantidos como resultado de uma herança tectônica (Fernandes e Ribeiro 2015). Além do soerguimento das margens da bacia, a evolução da bacia foi influenciada pela ação dos altos internos e alinhamentos, como o Paranapanema

(Fúlfaro 1974) e Tietê (Coimbra *et al.* 1997). No Maastrichtiano, atividades tectônicas, principalmente associadas aos lineamentos Paranapanema e Ibitinga-Botucatu, causaram o aumento do suprimento de sedimentos e vulcanismo alcalino ao longo do Lineamento Rio Moji-Guaçu. Tal episódio vulcanossedimentar é compatível com a tectônica sin-deposicional de extensão. A deformação pós-sedimentar é marcada por dois regimes tectônicos de transcorrência sobrepostos, provavelmente neotectônicos (Riccomini 1997), como indicado, por exemplo, pelo Lineamento do Rio Paraná.

A topografia atual do substrato da bacia mostra um bom ajuste com a distribuição de associações de litofácies. As unidades basais da sequência Bauru preencheram áreas originalmente mais baixas, reduzindo e eliminando desníveis mais significativos. Segundo Fernandes e Ribeiro (2015), o preenchimento da Bacia Bauru ocorreu em duas fases principais (Figura 4). A primeira fase ocorreu, sobretudo, em condições desérticas (trato de sistema de deserto), e a segunda fase envolveu mais água, embora o clima fosse semiárido (trato de sistema fluvial-eólico). A primeira fase corresponde ao progressivo soterramento do substrato basáltico por depósitos arenosos extensos e homogêneos, formados principalmente em lençóis areia, com dunas de tamanho moderado e depósitos de loesse intercalados. Nesta fase, a baixa atividade fluvial se restringia a fluxos de escoamento desérticos (*wadis*). Em termos litoestratigráficos, o trato de sistema desértico compreende as formações Vale do Rio do Peixe, Santo Anastácio, Goio Erê e Rio Paraná. Na fase inicial de preenchimento, o relevo original do substrato criou condições endorréicas na zona interna da bacia, onde se instalou extensa área de charcos, em um clima semiárido (Pântano de Araçatuba). A segunda fase de sedimentação foi marcada por importantes mudanças no contexto geográfico da bacia, devido a reativações tectônicas que resultaram no avanço de leques aluviais e mudanças climáticas graduais que trouxeram mais umidade, e se desenvolveram sistemas fluviais de maior porte, ainda que em contexto regional semiárido. Em termos litoestratigráficos, o trato de sistema fluvial-eólico é composto pelas formações Marília, São José do Rio Preto e Presidente Prudente.



**Figura 3:** Evolução Regional da Bacia Bauru (Macedo 1989).



**Figura 4:** Evolução paleogeográfica da Bacia Bauru: 1.fase desértica inicial (lençóis de areia e depósitos paludiais); 2. Soerguimento das bordas e magmatismo alcalino; 3. Fase eólica-fluvial, clima predominante semiárido e condições desérticas, mas envolvendo maior disponibilidade de água (lençóis de areia, rios entrelaçados e depósitos de dunas); 4. Fase atual. Fonte: Fernandes e Ribeiro (2015).

Durante as duas fases de sedimentação o clima se manteve quente e seco, com condições desérticas mais para o interior da bacia. Na principal fase de soerguimento das bordas, vários corpos de rochas alcalinas foram colocados em altos marginais. Há registro de magmatismo extrusivo próximo da atual margem leste da bacia, designados de Analcimitos Taiúva, e silicificação localizada na porção sul da bacia (Fernandes & Ribeiro 2015).

No novo cenário da segunda fase deposicional a bacia era delimitada por importantes altos tectônicos: a antéclise de Rondonópolis (Coimbra 1991) no noroeste, o alto de Alto Parnaíba (Hasui e Haralyi 1991) no nordeste, e a Serra do Mar (Almeida 1976) no leste.

O preenchimento da bacia foi alimentado por leques aluviais marginais e sistemas de rios distributários da margem nordeste (membros Serra da Galga e Ponte Alta) e sistemas entrelaçados a meandantes arenosos (formações São José do Rio Preto e Presidente Prudente). Devido ao progressivo aumento na evaporação e na escassez de água no ambiente, a aridez aumentava rumo ao interior, até o

desaparecimento do aporte de natureza fluvial nas planícies arenosas de lençóis de areia, marginais do deserto Caiuá.

O sentido de movimento do substrato da Bacia Bauru se inverteu entre o final do Cretáceo Superior e Paleógeno Inicial. Com a elevação e exposição dos depósitos, iniciou-se um novo ciclo de erosão, no qual a Superfície Sul-Americana (King 1956 apud Fernandes & Ribeiro 2015) ou Japi (Almeida 1964) se desenvolveu.

### **2.1.2. LITOESTRATIGRAFIA**

A Bacia Bauru é composta por dois grupos cronocorrelatos (Fernandes e Coimbra 2000): Caiuá (formações Santo Anastácio, Rio Paraná e Goio Erê) e Bauru (formações Vale do Rio do Peixe, São José do Rio Preto, Presidente Prudente, Araçatuba, Marília e Uberaba, além dos Analcimitos Taiúva). Os grupos têm contatos graduais e interdigitados, e o contato basal da sequência é associado geralmente a um nível brechóide sustentado por matriz arenosa imatura, com clastos angulosos de basalto e cimento carbonático.

#### **2.1.1. GRUPO CAIUÁ**

O Grupo Caiuá é composto pelas formações, Rio Paraná, Goio Erê e Santo Anastácio. Compreende principalmente depósitos arenosos acumulados em ambiente eólico (Fernandes e Coimbra 1994). As formações são definidas por Fernandes e Coimbra (1996) como: Rio Paraná e Goio Erê compostas por arenitos quartzosos (quartzoarenitos) marrom-avermelhados a arroxeados, finos a muito finos, por vezes subarcoseanos, com característica estratificação cruzada. Diferenciam-se pelo arranjo geométrico dos litossomas, maturidade (textural e mineralógica), bem como pela disposição geográfica na bacia. A Formação Santo Anastácio, é constituída por arenitos quartzosos (quartzoarenitos) marrom-arroxeados claro, eventualmente subarcoseanos, muito finos a finos, com fração siltica subordinada. Apresentam um aspecto maciço, às vezes com estratificação plano-paralela ou cruzada de baixa inclinação, mal definidas.

#### **2.1.2. GRUPO BAURU**

O Grupo Bauru é composto pelas formações Adamantina, Marília, Uberaba e Analcimitos Taiúva (Fernandes e Coimbra 1996). A Formação Adamantina constutui-

se da associação de arenitos finos a muito finos e lamitos siltosos, de cor rósea a castanho, com intercalações de argilitos de cor castanho-avermelhado. Possui em geral estratos maciços, ou de acamamento plano-paralelo, alternados com camadas de estratificação cruzada de médio a pequeno porte. A Formação Marília compreende arenitos quartzosos e conglomerados, textural e mineralogicamente imaturos, dispostos em estratos maciços de espessura métrica, com cimentação e concreções carbonáticas (calcretes). A Formação Uberaba é constituída por arenitos com cimento calcítico e/ou matriz argilosa, vede, com intercalações subordinadas de siltitos, argilitos, arenitos conglomeráticos e conglomerados arenosos, vulcanoclásticos. Os Analcimitos Taiúva constituem rochas efusivas de caráter alcalino, ricas em analcima, intercaladas na Formação Adamantina.

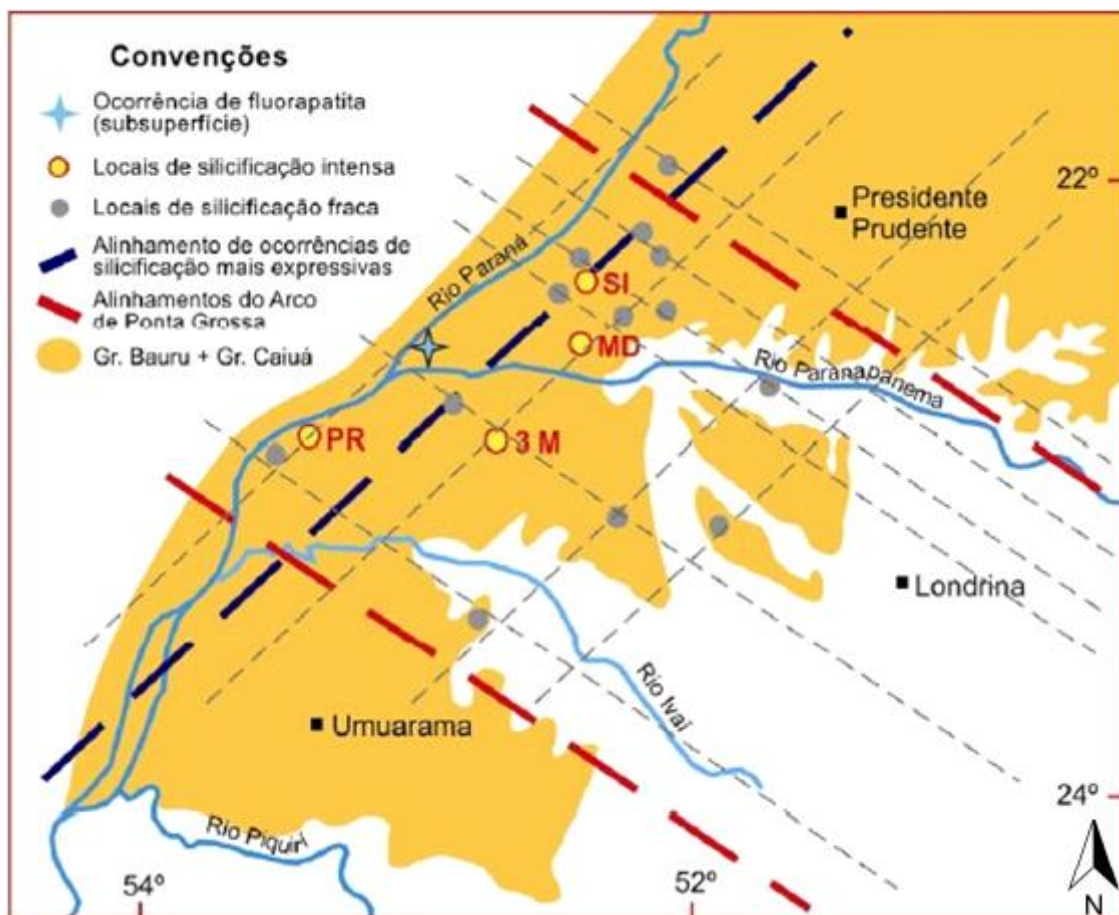
### **2.1.3. MAGMATISMO ALCALINO E SILICIFICAÇÃO**

Os limites atuais da Bacia Bauru coincidem em grande parte com altos tectônicos regionais, pontuados por centros de magmatismo alcalino neocretáceos. Segundo Almeida e Melo (1981) as manifestações alcalinas mesozoico-cenozóicas do centro e sul do Brasil ocorreram em dois períodos distintos. O primeiro no Jurássico Superior-Cretáceo Interior (Neocomiano) foi contemporâneo ao vulcanismo Serra Geral, ou seja, portanto pré-sedimentação na Bacia Bauru. O segundo período, do intervalo Aptiano-Eoceno, compreende dois máximos de intensidade de eventos intrusivos: 87-80 Ma e 70-60 Ma, contemporâneos à sedimentação da sequência neocretácea. Ocorrências de derrames de natureza analcimítica contemporâneos à sedimentação da atual Formação Vale do Rio do Peixe em São Paulo (Analcimitos Taiúva) e associação entre rochas siliciclásticas e vulcanoclásticas na borda setentrional da bacia sugerem a importância das atividades tectônicas e magmatismo alcalino associado na evolução da Bacia Bauru (Fernandes e Coimbra 1996).

São conhecidas diversas ocorrências de silicificação na Bacia Bauru. Fernandes *et al.* (1993) descreveram a silicificação na sua porção meridional como pontual e às vezes afetando ao mesmo tempo várias unidades. Os autores descreveram diversas ocorrências de silicificação na porção meridional da Bacia Bauru, localizadas, às vezes afetando indistintamente mais de uma unidade litoestratigráfica. Os arenitos silicificados encontrados na porção meridional da

Bacia Bauru se dispõem na forma de morrotes, que se destacam da paisagem plana da região. Estas ocorrências são os morros do Diabo e da Fazenda Santa Ida (Pontal do Paranapanema, São Paulo) e os morros dos Três Irmãos e da Fazenda Porto Rico, Paraná, Figura 5. As ocorrências de arenitos silicificados presentes nos grupos Caiuá e Bauru são encontradas na Região Noroeste do Paraná e Extremo-Oeste do Estado de São Paulo, onde as mais expressivas possuem alinhamento segundo duas das três principais direções estruturais importantes reconhecidas na Bacia do Paraná: segundo NE, se concentrando em zonas de cruzamento com estruturas NW, no prolongamento oeste do Arco de Ponta Grossa (Fernandes e Coimbra 1993).

A origem da silicificação dos arenitos é considerada hidrotermal (Brandt Neto *et al.* 1978), pois além de indícios minerais, as rochas silicificadas atingem simultaneamente unidades estratigráficas distintas e possuem preenchimentos por sílica com diferentes texturas, em contextos diagenéticos distintos, tendo assim características peculiares que permitem supor que os processos de silicificação identificados nesta porção da Bacia Bauru são de natureza hidrotermal, possivelmente relacionados a estruturas de direção nordeste, como a Zona de Falhamento Loanda-Presidente Epitácio (Milani *et al.*, 2007). Características petrográficas tais como o preenchimento posterior por sílica microcristalina pressupõe aumento na concentração de sílica resultando em rápida precipitação, e a presença de paligorsquiita em zonas brechadas dos basaltos subjacentes e carbonato-fluorapatita nos arenitos também permite supor o processo de silicificação hidrotermal, segundo Coimbra (1991). A ocorrência de analcima em arenitos basais da Formação Adamantina em amostras de sondagem da região de Macedônia, no Noroeste do Estado de São Paulo foi relatada por Brandt Neto *et al.* (1978), onde estes associaram sua origem a um evento hidrotermal possivelmente contemporâneo ao magmatismo alcalino registrado nas imediações de Jaboticabal (Coimbra *et al.* 1981).



**Figura 5:** Locais de ocorrências mais importantes de arenitos silicificados na porção meridional da Bacia Bauru. 3M Três Morrinhos (PR); MD, Morro do Diabo (SP); SI, morro da fazenda Santa Ida (SP) e PR, morrote da fazenda Porto Rico. Fonte: Fernandes *et al.* (2012).

Uma feição sugestiva da associação entre atividade tectônica e silicificação foi observada no alto do Morro Três Irmãos (PR), onde há uma faixa subvertical (direção NNE), de 0,7 m de espessura com aspecto brechóide, silicificada, como o arenito adjacente. Algumas falhas de pequeno deslocamento vertical foram encontradas em locais onde o arenito ocorre silicificado (base do Morro do Diabo, São Paulo).

No Cretáceo Superior, o substrato da Bacia Bauru passou a ter um comportamento ascensional mais intenso, com movimentação de blocos principalmente associada a estruturas NE, como reflexo de alçamento da borda leste da Plataforma Sul-Americana (criação da Serra do Mar) e, secundariamente, da Orogênese Andina na borda oeste.

Estruturas atribuídas a eventos sísmicos penecontemporâneos à deposição do Grupo Caiuá, no Pontal do Paranapanema foram descritas por Coimbra et al. (1992), onde esta sismicidade tal como o hidrotermalismo provavelmente sincrônico ao magmatismo alcalino neocretáceos estariam relacionados ao mesmo contexto tectônico

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Para a realização do objetivo deste trabalho foram realizadas 5 etapas, buscando assim um estudo de referências anteriores, a descrição do material de estudo e um novo método ainda não utilizado antes nesta região para complementar as informações já descritas anteriormente, trazendo assim novas conclusões.

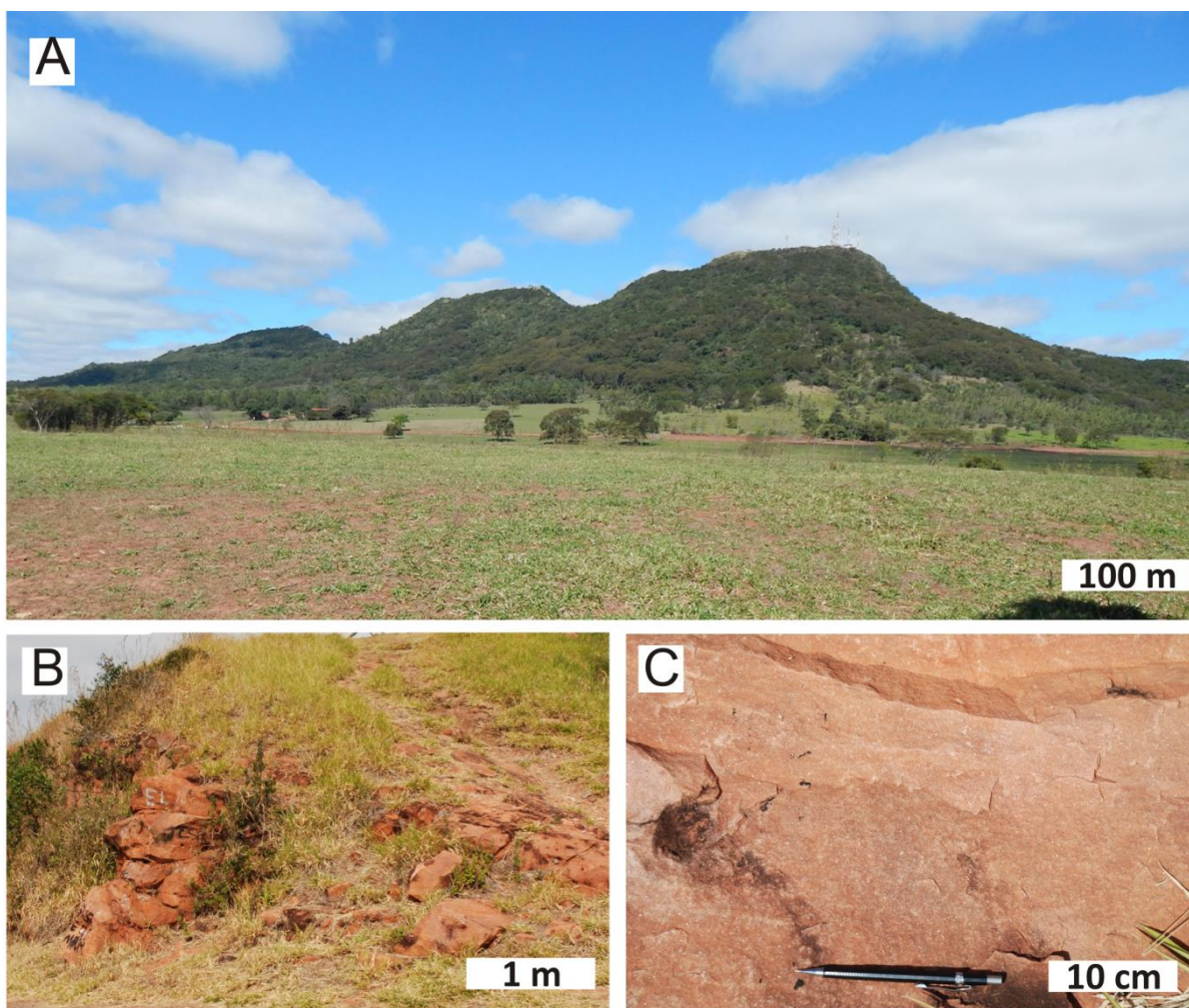
#### **3.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A revisão bibliográfica consistiu em compilação de trabalhos que tratem da geologia dos arenitos neocretáceos da Bacia Bauru e a origem da silicificação destes (e.g. Fernandes e Ribeiro 2015, Fernandes *et al.* 1993), e sobre a utilização dos métodos de análise e interpretação de inclusões fluidas (e.g. Roedder 1984, Goldstein & Reynolds 1994).

#### **3.2. DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA E SELEÇÃO DE AMOSTRAS**

Amostras dos arenitos silicificados coletadas em superfície, pertencentes ao acervo pessoal do orientador foram utilizadas para esta pesquisa. Foram selecionadas 3 amostras em um mesmo afloramento (GC 32, 3M 26.5.17 A e 3M 26.5.17 B) (Figura 6A - C), situadas nas coordenadas UTM 330.649/7.479.616. A caracterização macroscópica foi realizada com o uso de lupas manuais de 10x e observação a olho nu. Essa etapa visou à descrição das texturas e estruturas deposicionais e feições diagenéticas, visando especialmente a seleção de amostras com maior grau de silicificação que pudessem ser utilizadas na confecção de

lâminas para o estudo de inclusões fluidas.



**Figura 6:** A) Morros dos Três Morrinhos, em Terra Rica – PR; B) Afloramento de arenito silicificado localizado no topo da elevação NW dos Três Morrinhos; C) Detalhe do arenito silicificado em exposição de superfície, no topo da elevação NW dos Três Morrinhos. As fotografias são de autoria de Luiz Alberto Fernandes.

### 3.3. CONFECÇÃO DE LÂMINAS

O total de 10 lâminas foram confeccionadas: três lâminas petrográficas convencionais, com 30  $\mu\text{m}$  de espessura e 7 bipolidas, próprias ao estudo de inclusões fluidas, com espessura entre 90 e 110  $\mu\text{m}$  (Tabela 1). As lâminas foram feitas com o uso de máquina de corte de desbaste Struers, modelo Discoplan TS™; máquina de rebaixamento Struers, modelo Labopol 35; Serra de precisão Struers, modelo Secoton 50™; sistema de impregnação de amostras Struers, no laboratório

de laminação do LAMIR – Laboratório de Minerais e Rochas e no IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo.

**Tabela 1-** Amostras e suas respectivas lâminas confeccionadas, dos arenitos silicificados dos Três Morrinhos (PR)

<b>Amostra</b>	<b>Lâminas</b>			
<b>GC 62</b>	GC 62	GC 62 1 BP	GC 62 A BP	GC 62 B BP
<b>3M 26.5.17 A</b>	3M 17 A	3M 17 A BP	3M AB BP	
<b>3M 26.5.17 B</b>	3M 17 B	3M B	3M 17 B	
<b>171/15</b>	171/15 2BP	171/15 3BP	171/15 4BP	

### **3.4. PETROGRAFIA**

A petrografia visa à caracterização das diferentes litofácies em termos de porosidade, seleção, maturidade mineralógica e a sua evolução diagenética, com a identificação de diferentes gerações de cimentos, fases hospedeiras de inclusões fluidas, e as assembleias de inclusões fluidas (Roedder 1984, Goldstein & Reynolds 1994). A petrografia de arenitos com inclusões fluidas foi realizada usando microscópio de polarização ZEISS I, Imager. A2m™; e *software* para aquisição e tratamento de imagens ZEISS, Axio Vision™.

### **3.5. ANÁLISES DE INCLUSÕES FLUIDAS**

#### **3.5.1. PETROGRAFIA DE INCLUSÕES FLUIDAS**

Os estudos petrográficos definiram os tipos de inclusões fluidas e seus modos de ocorrência. Estas definições permitiram a determinação das Assembleias de Inclusões Fluidas (Goldstein & Reynolds, 1994; Goldstein, 2003), essenciais para a interpretação dos resultados das análises microtermométricas. Foi feita também a caracterização de inclusões fluidas quanto a sua classificação genética (Goldstein & Reynolds 1994, Kerkhof & Hein 2001, Goldstein 2003) em:

(a) *Inclusões Primárias*: por definição, são aprisionadas durante a formação do cristal hospedeiro. Apresentam uma distribuição controlada por planos de

crescimento do mineral, ou com distribuição aleatória ou isolada dentro do mineral hospedeiro;

(b) *Inclusões Pseudossecundárias*: inclusões fluidas geradas em microfissuras formadas durante o crescimento do cristal hospedeiro, ocorrendo em arranjo planar linear intracristalino com terminação das trilhas restritas ao interior do cristal hospedeiro;

(c) *Inclusões Secundárias*: são geradas a qualquer momento após o crescimento do mineral hospedeiro. Ocorrem em arranjo planar atravessando diferentes cristais, em planos de fratura, também denominados de planos de inclusões fluidas (Lespinasse, 1999).

### 3.5.2. ANÁLISES MICROTERMOMÉTRICAS

A microtermometria visou definir propriedades físico-químicas do fluido. É um método não destrutivo, que mede a temperatura na qual ocorrem pontos de mudanças de fases devido ao aquecimento ou ao resfriamento do fluido aprisionado na inclusão fluida, fornecendo grande quantidade de informações importantes a respeito do fluido diagenético se obedecendo as Regras de Roedder (Pestilho & Monteiro, 2017), tais informações como (1) pressão e temperatura de aprisionamento da inclusão fluida, (2) a composição em termos do sistema químico dominante e da salinidade, e (3) densidade do fluido (Goldstein & Reynolds 1994).

Para essa análise foi utilizado um microscópio ZEISS Imager.A2m™ acoplado a uma platina microtermométrica de aquecimento/resfriamento Linkam THMSG 600™ de precisão 0,5 °C. A aferição das medidas foi feita a partir da calibração prévia do equipamento com o uso de inclusões fluidas sintéticas de composição H<sub>2</sub>O puro (densidade crítica) e H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> (25% mol). As medidas dos pontos de fusão do CO<sub>2</sub> líquido (Valor esperado = -56,6 °C), do ponto tríplice da água (Valor esperado = 0 °C) e do ponto crítico da água (Valor esperado = 374,5 °C) foram tomadas e comparadas com os valores esperados para traçar uma curva de calibração do equipamento. As análises foram realizadas no LAMIR – Laboratório de Minerais e Rochas da UFPR (LAMIR) e na Gerência de Geoquímica, CENPES – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello da Petrobrás (CENPES), em estagio realizado em setembro de 2017.

A salinidade foi calculada com relação a percentagem de peso de equivalente de NaCl para todas as inclusões fluidas, onde foi utilizada a equação empírica para o sistema NaCl-H<sub>2</sub>O de Bodnar (1993):

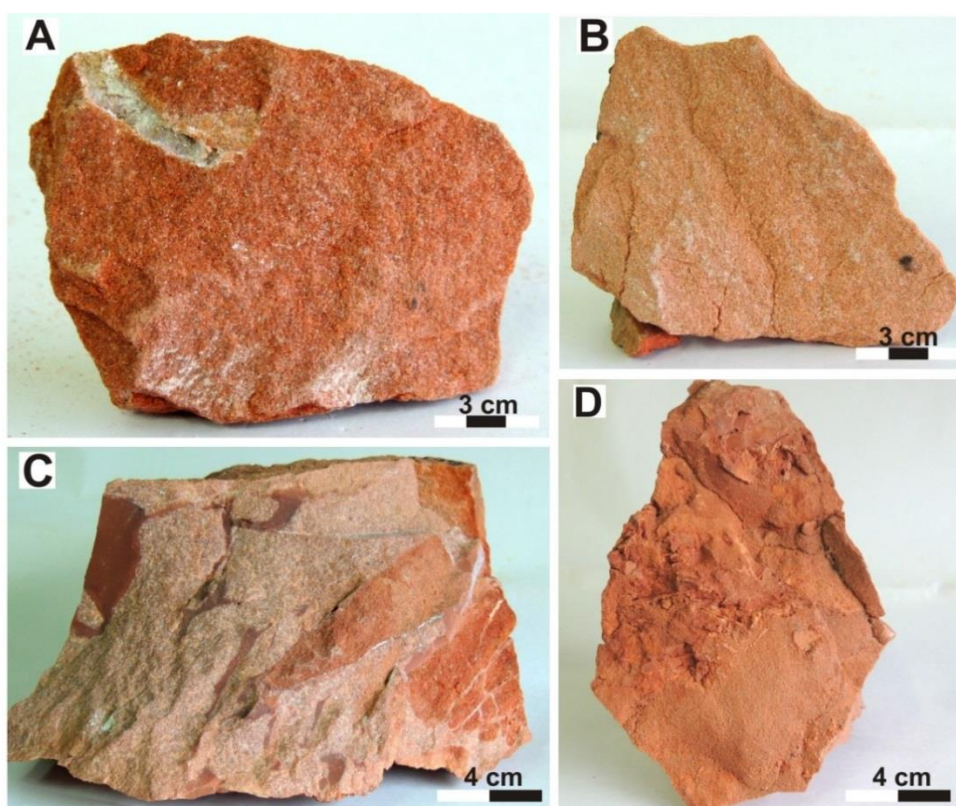
$$\text{Salinity} = 0.00 + 1.78\theta - 0.0442\theta^2 + 0.000557\theta^3, \quad (1)$$

$\theta$  = depressão do ponto de congelamento em graus Celsius.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA

As amostras consistem de arenitos maciços (Figuras 7A - B) pouco intemperizadas, de cor laranjada. A granulação é fina a muito fina, com esfericidade alta e grãos subarredondados. A composição é de quartzo, minerais máficos não identificados e magnetita no arcabouço sustentado por grãos, e cimentados por quartzo e óxido de ferro. São observadas feições como vênulas de quartzo (Figuras 7 C e D), com tamanhos de até 4 cm de espessura e 10 cm de comprimento.



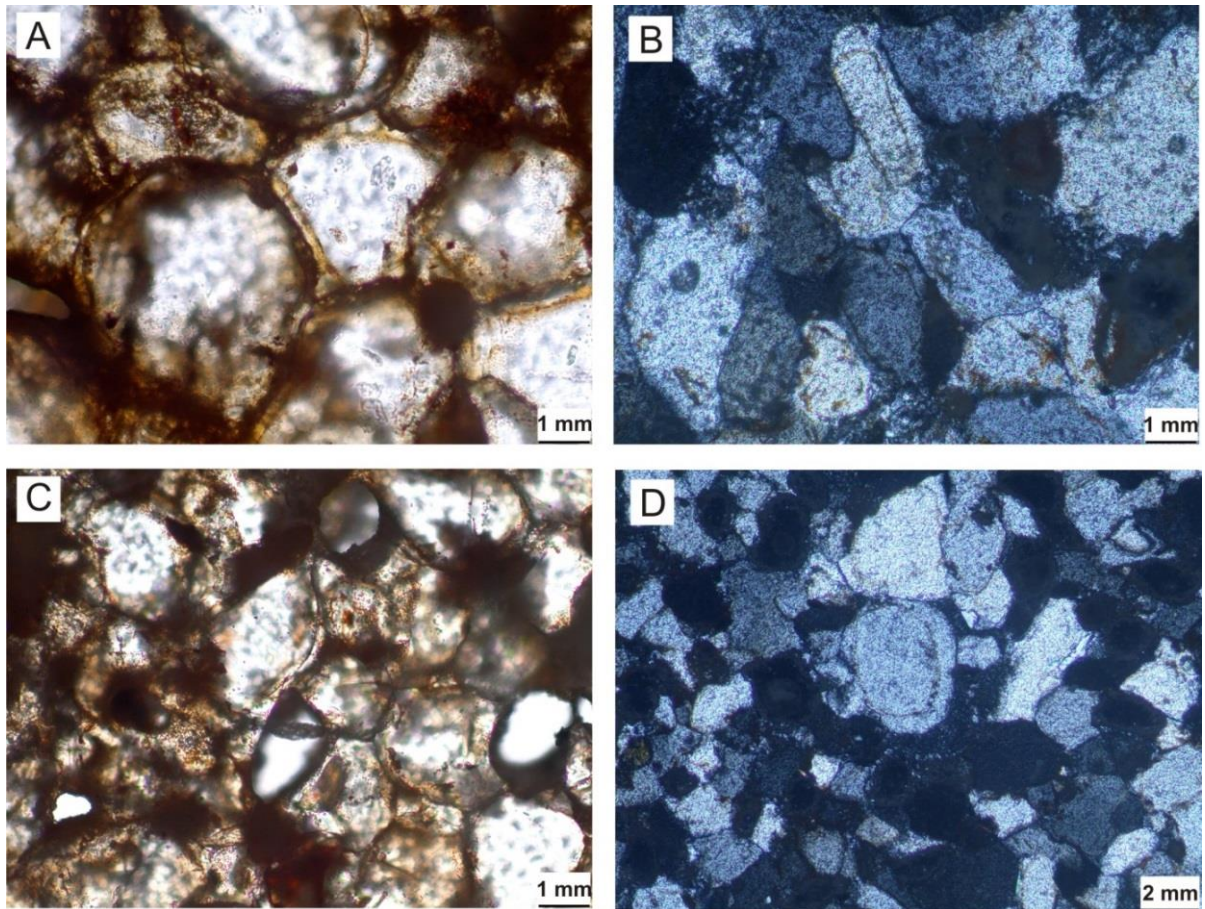
**Figura 7:** Aspecto geral dos arenitos silicificados, Amostras A) e B) 3M 17 B, C) e D) GC 62. Em A), o arenito se encontra bastante silicificado e pouco intemperizado, já em B) o arenito apresenta um grau

maior de silicificação. Em C) pode se observar as vênulas (porções mais escuras), e em D) as vênulas são as porções mais sobressalentes. Local de procedência: topo do morrote NW (das antenas) do conjunto Três Morrinhos.

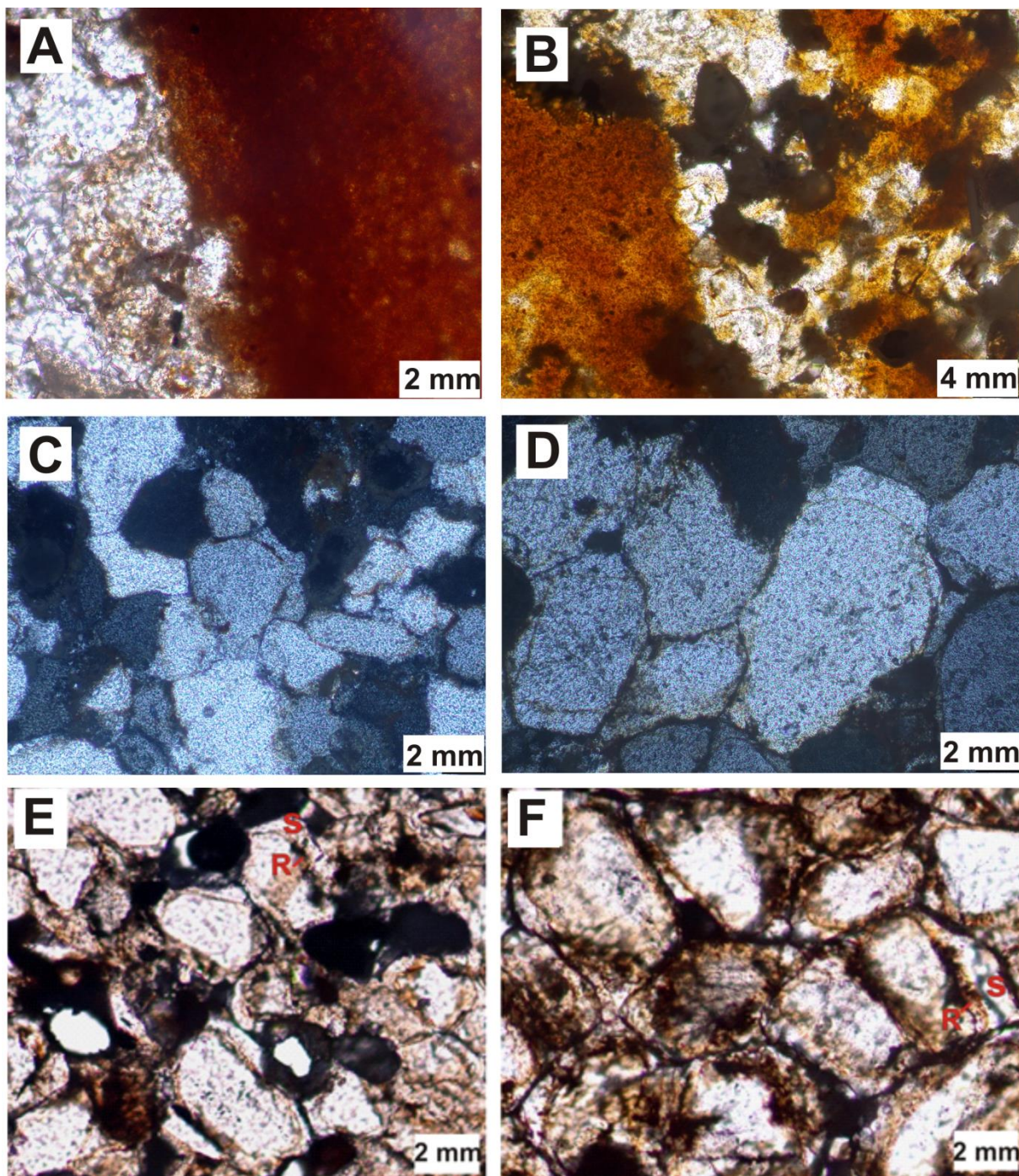
## **4.2. PETROGRAFIA**

Os arenitos têm alto grau de seleção, são de composição essencialmente quartzosa, com frações traço ou de até 5% de opacos, como provável magnetita e outros indeterminados. O arcabouço é sustentado por grãos, com boa seleção e empacotamento normal. Os grãos de quartzo encontrados no arcabouço são arredondados e de alta esfericidade, possuem contatos pontuais entre estes. Os minerais opacos são detríticos, e são em geral subédricos, subarredondados a angulosos.

O cimento de quartzo ocorre revestindo os grãos detríticos, seja como textura de sobrecrescimento sintaxial (Figura 8 A e C) ou como preenchimento total ou parcial dos espaços porosos intergranulares (Figura 8 B e D), formando uma textura poligonal em mosaicos. Já as vênulas de quartzo são preenchidas por quartzo microcristalino com textura em mosaico (Figura 9 A e B). Em geral, o arcabouço foi silicificado enquanto o arranjo dos grãos ainda estava solto, com cimentação entre os grãos (Figura 8), mas em alguns locais houve uma compactação mecânica, representada por contato direto entre grãos (Figura 9 C e D), não havendo a deposição de sílica entre eles. São observados traçados retilíneos envolvendo os grãos, que são crescimentos secundários reliquiares nos grãos de quartzo, que posteriormente foram envolvidos por sobrecrescimento (Figura 9 E e F).



**Figura 8:** A) Grãos de quartzo arredondados, com alta esfericidade, revestidos inicialmente por óxido de ferro e posteriormente por sobrecrescimento de quartzo sintaxial, formando textura poligonal com aparência de mosaico (10x; amostra 3M AB BP; PP). B) grãos de quartzo subarredondados, com baixa esfericidade, revestidos por óxido de ferro e cimento de quartzo sintaxial, e por vezes com contatos pontuais (amostra GC 62; PX); C) grãos de quartzo subarredondados, com esfericidade alta, revestido por óxido de ferro e com cimento de quartzo sintaxial (amostra 3M 17 A BPx; PP); D) grãos de quartzo subarredondados e com esfericidade alta, revestidos por óxido de ferro e cimento sintaxial (amostra 3M 17 A; PX). Fotomicrografias de seções delgadas. Convenções: PX, polarizadores cruzados; PP, polarizadores paralelos. Local de procedência: topo do morrote NW (das antenas) do conjunto Três Morrinhos

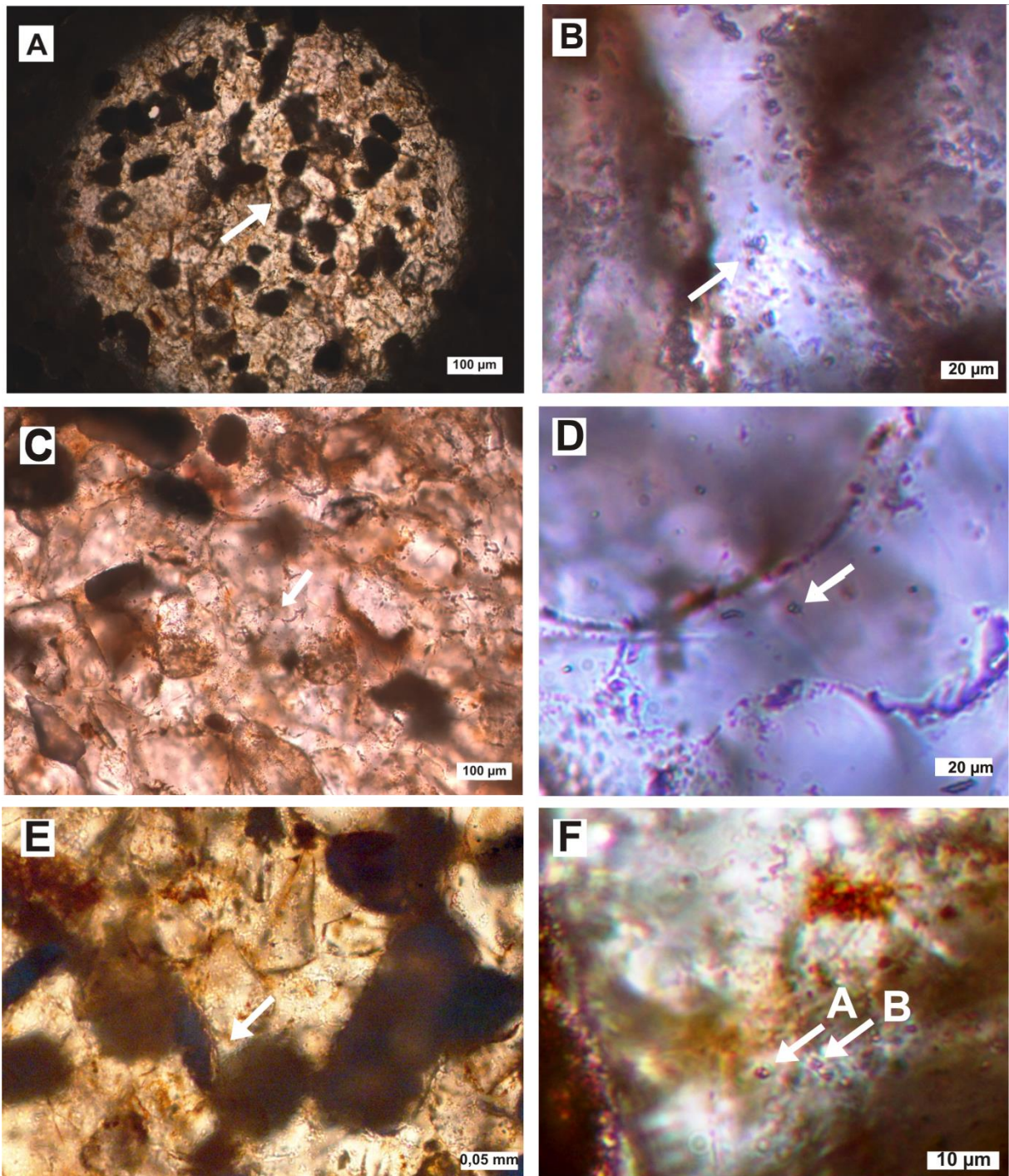


**Figura 9:** A) Lâmina 3M 17 A, (20x; PP) e B) Lâmina GC 62 A1, (10x; PP). Exemplos de sílica microcristalina nos arenitos silicificados, com estrutura maciça. Em C) Lâmina 3M 17 A, (20x; PX) e D) Lâmina 3M 17 B, (20x; PX), contatos diretos entre grãos e quartzo subarredondados, sem deposição de sílica. Em E) Lâmina 3M 17A, (10x; PP) e F) Lâmina 3M AB, (10x; PP), um crescimento secundário reliquiar (R), posteriormente envolvido pelo sobrecrecimento de quartzo (S). Abreviações: PX – polarizadores cruzados; PP – polarizadores paralelos. Fotomicrografias de seções delgadas; local de procedência: topo do morrote NW (das antenas) do conjunto Três Morrinhos.

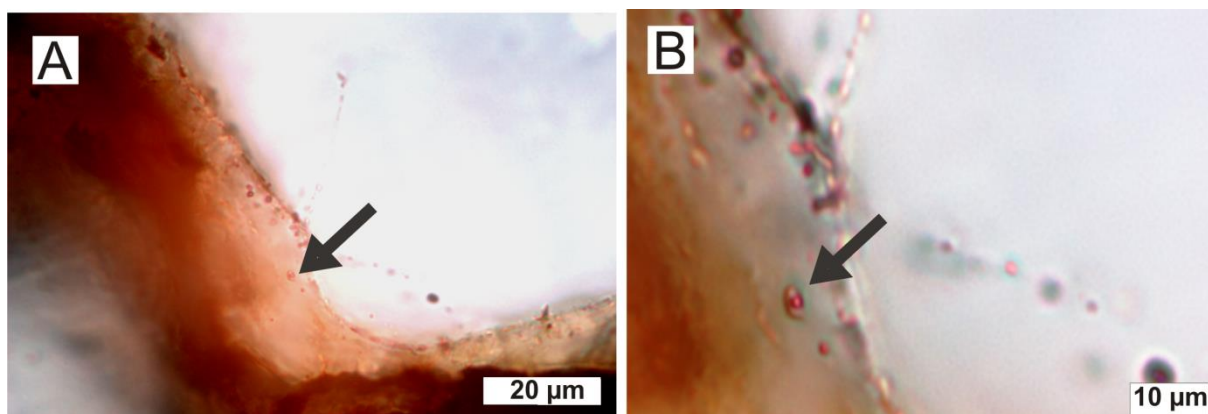
### 4.3. PETROGRAFIA DE INCLUSÕES FLUIDAS

Apenas uma assembleia de inclusões fluidas foi identificada como tendo sido formada durante a diagênese, associada a formação dos cimentos de quartzo. As inclusões fluidas presentes no interior dos grãos detríticos, sejam elas primárias ou secundárias em origem, foram descartadas, pois as mesmas não trazem informações do processo diagenético ou tem origem incerta.

As inclusões fluidas da assembleia em questão são hospedadas nos sobrecrescimentos de quartzo sintaxiais ou zona de contato e os grãos detríticos (*dust rims*). Essas inclusões fluidas são aquosas, de forma arredondada, apresentando uma fase líquida (monofásicas), ou uma líquida e uma fase vapor (bifásicas) à temperatura ambiente. No geral, a forma de ocorrência é dada por arranjo de inclusões de forma concêntrica e isolada (Figuras 10A e 10B) ou aleatório (Figuras 10C, 10D, 10E e 10F). Em sua maioria essas inclusões têm menos de 1  $\mu\text{m}$  de dimensão, no maior comprimento, com algumas atingindo entre 2 e  $\sim 2,5\mu\text{m}$ . As inclusões de dimensões menores que 2  $\mu\text{m}$  são monofásicas ou possuem baixa fração de vapor, ao passo que as inclusões com mais que 2  $\mu\text{m}$  são bifásicas com fração de vapor  $<20\%$ , baseada na estimativa visual da área de preenchimento da bolha.



**Figura 10:** Inclusões fluidas primárias hospedadas no cimento de quartzo dos arenitos silicificados de Três Morrinhos, Paraná: A) inclusão primária fluida (amostra GC 62; PP); B) inclusão em cimento silicoso sintaxial, em arranjo de inclusões concêntrico (amostra GC 62; PP) C) Inclusão fluida 1 (amostra GC 62-1 PP); D) Inclusão fluida primária bifásica hospedada em sobrecrecimento de quartzo sintaxial (amostra GC 62-1; PP); E) em PP, e F) em PX, mostram inclusões fluidas bifásicas irregulares, em cimento silicoso sintaxial de revestimento de grão de quartzo, em arranjo aleatório de inclusões (amostra GC 62 1 A e B). Abreviações: PX – polarizadores cruzados; PP – polarizadores paralelos.



**Figura 11:** Inclusões fluidas primárias hospedadas no cimento de quartzo dos arenitos silicificados de Três Morrinhos, Paraná em menor A) (100x1,75x) e maior B) (100x2,5x) aumento. Inclusão bifásica com aspecto alongado.

#### 4.4. ANÁLISES MICROTERMOMÉTRICAS

Devido ao tamanho diminuto da maioria das inclusões fluidas estudadas (< 2 µm), as análises microtermométricas foram realizadas em apenas cinco inclusões fluidas hospedadas no sobrecrecimento de quartzo.

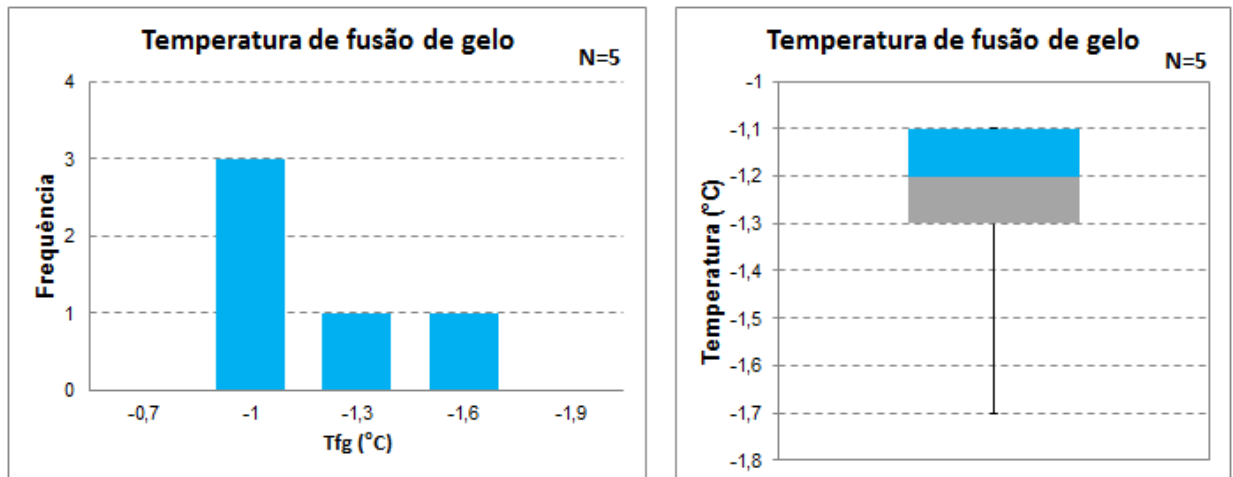
Também devido ao tamanho das inclusões, não foi possível observar todas as mudanças de fase, como a primeira fusão. Assim, apenas foram realizadas as tomadas das temperaturas de fusão de gelo e de homogeneização final (Tabela 2).

**Tabela 2** – Resultados da análise microtermométrica. Abreviações: Tfi – Temperatura de fusão inicial; Tfg – Temperatura de fusão do gelo; Th – Temperatura de homogeneização das fases líquida e vapor; Tfh – Temperatura de fusão da hidrohálita; NIF – Número da inclusão fluida.

Lâmina	Fragmento	Campo Visual	N IF	T <sub>h</sub> (LV→L)	Tfi (°C)	Tfh (°C)	Tfg (°C)	Salinidade (% ms. eq. NaCl)
GC 62	3	3A	2	387,3	-	-	-1,1	1,9
GC 62 1	5	5A	3	361,5	-	-	-1,3	2,2
3M-AB	8	8A	1	388,8	-	-	-1,7	2,9
GC 62 A	1	1A	1	328	-	-	-1,1	1,9
GC 62 A	1	1A	2	321,8	-	-	-1,2	2,1

##### 4.4.1. MEDIDAS DE BAIXA TEMPERATURA - FUSÃO FINAL DO GELO (Tfg)

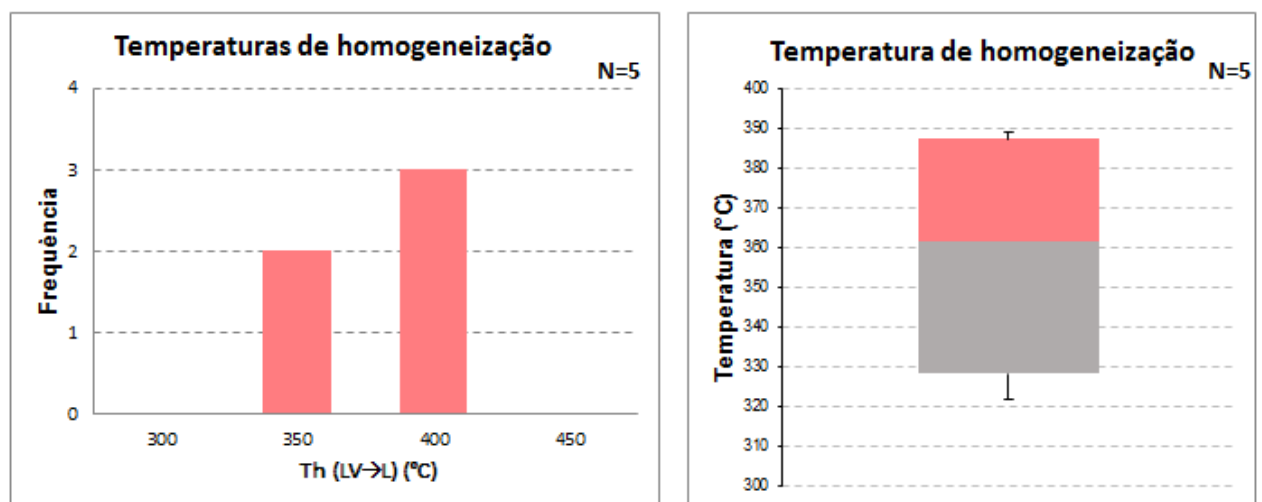
Os valores de Tfg (Tabela 1, Gráfico 1) variam de -1,7 até -1,1 °C, com uma distribuição unimodal, com moda intervalar entre 0,7 e -1,1 °C, sendo o valor médio de Tfg de -1,3 °C, com um desvio padrão de 0,2 °C.



**Gráfico 1** – Histograma e diagrama de caixa das temperaturas de fusão de gelo (Tfg) das inclusões primárias da assembleia A dos arenitos silicificados, com número total de análises (N) igual a cinco.

#### 4.4.2. MEDIDAS DE ALTA TEMPERATURA – TEMPERATURA DE HOMOGENEIZAÇÃO (Th)

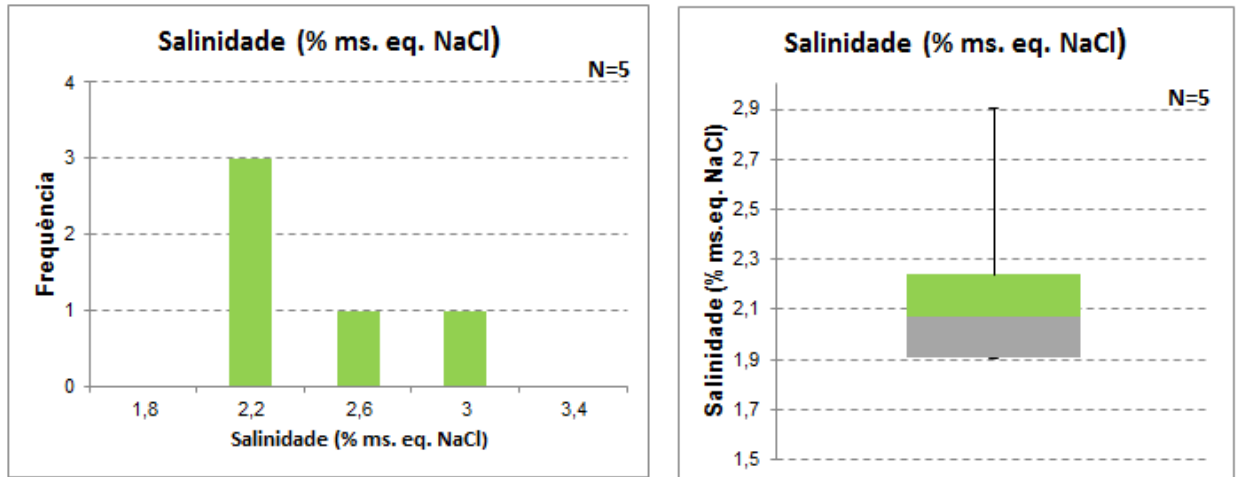
Os valores de temperatura de homogeneização final (Th (LV→L)) (Tabela 1, Gráfico 2) variam de 321,8 até 388,8 °C, com média de 357,5 °C e desvio padrão de 31,7. A maioria dos valores se encontra no intervalo modal entre 350 e 400 °C.



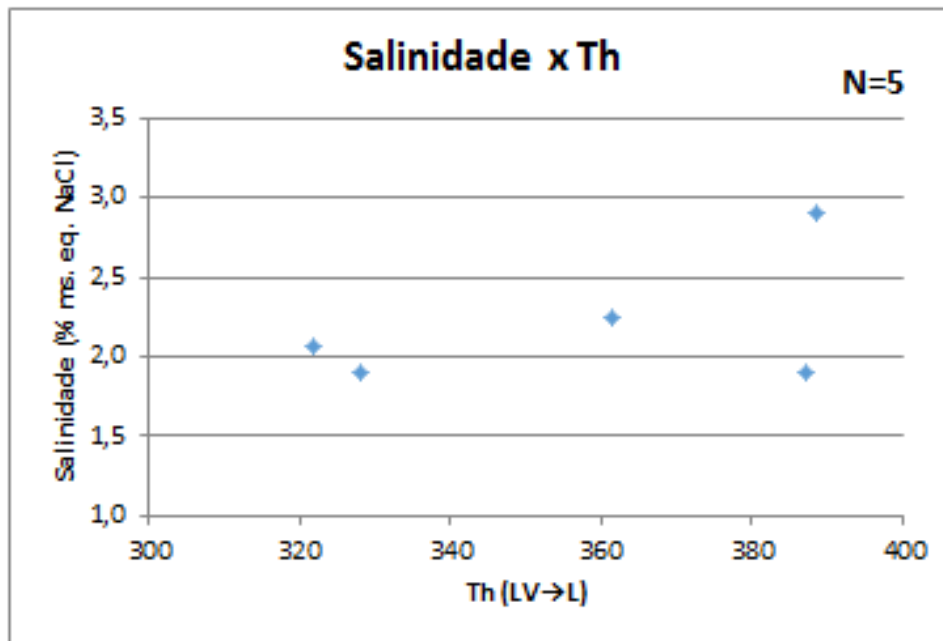
**Gráfico 2** - Histograma e diagrama de caixa das temperaturas de homogeneização das inclusões primárias da assembleia A dos arenitos silicificados, com número total de análises (N) igual a cinco.

#### 4.4.3. CÁLCULO DA SALINIDADE

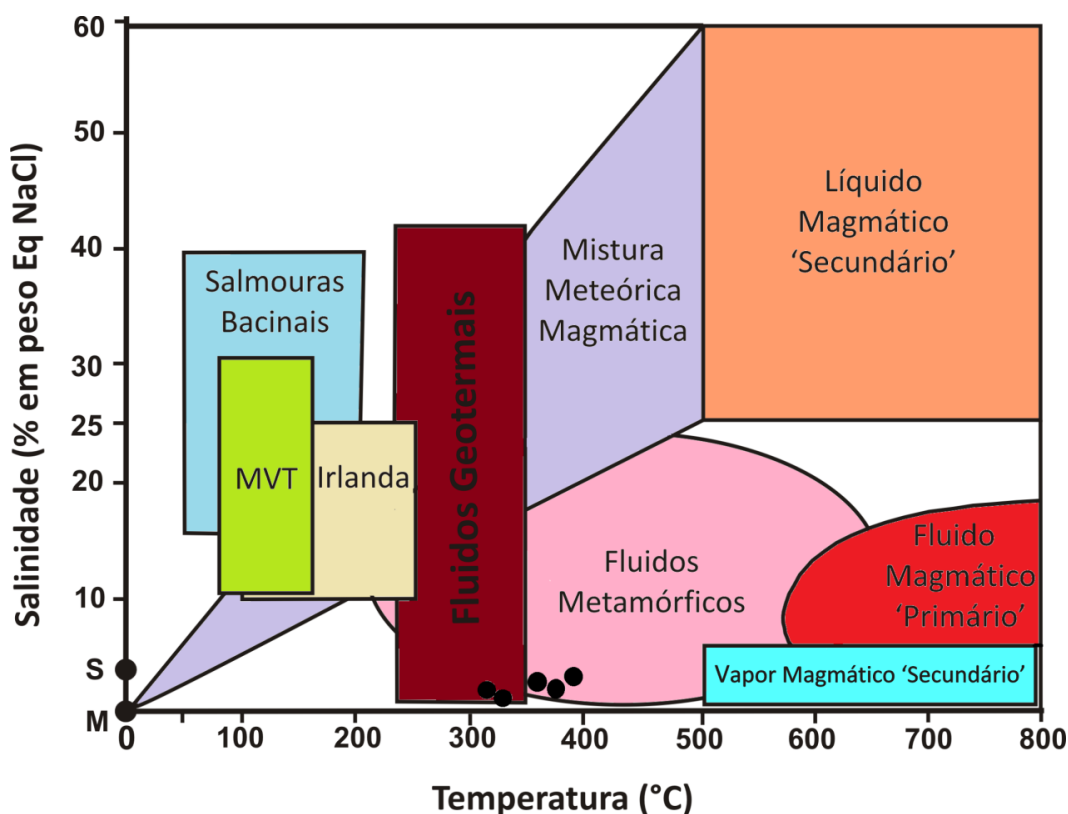
Os valores de salinidade (Tabela 2, Gráficos 3 e 4) variam de 1,9 a 2,9 (% ms. eq. NaCl), com uma distribuição unimodal, com moda de 1,9 (% ms. eq. NaCl), sendo o valor médio de 2,2 (% ms. eq. NaCl), com um desvio padrão de 0,4.



**Gráfico 3** - Histograma e diagrama de caixa da salinidade das inclusões primárias da assembleia A dos arenitos silicificados, com número total de análises (N) igual a cinco.



**Gráfico 4** – Gráfico de dispersão de pontos da Salinidade x Th calculada para o total (N) de cinco inclusões fluidas analisadas.



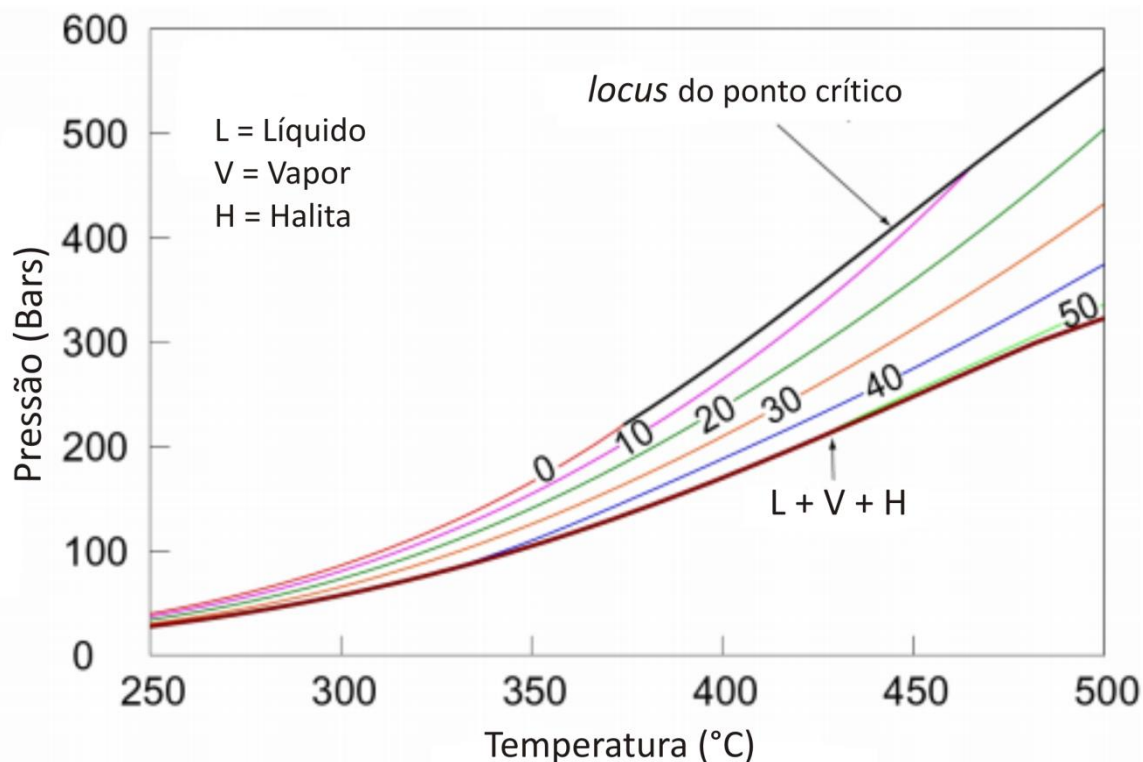
**Gráfico 5** – Gráfico de distribuições de soluções de diferentes origens. O campo dos dados de inclusões fluidas estudadas encontra-se nos campos de Fluidos Geotermais e Fluidos Metamórficos. S = água do mar (3,5%); M = meteórica. Fonte: Bodnar (1999); Dados de MVT de Bodnar *et al.*, 2014; Dados de depósito tipo Irlanda de Wilkinson (2001).

## 5. DISCUSSÃO

### 5.1. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DE INCLUSÕES FLUIDAS

Os estudos microtermométricos das inclusões fluidas forneceram informações importantes sobre a salinidade e temperatura de homogeneização. Estes dados podem sugerir condições de um ambiente formador da silicificação dos arenitos dos Três Morrinhos (PR).

Os dados de inclusões fluidas sugerem que os sobrecrescimentos de quartzo se formaram sob condições de temperatura mínima entre 321,8 e 388,8 °C, com salinidades equivalentes estimadas entre 1,9 a 2,9 (% ms. eq. NaCl). A forma de homogeneização dessas inclusões e as temperaturas indicam o aprisionamento de um fluido em condições supercríticas. Para atingir o ponto supercrítico, um fluido com a salinidade obtida nas análises e pressão de ambientes superficiais e rasos necessita de temperaturas da ordem de 374 °C (Gráfico 6).



**Gráfico 6** - Projeção PT de isopletras (classificadas em ms% NaCl) para a região onde as equações de baixas temperaturas e altas temperaturas são vinculadas pela equação de fusão. Também são mostradas as curvas de líquido + vapor + halita (L + V + H) e o *locus* dos pontos críticos. Fonte: Atkinson (2002).

É notável a presença de inclusões fluidas monofásicas, contudo, essas são diminutas (1  $\mu\text{m}$  ou menor), sendo que as mesmas podem encontrar-se metaestáveis a temperatura ambiente (Diamond 1990). Ainda, a baixa quantidade de inclusões medidas e a extensão do afloramento amostrado (> 100 m) não permite indicar se a variação de temperatura encontrada deve-se a modificações pós-aprisionamento (e.g., estrangulamento ou estiramento; Bodnar 2003), ou ao distanciamento do conduto dos fluidos responsáveis pela silificação.

## 5.2. IMPLICAÇÕES PARA A DIAGÊNESE DOS ARENITOS SILICIFICADOS DE TRÊS MORRINHOS – PR.

Temperaturas entre 300 e 400 °C não são geralmente encontradas em um ambiente diagenético raso. Inclusões aquosas simples aprisionadas nas mais altas temperaturas de ambientes diagenéticos refletiriam temperaturas de homogeneização abaixo de 220°C (Goldstein & Reynolds 1994), e um agente

causador destas altas temperaturas poderia ser um fluido hidrotermal, a exemplos dos trabalhos de Nomura *et al.* (2014) e Iyer *et al.* (2017).

A salinidade e a temperatura dos fluidos aprisionados nas inclusões, quando comparados aos diferentes tipos de fluidos presentes na crosta, indicam que os fluidos aprisionados nos arenitos silicificados da Formação Rio Paraná são similares aos fluidos de fontes Geotermiais e Metamórficos (Fig. 5). Sistemas hidrotermais geotermiais são definidos aqui como compostos por uma fonte de calor aprisionada por uma rocha isolante, e um fluido em geral de origem meteórica que transporta o calor para a superfície, enquanto fluidos metamórficos são fluidos formados durante o as reações de desidratação e desvolatilização durante o metamorfismo progressivo na formação de rochas metamórficas (Touret 2001).

Ambientes hidrotermais em bacias sedimentares análogos ao estudado incluem sistemas hidrotermais-magmáticos, como o exemplo encontrado na Bacia Karoo (Carbonífero Superior – Jurássico Intermediário) na África do Sul, que é formada por sistemas de fumarolas hidrotermais associadas a intrusões de soleiras (Jamtveit *et al.* 2004). É uma formação de complexos de fumarolas hidrotermais relacionados a fluidos sobrecarregados, derivados da reação do contato de sedimentos com soleiras (Jamtveit *et al.* 2004). Alguns sistemas hidrotermais geotermiais são alimentados por fontes de calor magmática, com ou sem contribuição de fluidos magmáticos (Yardley & Bodnar 2014). Ainda mais, estes sistemas podem suportar a presença de fluidos em condições supercríticas (Scott *et al.* 2015).

Dado o contexto geológico regional e os exemplos citados, os dados deste estudo sugerem que um sistema hidrotermal geotermal, com possível influência de uma fonte de calor magmática e águas meteóricas, possivelmente foi responsável pela formação dos sobrecrescimentos de quartzo dos arenitos da Formação Rio Paraná em Três Morrinhos.

## **6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

A origem da silicificação dos arenitos neocretáceos da Bacia Bauru vem sendo estudada e interpretada como hidrotermal por diversos autores (e.g. Fernandes *et al.* 1993 e Coimbra 1991). Como principais indícios desta origem, são

citadas: características petrográficas, como minerais indicativos deste processo (paligorsquita e carbonato-fluorapatita, por Coimbra (1991); ocorrência da silicificação em diferentes unidades litoestratigráficas; ocorrência de sílica microcristalina; ocorrência de magmatismo alcalino nas bordas da bacia; feições sugestivas de atividade tectônica, como brechas e falhas com pequeno deslocamento vertical (Fernandes *et al.* 1993).

Com o estudo das inclusões fluidas em cimentos nesta pesquisa, informações importantes sobre a gênese da silicificação dos arenitos foram obtidas. As análises de inclusões fluidas indicam que os fluidos aprisionados nos arenitos silicificados da Formação Rio Paraná são similares aos fluidos de fontes geotermiais alimentados por águas superficiais (*i.e.* meteóricas). Essa observação sustenta a proposta de uma origem hidrotermal para a silicificação dos arenitos da Bacia Bauru, com temperaturas que próximas ao ponto crítico e baixa salinidade. Esse processo pode ter relação com algum evento magmático (*e.g.*, o magmatismo alcalino do Neocretáceo, encontrado nas bordas da bacia, principalmente (Fernandes *et al.* 1993), que não possui nenhum registro identificado na área de estudo.

Sugere-se que sejam coletadas mais amostras, e em perfil, para poder ser melhor caracterizada a variação da temperatura de homogeneização que foi obtida nesta pesquisa. Um conjunto maior de dados de inclusões fluidas, e o mapeamento dos elementos do sistema hidrotermal, além de ferramentas adicionais (*e.g.*, análise de isótopos estáveis, termoluminescência de quartzo, análise traço de fissão de apatita, espectroscopia Raman para informações químicas, *etc.*) ainda são necessários para poder suportar tal hipótese.

## REFERÊNCIAS

- Almeida, F. F. M. 1964. Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista. 99f, 1964. Série Teses e Monografias. Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.
- Almeida, F. F. M. 1976. *System of continental rifts bordering Santos Basin, Brazil*. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 48, 15-26.
- Almeida, F. F.M. 1980. Tectônica da Bacia do Paraná no Brasil. Relatório da PAULIPETRO, (14.091).
- Almeida, F. F. M., de Melo, M. S., Poncano, W. L., Dantas, A. S. L., & Bistrichi, C. A. 1981. Bacia do Paraná e o vulcanismo mesozóico. In Mapa geológico do Estado de São Paulo escala 1: 500000 (pp. 46-69). IPT.
- Atkinson Jr, A. B. 2002. *A model for the PTX properties of H<sub>2</sub>O-NaCl*.
- Brandt Neto, M., Petri, S., & Coimbra, A. M. 1978. Considerações sobre a estratigrafia e ambiente de sedimentação da Formação Bauru. In Congresso Brasileiro de Geologia (Vol. 30, pp. 557-566).
- Bodnar, R. J. 1993. *Revised equation and table for determining the freezing point depression of H<sub>2</sub>O-NaCl solutions*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3), 683-684.
- Coimbra, A. M. 1991. Sistematização crítica da obra (*Doctoral dissertation*, Universidade de São Paulo).
- Coimbra, A. M., Fernandes, L. A., & Hachiro, J. 1992. Sismitos do Grupo Caiuá (Bacia Bauru, Ks) no Pontal do Paranapanema (SP). SBG, Congr. Brás. Geol, 37, 271-275.
- Coimbra, A. M., Coutinho, J. M. V., Brandt Neto, M., & Rocha, G. A. 1981. Lavas fonolíticas associadas ao Grupo Bauru no Estado de São Paulo. SIMP. REG. GEOL, 3, 324-327.
- Coimbra, A. M., Vianna Coutinho, J. M., Fernandes, L. A., & Neto, M. B. 1997. *Vertebrate Taphonomy in Bauru Basin (Upper Cretaceous, Brazil)*. Anais- Academia Brasileira de Ciências, 69, 270-270.
- CPRM e Serviço Geológico do Brasil, *Geology, Tectonics and Mineral Resources of Brazil: Geographic Information System (GIS) and Maps at the 1:2,500,000 scale*, 2001.
- Diamond, L. W., Marshall, D. D., Jackman, J. A., & Skippen, G. B. 1990. *Elemental analysis of individual fluid inclusions in minerals by Secondary Ion Mass*

*Spectrometry (SIMS): Application to cation ratios of fluid inclusions in an Archaean mesothermal gold-quartz vein. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54(3), 545-552.*

Fernandes, L. A. 2004. Mapa litoestratigráfico da parte oriental da Bacia Bauru (PR, SP, MG), escala 1: 1.000. 000. Boletim Paranaense de Geociências, 55.

Fernandes, L. A., & Coimbra, A. M. 1996. A Bacia Bauru (Cretáceo Superior, Brasil). Anais da Academia Brasileira de Ciências, 68(2), 195-206.

Fernandes, L. A., Coimbra, A. M., & Neto, M. B. 1993. Silicificação hidrotermal neocretácea na porção meridional da Bacia Bauru. Revista do Instituto Geológico, 14(2), 19-26.

Fernandes L.A. & Coimbra A.M. 1994. O Grupo Caiuá (Ks): revisão estratigráfica e contexto deposicional. Rev. Bras. Geociências, 24(3):164-176

Fernandes, L. A., & Coimbra, A. M. 2017. O Grupo Caiuá (Ks): revisão estratigráfica e contexto deposicional. Revista Brasileira de Geociências, 24(3), 164-176.

Fernandes, L. A., & Coimbra, A. M. 2017. Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). Revista brasileira de Geociências, 30(4), 717-728.

Fernandes, L. A., & Ribeiro, C. M. M. 2015. *Evolution and palaeoenvironment of the Bauru Basin (Upper Cretaceous, Brazil). Journal of South American Earth Sciences, 61, 71-90*

Fernandes, L. A., Couto, E. V., & Santos, L. J. C. 2012. Três Morrinhos, Terra Rica, PR-Arenitos silicificados de dunas do Deserto Caiuá testemunham nível de superfície de aplainamento KT. Winge, M.; Schobbenhaus, C.; Souza, CRG; Fernandes, ACS, 69-87.

Fúlfaro, V. J. 1974. Tectônica do alinhamento estrutural do Paranapanema. Boletim IG, 5, 129-138.

Goldstein, R. H. 2001. *Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic systems. Lithos, 55(1), 159-193.*

Goldstein, R. H. 2003. *Petrographic analysis of fluid inclusions. Fluid inclusions: Analysis and interpretation, 32, 9-53.*

Goldstein, R. H., & Reynolds, T. J. 1994. *Fluid inclusion petrography.*

Goldstein, R.H., Reynolds, T.J., 1994. *Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. Soc. Sed. Geol., Short Course 31, p. 199.*

Hasui, Y., & Haralyi, N. L. E. 1991. Aspectos lito-estruturais e geofísicos do Soerguimento do Alto Paranaíba. Geociências, 10, 57-77.

Iyer, K., Schmid, D. W., Planke, S., & Millett, J. 2017. *Modelling hydrothermal venting in volcanic sedimentary basins: Impact on hydrocarbon maturation and paleoclimate. Earth and Planetary Science Letters*, 467, 30-42.

Jamtveit, B., Svensen, H., Podladchikov, Y. Y., & Planke, S. 2004. *Hydrothermal vent complexes associated with sill intrusions in sedimentary basins. Physical geology of high-level magmatic systems*, 234, 233-241.

Kerkhof, A. M. van den, Hein, UF, 2001. *Fluid inclusion petrography. Fluid Inclusions: Phase Relationships—Methods—Applications. Lithos*, 55, 27-47.

Lespinasse, M. 1999. *Are fluid inclusion planes useful in structural geology?. Journal of Structural Geology*, 21(8), 1237-1243.

Macedo, J. M. 1989. *Evolução tectônica da Bacia de Santos e áreas continentais adjacentes. Boletim de Geociências da Petrobrás*, 3(3), 159-173.

Milani, E.J., Melo, J.H.G., Souza, P.A., Fernandes, L.A., França, A.B., 2007. *Bacia do Paraná. Bol. Geociências Petrobrás*, 15 (2), 265 e 287.

Nomura, S. F., Sawakuchi, A. O., Bello, R. M. S., Méndez-Duque, J., Fuzikawa, K., Giannini, P. C. F., & Dantas, M. S. S. 2014. *Paleotemperatures and paleofluids recorded in fluid inclusions from calcite veins from the northern flank of the Ponta Grossa dyke swarm: Implications for hydrocarbon generation and migration in the Paraná Basin. Marine and Petroleum Geology*, 52, 107-124.

Pestilho, A. L. S., & Monteiro, L. V. S. 2017. *Uma revisão dos fundamentos do estudo de inclusões fluidas aquosas e de petróleo. Terrae Didactica*, 13(2), 71-92.

Riccomini, C. 2017. *Arcabouço estrutural e aspectos do tectonismo gerador e deformador da Bacia Bauru no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências*, 27(2), 153-162.

Roedder, E. 1984. *Fluid inclusions. Reviews in mineralogy. Mineral. Soc. Amer.*, 12, 644p.

Scott, S., Driesner, T., & Weis, P. 2015. *Geologic controls on supercritical geothermal resources above magmatic intrusions. Nature communications*, 6.

Touret, J. L. R. 2001. *Fluids in metamorphic rocks. Lithos*, 55(1), 1-25.

Turner, S., Regelous, M., Kelley, S., Hawkesworth, C., & Mantovani, M. 1994. *Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  geochronology. Earth and Planetary Science Letters*, 121(3-4), 333-348.

Wilkinson, J. J. 2001. *Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. Lithos*, 55(1), 229-272.

Yardley, B. W., & Bodnar, R. J. 2014. *Fluids in the continental crust. Geochemical Perspectives*, 3(1), 1-2.

Zalán, P. V. 2004. Evolução fanerozóica das bacias sedimentares brasileiras. *Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, 595-613.