

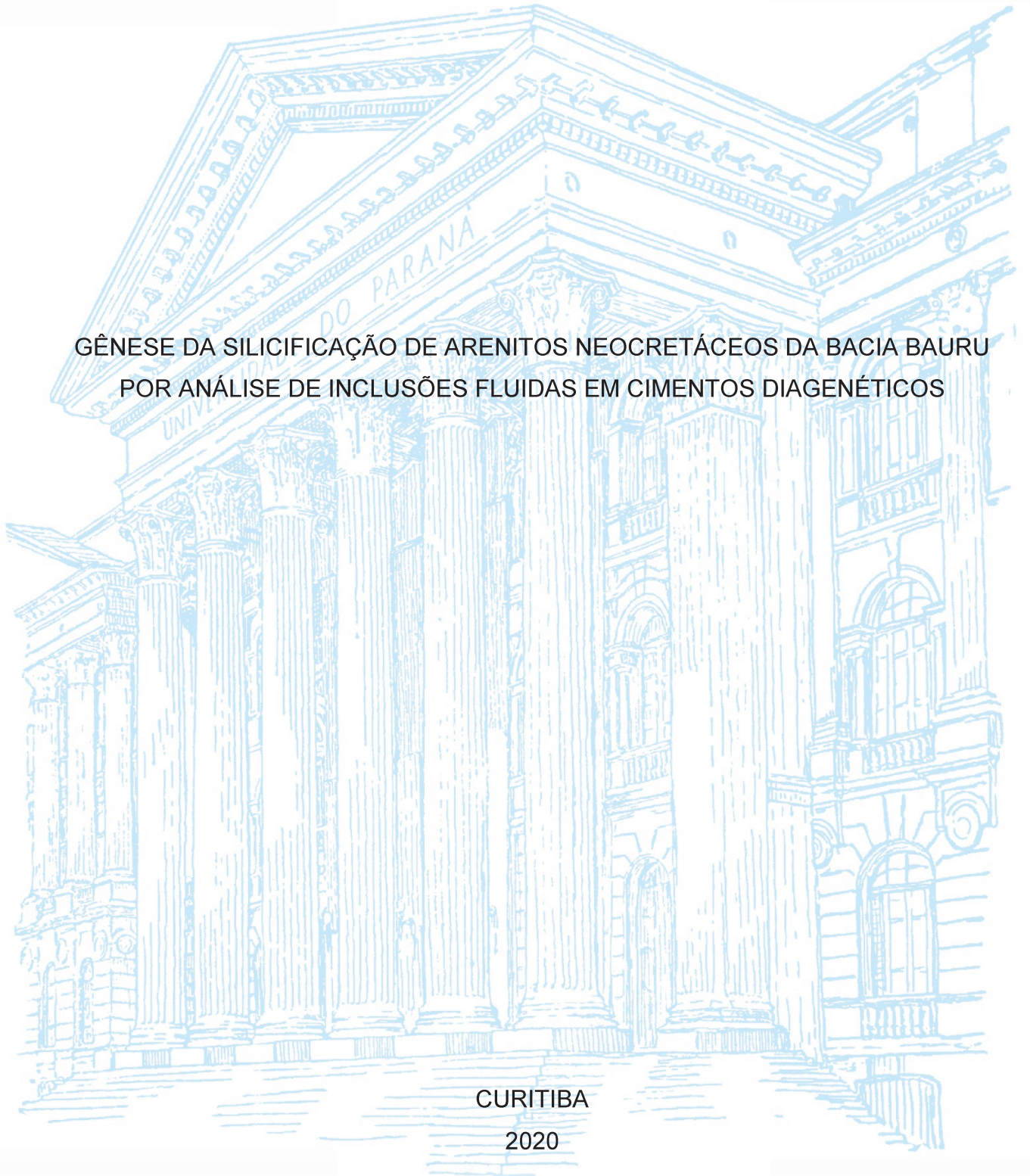
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAROLINE MARIA MARTIN

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

CURITIBA

2020



CAROLINE MARIA MARTIN

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

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Geologia, Programa de pós-graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Alberto Fernandes

Coorientador: Dr. André Luiz Silva Pestilho

CURITIBA

2020

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Martin, Caroline Maria

Gênese da silicificação de arenitos neocretáceos da Bacia Bauru por análise de inclusões fluidas em cimentos diagenéticos / Caroline Maria Martin. – Curitiba, 2020.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia.

Orientador: Luiz Alberto Fernandes

Coorientador: André Luiz Silva Pestilho

1. Arenito. 2. Alteração hidrotermal. 3. Termometria. 4. Inclusões fluidas. 5. Bauru, Bacia (SP). 6. Bauru, Bacia (PR) . I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Geologia. III. Fernandes, Luiz Alberto. IV. Pestilho, André Luiz Silva. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **CAROLINE MARIA MARTIN** intitulada: **Gênese da silicificação de arenitos neocretáceos da Bacia Bauru por análise de inclusões fluidas em cimentos diagenéticos**, sob orientação do Prof. Dr. LUIZ ALBERTO FERNANDES, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 10 de Novembro de 2020.

Assinatura Eletrônica

11/11/2020 11:41:07.0

LUIZ ALBERTO FERNANDES

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

11/11/2020 18:31:46.0

LENA VIRGÍNIA SOARES MONTEIRO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

Assinatura Eletrônica

11/11/2020 09:43:51.0

RICARDO JORGE JAHNERT

Avaliador Interno

AGRADECIMENTOS

Agradeço muito todas as pessoas que me ajudaram a realizar esta pesquisa. Muitas não imaginam o quanto ou como, mas foram muito importantes.

Primeiramente ao meu orientador, que me deu forças e foi compreensivo até o fim, mesmo com todos os problemas que enfrentei. Também ao meu coorientador, que foi um guia muito importante para o estudo e para eu seguir em frente.

Também sou grata a minha família, amigos, meu companheiro, por tudo o que me fez chegar até aqui.

Por fim, agradeço à Universidade Federal do Paraná e a CAPES por todo o suporte e qualidade de ensino.

If it makes you happy... it can't be that bad.

Sheryl Crow

RESUMO

A Bacia Bauru localiza-se nos estados de São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Minas Gerais e Goiás no Brasil, e no nordeste do Paraguai. Foi preenchida durante o Cretáceo Superior pela Supersequência sedimentar Bauru, que é composta por dois grupos cronocorrelatos: Caiuá e Bauru. Na porção meridional da bacia, principalmente no Grupo Caiuá, há várias ocorrências de arenitos silicificados, considerados como de origem hidrotermal. Porém, outras hipóteses genéticas são possíveis, tais como a formação de crostas duras (silcretes) por processos de pedogênese, eodiagenéticos, ou devidos ao soterramento, mesodiagenéticos. O principal objetivo desta pesquisa foi investigar a hipótese da gênese hidrotermal da silicificação por análise de inclusões fluidas, método que fornece informações quantitativas e qualitativas sobre a natureza de processos e condições deposicionais e diagenéticas. O contexto da silicificação de depósitos sedimentares, se em condições superficiais, de soterramento ou por efeito de processos hidrotermais, foi discutido mediante determinação da temperatura e da composição dos fluidos aprisionados nos cimentos desenvolvidos na diagênese. No estudo foram realizadas análises microtermométricas em inclusões vinculadas com a silicificação, associada à formação dos cimentos de quartzo. Os resultados obtidos foram temperaturas altas de aprisionamento do fluido, entre 240,1 e 405,8 °C acima das diagenéticas de soterramento conhecidas, assim como salinidade baixa, entre 1,2 e 6,0 (% eq ms. NaCl). Tais resultados certificaram, portanto, a origem hidrotermal dos processos, ocorridos em condições continentais interiores, com pouco soterramento, e em contexto de escassez de água, controlados por estruturas tectônicas regionais como o Arco de Ponta Grossa e sistema de falhas de direção NE.

Palavras-chave: Caiuá, microtermometria, arenitos silicificados, hidrotermalismo, diagênese

ABSTRACT

The Bauru Basin is located in the states of São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Minas Gerais and Goiás in Brazil, and in the northeast of Paraguay. It was filled during the Late Cretaceous by the Bauru sedimentary supersequence, which is composed of two chronocorrelate groups: Caiuá and Bauru. In the southern portion of the basin, mainly in the Caiuá Group, there are several occurrences of silicified sandstones, considered to be of hydrothermal origin. However, other genetic hypotheses are possible, such as the formation of duricrusts (silcretes) by pedogenesis, eodiagenetic processes, or due to burial, mesodiagenetic. The main objective of this research was to investigate the hypothesis of the hydrothermal genesis of silicification by fluid inclusion analysis, a method that provides quantitative and qualitative information about the nature of depositional and diagenetic processes and conditions. The context of the silicification of sedimentary deposits, whether under surface conditions, burial or by the effect of hydrothermal processes, was discussed by determining the temperature and composition of the fluids trapped in the cements developed during diagenesis. In the study, microthermometric analyzes were carried out on inclusions linked to silicification, associated with the formation of quartz cements. The results obtained were high fluid entrapment temperatures, between 240.1 and 405.8 °C above the known burial diagenetics, as well as low salinity, between 1.2 and 6.0 (% eq ms. NaCl). These results confirmed, therefore, the hydrothermal origin of the processes, which took place in inland continental conditions, with little burial, and in a context of water scarcity, controlled by regional tectonic structures such as the Ponta Grossa Arch and the NE-direction fault system.

Keywords: Caiuá, microthermometry, silicified sandstones, hydrothermalism, diagenesis

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.	Localização de ocorrências de arenitos silicificados e contexto geológico da área de estudo na Bacia Bauru.....	14
FIGURA 2.	Elevações anômalas no relevo regional de colinas, sustentado por arenitos silicificados.....	15
FIGURA 3.	Formação de inclusões fluidas de acordo com o crescimento mineral.....	19
FIGURA 4.	Mapa geológico da Bacia Bauru.....	22
FIGURA 5.	Evolução regional da Bacia Bauru.....	24
FIGURA 6.	Sistema de retroarco de antepaís Sul-Americano desenvolvido no Cretáceo Superior.....	24
FIGURA 7.	Evolução paleogeográfica da Bacia Bauru.....	27
FIGURA 8.	Carta litoestratigráfica da Bacia Bauru.....	28
FIGURE 1.	<i>Location of silicified sandstones occurrences and geological context of the study area in the Bauru Basin.....</i>	<i>34</i>
FIGURE 2.	<i>Lithostratigraphy and chronology of the Bauru Supersequence.....</i>	<i>35</i>
FIGURE 3.	<i>Geological map of the Bauru Basin.....</i>	<i>40</i>
FIGURE 4.	<i>Inselbergs supported by silicified sandstones of the Rio Paraná Formation, and characteristic aspect of the rock.....</i>	<i>42</i>
FIGURE 5.	<i>Petrographic characteristics of the silicified sandstones of the Rio Paraná Formation.....</i>	<i>43</i>
FIGURE 6.	<i>Fluid inclusions of the assemblages analyzed, hosted in sintaxial quartz overgrowths.....</i>	<i>45</i>
FIGURE 7.	<i>Homogenization temperature and salinity of different assemblages of fluid inclusions identified petrographically.....</i>	<i>47</i>
FIGURE 8.	<i>Homogenization temperatures (Th) and ice melting temperatures (Tm Ice) of the primary fluid inclusions found in the cement of silicified</i>	

	<i>sandstones.....</i>	48
FIGURE 9.	<i>Salinities of the primary inclusions of silicified sandstones of the Bauru Basin.....</i>	49
FIGURE 10.	<i>Critical temperature related to homogenization temperatures..</i>	50
FIGURE 11.	<i>Isochores and isopleths of the studied areas.....</i>	51
FIGURE 12.	<i>Location of the sites of silicified sandstones and their respective measurements of homogenization temperatures resulting from microthermometric analyzes and salinity.....</i>	54

TABELA

TABLE 1.	<i>Summary of the results obtained from the microthermometric analyzes performed and salinity calculations.....</i>	46
-----------------	---	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. TEMA DA PESQUISA	12
1.2. OBJETIVOS	13
1.3. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	13
2. MATERIAIS E MÉTODOS	15
2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.2. DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA	16
2.3. PETROGRAFIA POR MICROSCOPIA ÓPTICA DE LUZ TRANSMITIDA ...	16
2.4. ANÁLISE DE INCLUSÕES FLUIDAS	17
2.4.1. Petrografia de inclusões fluidas.....	17
2.4.2. Análises microtermométricas.....	19
3. CONTEXTO GEOLÓGICO	21
3.1. BACIA BAURU	21
3.2. EVOLUÇÃO TECTONO SEDIMENTAR	22
3.3. LITOESTRATIGRAFIA.....	28
3.3.1. Grupo Caiuá	28
3.3.2. Grupo Bauru	29
3.4. MAGMATISMO E SILICIFICAÇÃO	29
4. RESULTADOS.....	31
ARTIGO	32
<i>GENESIS OF THE SILICIFICATION OF NEOCRETACEOUS SANDSTONES IN THE BAURU BASIN BY ANALYSIS OF FLUID INCLUSIONS IN DIAGENETIC CEMENTS</i>	32
5. CONCLUSÕES	58
6. REFERÊNCIAS.....	59

1. INTRODUÇÃO

1.1. TEMA DA PESQUISA

A Bacia Bauru (FERNANDES; COIMBRA, 1996) localiza-se nos estados de São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Minas Gerais e Goiás no Brasil, e no nordeste do Paraguai. Foi preenchida durante o Cretáceo Superior pela *Supersequência sedimentar Bauru* (MILANI *et al.*, 2007), composta por dois grupos cronocorrelatos: Caiuá e Bauru. Diversas ocorrências de arenitos silicificados foram descritas por Fernandes *et al.* (1993) e Fernandes *et al.* (2013). Os registros mais notáveis da ação dos processos de silicificação são os Três Morrinhos (PR), o Morro do Diabo (SP), o morro da fazenda Santa Ida (SP) e o morrote da fazenda Porto Rico (PR). Estas ocorrências mais expressivas situam-se no cruzamento de lineamentos regionais de direção NE, como a Zona de Falhamento Loanda-Presidente Epitácio (MARQUES *et al.*, 1993), com zonas de falha de direção NW, do Arco de Ponta Grossa, que coincidem algumas das principais direções estruturais reconhecidas no substrato, em rochas da Bacia do Paraná. Ocorrências de derrames de natureza analcímica 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; COIMBRA, 1996).

A origem da silicificação dos arenitos foi considerada hidrotermal por alguns autores (*e.g.* BRANDT NETO *et al.*, 1978; FERNANDES *et al.*, 1993). As ocorrências não correspondem a intervalos estratigráficos específicos e pertencem a diferentes unidades litoestratigráficas, algumas vezes sobrepostas. Exibem preenchimentos intergranulares por sílica com diferentes texturas e indícios minerais que levaram a interpretação de silicificação de origem hidrotermal.

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

Estudos geotermométricos e de isótopos estáveis de inclusões fluidas auxiliam na verificação de modelos para os processos de cimentação pós-sedimentar por sílica.

O estudo das inclusões fluidas (e.g. GOLDSTEIN; REYNOLDS, 1994a; GOLDSTEIN, 2001) fornece importantes informações relacionadas à natureza dos processos diagenéticos. A caracterização da temperatura e composição dos fluidos envolvidos na 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).

1.2. OBJETIVOS

O objetivo da pesquisa foi verificar a hipótese de origem hidrotermal da silicificação de arenitos da Bacia Bauru mediante uso de microtermometria de inclusões fluidas.

Como objetivos específicos, buscou-se:

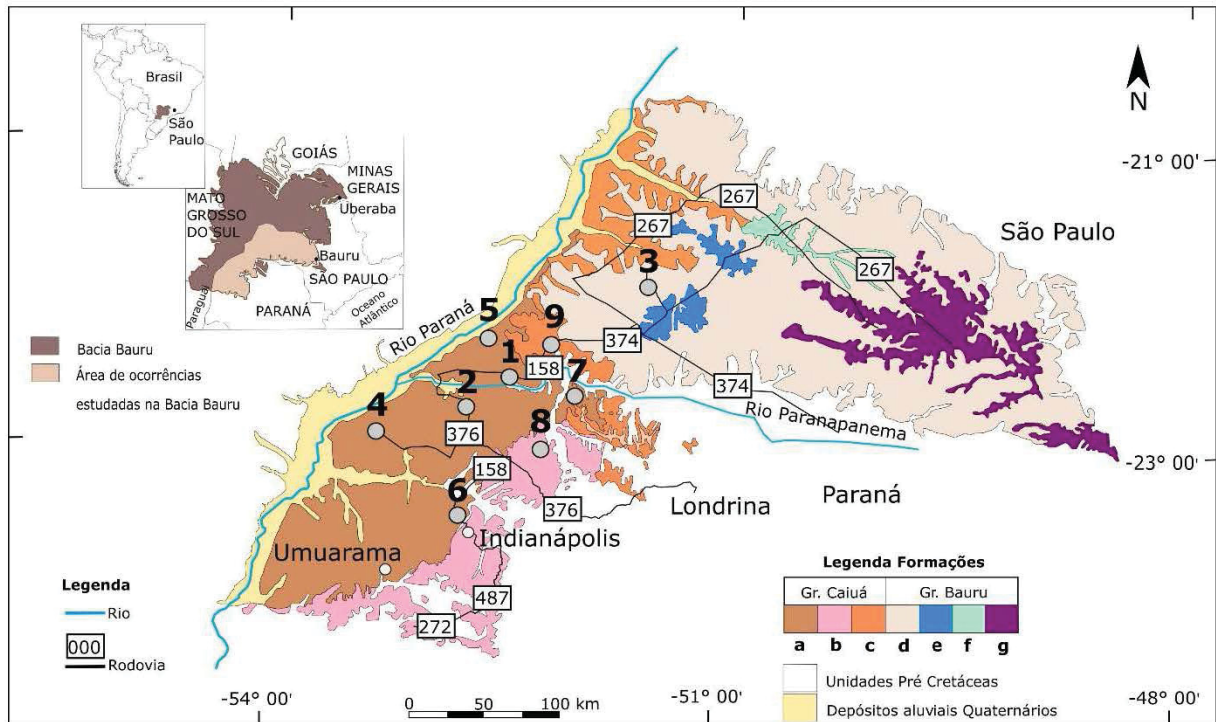
- a) identificar e caracterizar os cimentos diagenéticos (composição mineral, hábitos, texturas e interrelações);
- b) estabelecer a relação temporal de formação dos cimentos diagenéticos;
- c) caracterizar as assembleias de inclusões fluidas (minerais hospedeiros, forma de ocorrência, número de fases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

1.3. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de maior concentração de ocorrências de arenitos silicificados estudados situa-se nos extremos oeste do estado de São Paulo e noroeste do Paraná, na parte meridional da Bacia Bauru (Figura 1). As amostras analisadas se encontram desde a região sudoeste do estado de São Paulo, ao norte da cidade de

Presidente Prudente seguindo pela BR 374, BR 158 e BR 376 até a região noroeste do estado do Paraná, na cidade de Indianópolis (Figura 1).

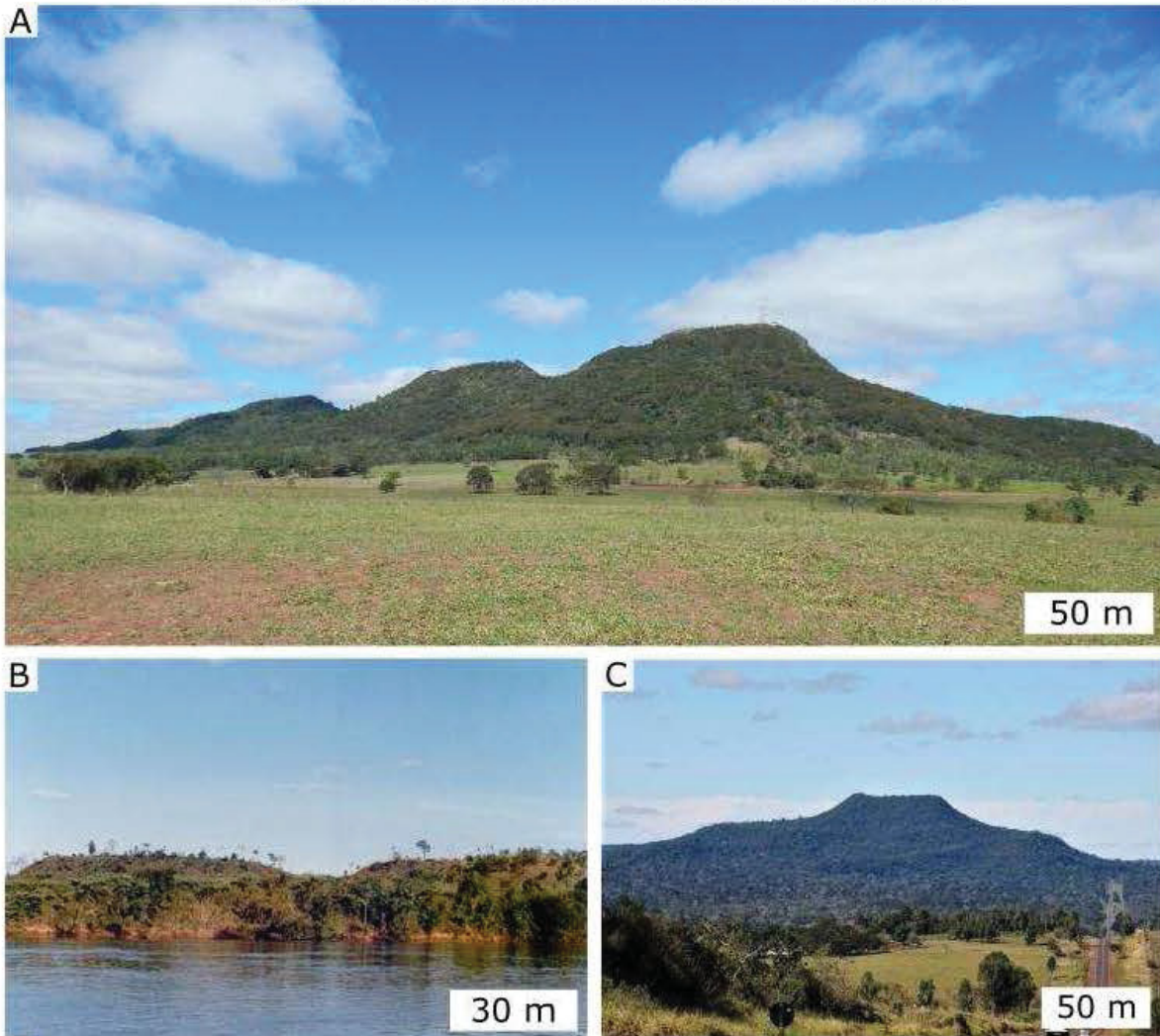
FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DE OCORRÊNCIAS DE ARENITOS SILICIFICADOS E CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO NA BACIA BAURU.



CONVENÇÕES: Litoestratigrafia: **a.** Fm. Rio Paraná, **b.** Fm. Goio Erê, **c.** Fm. Santo Anastácio, **d.** Fm. Vale do Rio do Peixe, **e.** Fm. Presidente Prudente, **f.** Fm. Araçatuba e **g.** Fm. Marília. Locais de proveniência das amostras: **1.** Morro do Diabo (SP), **2.** Três Morrinhos (PR), **3.** Fazenda Santa Ida (SP), **4.** Fazenda Porto Rico (PR), **5.** Fazenda Alegria (SP), **6.** Indianópolis (PR), **7.** norte de Mairá (PR), **8.** Uniflor (PR) e **9.** Fazenda da Floresta (SP).

As ocorrências de maior expressão destacam-se no relevo regional, que em geral, é formado por colinas amplas. São elas o Morro do Diabo, em São Paulo, Três Morrinhos e morrote da fazenda Porto Rico, ambos no Paraná (Figura 2 A, B e C) e morro da fazenda Santa Ida em São Paulo. Os morrotes alinhados e contíguos conhecidos como Três Morrinhos alongam-se em direção NW, sobre o eixo do Arco de Ponta Grossa, na zona de sua intersecção com o sistema de lineamentos NE. Os morrotes da fazenda Porto Rico formam quatro cristas alinhadas segundo a direção NE, salientes na paisagem de relevo suave da região (FERNANDES *et al.*, 1993).

FIGURA 2 - ELEVAÇÕES ANÔMALAS NO RELEVO REGIONAL DE COLINAS, SUSTENTADO POR ARENITOS SILICIFICADOS.



CONVENÇÕES: A. Três Morrinhos, Terra Rica, Paraná; B. morrote da Fazenda Porto Rico, Paraná; C. Morro do Diabo, Teodoro Sampaio, São Paulo. Fotos: Luiz A. Fernandes.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A hipótese de origem hidrotermal para a silicificação de arenitos da Bacia Bauru foi verificada pelos métodos apresentados a seguir. A pesquisa teve início por revisão bibliográfica sobre dois temas principais: arenitos silicificados - da Bacia Bauru e de registros da literatura -, assim como sobre a aplicação de estudos de inclusões fluidas para caracterização de ambientes diagenéticos. Em seguida, foram selecionadas e analisadas amostras e seções delgadas de arenitos silicificados e não silicificados, assim como mapas e informações de campo do acervo científico do grupo de pesquisas do CNPq/UFPR em Ambientes deposicionais continentais

mesozoico-cenozoicos. Novas seções delgadas foram confeccionadas, sobretudo para as análises microtermométricas de inclusões fluidas do cimento silicoso. Os resultados foram analisados no contexto geológico, para estabelecimento das conclusões sobre a gênese dos processos de silicificação dos arenitos da porção meridional da Bacia Bauru.

2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O levantamento bibliográfico consistiu em compilação de trabalhos sobre a geologia dos arenitos neocretáceos da Bacia Bauru (*e.g.* FERNANDES; MAGALHÃES-RIBEIRO, 2015; MILANI *et al.*, 2007), e sobre a origem da silicificação destes (*e.g.* FERNANDES *et al.*, 1993; FERNANDES *et al.*, 2013) e sobre a utilização dos métodos de análise e interpretação de inclusões fluidas (*e.g.* ROEDDER, 1984; GOLDSTEIN; REYNOLDS, 1994a).

2.2. DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA

Foram selecionadas 16 amostras para análise de arenitos silicificados da bacia, provenientes de exposições de superfície. A caracterização mesoscópica foi realizada com o uso de lupas manuais de 10x de aumento e observação a olho nu. Nesta etapa foram descritas, sistematicamente, a composição mineral e textural do arcabouço, cimentos, e eventuais matriz e poros. Além da caracterização, tal análise visou também a seleção de amostras com maior intensidade de silicificação para a confecção de seções delgadas de rocha convencionais e bipolidas, para a caracterização petrográfica e estudo de inclusões fluidas.

2.3. PETROGRAFIA POR MICROSCOPIA ÓPTICA DE LUZ TRANSMITIDA

Na caracterização petrográfica dos arenitos foram analisadas 11 seções delgadas convencionais e 19 seções delgadas de rocha bipolidas, estas últimas confeccionadas especialmente para as análises de inclusões fluidas. As seções delgadas convencionais têm cerca de 30 μm de espessura, sem lamínula, parte delas com impregnação de resina com corante azul. Estas lâminas serviram para a

caracterização petrográfica dos arenitos silicificados e dos não-silicificados. Para as análises microtermométricas foram utilizadas 19 seções delgadas de rocha bipolidas, de características adequadas ao estudo de inclusões fluidas, ou seja, com espessura entre 90 e 110 μm . As lâminas foram feitas com o uso de máquina de corte de desbaste *Struers*, modelo Labopol 35; serra de precisão *Struers*, modelo Secoton 50TM, e sistema de impregnação de amostras *Struers*, no laboratório de laminação do Laboratório de Minerais e Rochas da UFPR – LAMIR. As seções do acervo foram confeccionadas no atual Laboratório de Materiais de Construção Civil do centro de Tecnologia de Obras de Infraestrutura, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, com uso do sistema *Discoplan-TS* da *Struers*.

A análise petrográfica consistiu na descrição de seções delgadas convencionais e bipolidas com microscópio de luz transmitida polarizada. Obteve-se a composição mineral e textural do arcabouço, de cimentos, de matriz e a porosidade, assim como sua quantificação visual. A classificação granulométrica aplicada neste estudo foi a de Krumbein (1934). A caracterização de feições e depósitos minerais intergranulares pós-sedimentares visou estabelecer a evolução diagenética, com a identificação de diferentes composições e/ou gerações de cimentos, fases hospedeiras de inclusões fluidas, e as assembleias de inclusões fluidas, seguindo conceitos e métodos de Roedder (1984) e Goldstein e Reynolds (1994a).

2.4. ANÁLISE DE INCLUSÕES FLUIDAS

2.4.1. Petrografia de inclusões fluidas

A maioria dos minerais cristaliza-se a partir de um fluido, com exceção dos minerais metamórficos, seja ele um fluido aquoso ou um fundido silicático. Durante e após a cristalização, os minerais podem ser fraturados, uma ou várias vezes, permitindo a passagem de fluidos e a recristalização de microfraturas. Em ambos os casos, inclusões fluidas podem ser formadas pela preservação de gotículas de um fluido (líquido ou gasoso) em defeitos cristalinos do mineral, que é denominado mineral hospedeiro (ROEDDER, 1984) (Figura 3). Ao final de sua formação, as

inclusões tendem a permanecer como sistemas fechados, que permitem apenas a troca de energia na forma de calor (ROEDDER; SKINNER, 1968; ROEDDER, 1984).

Com a petrografia microscópica definem-se os tipos de inclusões fluidas e seus modos de ocorrência. Estas definições permitiram a determinação das Assembleias de Inclusões Fluidas (FIA), que são grupos de inclusões fluidas presumidamente aprisionadas em um mesmo intervalo de tempo (GOLDSTEIN; REYNOLDS, 1994a; GOLDSTEIN, 2003). As assembleias de inclusões fluidas selecionadas como possíveis representantes do fluido original durante um processo geológico devem seguir um conjunto de premissas sobre a natureza do fluido aprisionado e o modo de formação das inclusões fluidas, para se obter conclusões concisas acerca da história geológica do sistema (ROEDDER; BODNAR, 1997).

As chamadas Regras de Roedder (BODNAR, 2003), em especial aquelas apontadas para processos diagenéticos (GOLDSTEIN; REYNOLDS, 1994a), são: (I) uma amostra representativa do fluido associado ao processo diagenético ou hidrotermal foi aprisionada durante o crescimento de cristais; (II) nada foi adicionado ou removido da inclusão após o aprisionamento do fluido; (III) o volume da cavidade que aprisiona o fluido não aumentou ou diminuiu após o aprisionamento; (IV) as relações temporais e espaciais entre o evento de aprisionamento do fluido e os processos geológicos associados, como a deposição do minério ou o momento de preenchimento de um reservatório de petróleo, são conhecidas; (V) os efeitos da pressão na formação das inclusões são insignificantes ou conhecidos.

Considerando-se a aplicação das *Regras de Roedder*, inclusões fluidas podem ser classificadas quanto a sua gênese, de acordo com Goldstein e Reynolds (1994a), Kerkhof e Hein (2001) e Goldstein (2003), em:

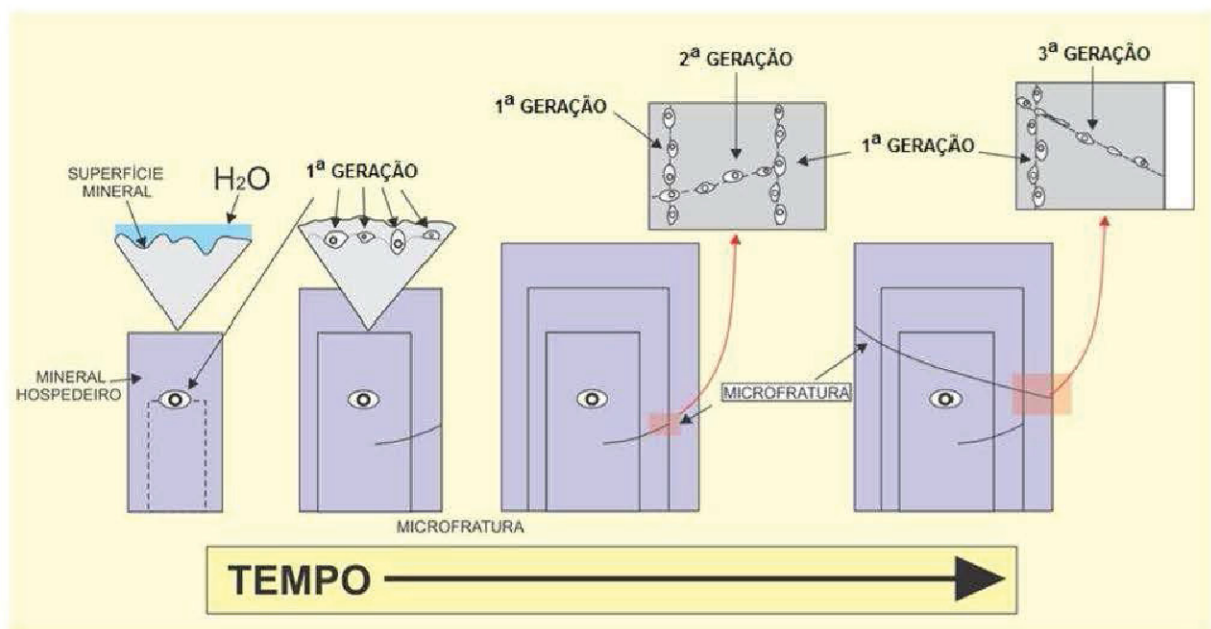
Inclusões primárias: aquelas aprisionadas durante a formação do cristal hospedeiro. Apresentam distribuição controlada por planos de crescimento do mineral, distribuição aleatória ou isolada, no interior do mineral hospedeiro, ou ainda, aquelas formadas na auréola de contato do sobrecrescimento mineral e o núcleo do grão (*dust rim*);

Inclusões pseudossecundárias: inclusões fluidas formadas em microfissuras geradas durante o crescimento do cristal hospedeiro, ocorrendo em arranjo plano-

linear intracristalino com terminação das trilhas restritas ao interior do cristal hospedeiro; e

Inclusões secundárias: geradas a qualquer momento após o crescimento do mineral hospedeiro. São identificadas por ocorrer em arranjo plano, que atravessa diferentes cristais, em planos de fratura, também denominados de planos de inclusões fluidas ou PIFs (Lespinnasse, 1999).

FIGURA 3 - FORMAÇÃO DE INCLUSÕES FLUIDAS DE ACORDO COM O CRESCIMENTO MINERAL.



No processo as inclusões fluidas podem se formar em defeitos microcristalinos nas zonas de crescimento (1ª geração), em microfatura formada concomitante ao crescimento mineral (2ª geração) ou mesmo pela recristalização de microfaturas originadas após o crescimento mineral (3ª geração). Modificado de Bodnar (2003) por Pestilho e Monteiro (2017).

A petrografia de arenitos com inclusões fluidas foi realizada com microscópio de polarização ZEISS I, Imager. A2m™; e *software* para aquisição e tratamento de imagens ZEISS, Axio Vision™.

2.4.2. Análises microtermométricas

A microtermometria de inclusões fluidas visa definir propriedades físico-químicas que representam as condições aproximadas do fluido original. 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 diagenético aprisionado na inclusão, fornecendo grande quantidade de informações importantes se obedecendo as Regras de Roedder (PESTILHO; MONTEIRO, 2017). Para interpretação de resultados de análises de inclusões fluidas por microtermometria é necessário que seja estabelecida a assembleia a ser estudada (FIA). Assim, podem-se obter 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, 1994a).

Com a microtermometria, obtém-se a temperatura mínima de aprisionamento, salinidade e a pressão do fluido por meio de parâmetros denominados Temperatura de Homogeneização (T_h), Temperatura Inicial de Fusão (T_i) e Temperatura Final de Fusão (T_m). A Temperatura de Homogeneização (T_h) é a temperatura em que uma inclusão passa de estado polifásico (sólido, líquido e/ou vapor) para o estado monofásico, de um líquido homogêneo. A Temperatura Inicial de Fusão (T_i) é obtida pelo aquecimento progressivo controlado após o congelamento total da inclusão, cujo valor é definido pelo aparecimento inicial da fase líquida. A Temperatura Final de Fusão (T_m) é definida quando os componentes sólidos (resultados do resfriamento) são completamente fundidos, onde sólidos de composição diferentes (H_2O , CO_2 , $NaCl$) vão apresentar T_i e T_m distintos, passíveis de interpretação (GOLDSTEIN, 2003). A salinidade do fluido é dada pela quantidade de solutos eletrolíticos ($NaCl$, $CaCl_2$) e não eletrolíticos (CO_2 , H_2S) presentes no fluido, a qual é expressa convencionalmente em $NaCl$ equivalente (equiv. wt. %). As concentrações individuais dos solutos em fluidos com vários componentes frequentemente não podem ser definidas, mas a salinidade global pode ser medida, pois os diferentes solutos são sensíveis à transição de fases, os quais indicam diferentes temperaturas de fusão. ($T_m [CO_2]$, $T_m [Gelo]$, $T_m [Halita]$) (GOLDSTEIN, 2003).

A salinidade de inclusões de H_2O -sal é frequentemente determinada mediante medição da temperatura de fusão de gelo da inclusão, referindo este valor a uma equação ou tabela que descreve a relação entre salinidade e depressão do ponto de congelamento. Geralmente, os dados para o sistema H_2O - $NaCl$ são usados para determinar uma salinidade equivalente a $NaCl$, devido à falta de informações

sobre os sais (ou outros eletrólitos) realmente contribuindo para a depressão do ponto de congelamento.

Nesta pesquisa a salinidade foi calculada com relação à percentagem de peso de equivalente de NaCl para todas as inclusões fluidas, onde foi utilizada a equação empírica para o sistema NaCl-H₂O de Bodnar (1993):

$$\text{Salinidade} = 0.00 + 1.78\theta - 0.0442\theta^2 + 0.000557\theta^3$$

θ = depressão do ponto de congelamento em graus Celsius.

A equação tem a mesma forma da equação de Potter *et al.* (1978). Apenas os coeficientes de regressão foram alterados para refletir o uso de dados mais recentes de Hall *et al.* (1988).

Nas análises 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 H₂O pura (densidade crítica) e H₂O-CO₂ (25% mol). As medidas dos pontos de fusão do CO₂ 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.

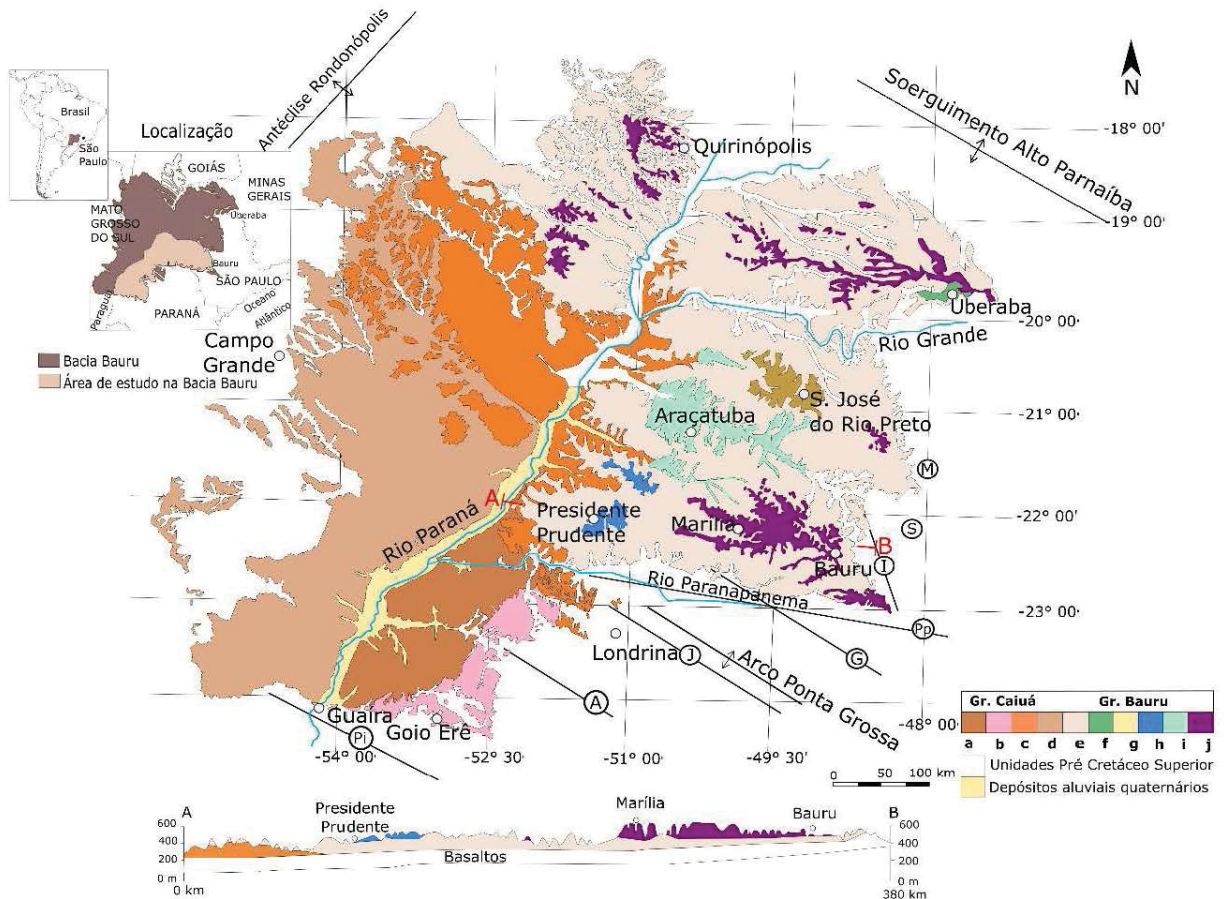
3. CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1. BACIA BAURU

A supersequência Bauru (MILANI *et al.*, 2007) se depositou na bacia homônima durante o Cretáceo Superior. Atualmente ocorre em partes dos estados de São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Minas Gerais e Goiás no Brasil, e no nordeste do Paraguai, segundo Fernandes e Magalhães-Ribeiro (2015) (Figura 4). É constituída por unidades siliciclásticas essencialmente arenosas, com espessura máxima preservada de cerca de 480 m, em atual área de 370.000 km². Atualmente a bacia tem um formato de borboleta, com o rio Paraná como seu eixo principal. A supersequência sobrepõe-se, principalmente, a rochas de derrames

basálticos da Província Magmática do Paraná (PMP) (LICHT, 2018), das quais separa-se por inconformidade erosiva.

FIGURA 4 - MAPA GEOLÓGICO DA BACIA BAURU.



CONVENÇÕES: Litoestratigrafia: a. Fm. Rio Paraná, b. Fm. Goio Erê, c. Fm. Santo Anastácio, d. Gr. Caiuá indiviso, e. Fm. Vale do Rio do Peixe, f. Fm. Uberaba, g. Fm. São José do Rio Preto, h. Fm. Presidente Prudente, i. Fm. Araçatuba, j. Fm. Marília. Lineamentos: Rio Piquiri (Pi), Rio Alonzo (A), São Jerônimo-Curiúva (J), Guapiara (G), Paranapanema (Pb), Ibtínga-Botucatu (I), Rio Moji Guaçu (M), São Carlos Leme (S), Rio Paraná (P). Fonte: Modificado de Fernandes e Magalhães-Ribeiro (2015).

3.2. EVOLUÇÃO TECTONO SEDIMENTAR

A supersequência Bauru foi originalmente considerada como pertencente ao preenchimento da Bacia do Paraná (e.g. SOARES *et al.*, 1980; ZÁLAN *et al.*, 1990; MILANI *et al.*, 1994). Fernandes e Coimbra (1996) excluíram a sequência neocretácea do registro sedimentar da Bacia do Paraná, por considerá-la acumulada em uma nova unidade tectônica, distinta, denominada Bacia Bauru, concepção adotada nesta pesquisa.

Um dos modelos de evolução da subsidência da Bacia Bauru foi o de flexura litostática, causada pela sobrecarga do derrame basáltico como o principal mecanismo regional (ZÁLAN *et al.*, 1990; FERNANDES; COIMBRA, 1996, 2000; RICCOMINI, 1997; MILANI *et al.*, 1994, 2007; FERNANDES; MAGALHÃES-RIBEIRO, 2015). Com a ruptura do Gondwana e início da evolução do oceano Atlântico Sul, houve um intenso fraturamento da crosta, seguido de magmatismo basáltico de larga escala, o Derrame Basáltico Continental Paraná-Etendeka, com vulcanismo principal entre 137 e 127 Ma (TURNER *et al.*, 1994). Este evento magmático marcou o fim da sedimentação extensiva em áreas intracratônicas de grandes dimensões, como a Bacia do Paraná. Após a abertura do oceano Atlântico Sul a plataforma continuou se elevando, até ocorrer uma inversão desse comportamento crustal, devido ao acúmulo de aproximadamente 2.000 metros de espessura de lavas basálticas. Durante o Cretáceo Superior, a depressão gerada pelo ajuste isostático devido ao acúmulo de lava basáltica, foi preenchida por material siliciclástico proveniente de alteração e erosão de rochas paleozoicas e pré-cambrianas expostas na borda da bacia (FERNANDES; MAGALHÃES-RIBEIRO, 2015). O setor de maior acúmulo de derrame basáltico coincide com a maior espessura de sedimento acumulada na bacia, indicando que seu preenchimento ocorreu simultaneamente com a contínua subsidência isostática do embasamento, o que também é indicado pela ausência de movimentos tectônicos locais significativos (FERNANDES; MAGALHÃES-RIBEIRO, 2015; Figura 5).

Menegazzo *et al.* (2016) situaram a Bacia Bauru na província de *back-bulge* de um retroarco de sistema *foreland* desenvolvido adjacente a margem oeste da América do Sul. Atribuíram assim seu desenvolvimento devido, principalmente, ao sobrecarregamento crustal e deflexão flexural resultantes do início da orogenia Andina, durante a movimentação absoluta a oeste da placa Sul-Americana e a subducção da Placa de Farallon (Figura 6).

FIGURA 5 - EVOLUÇÃO REGIONAL DA BACIA BAURU (MACEDO, 1989).

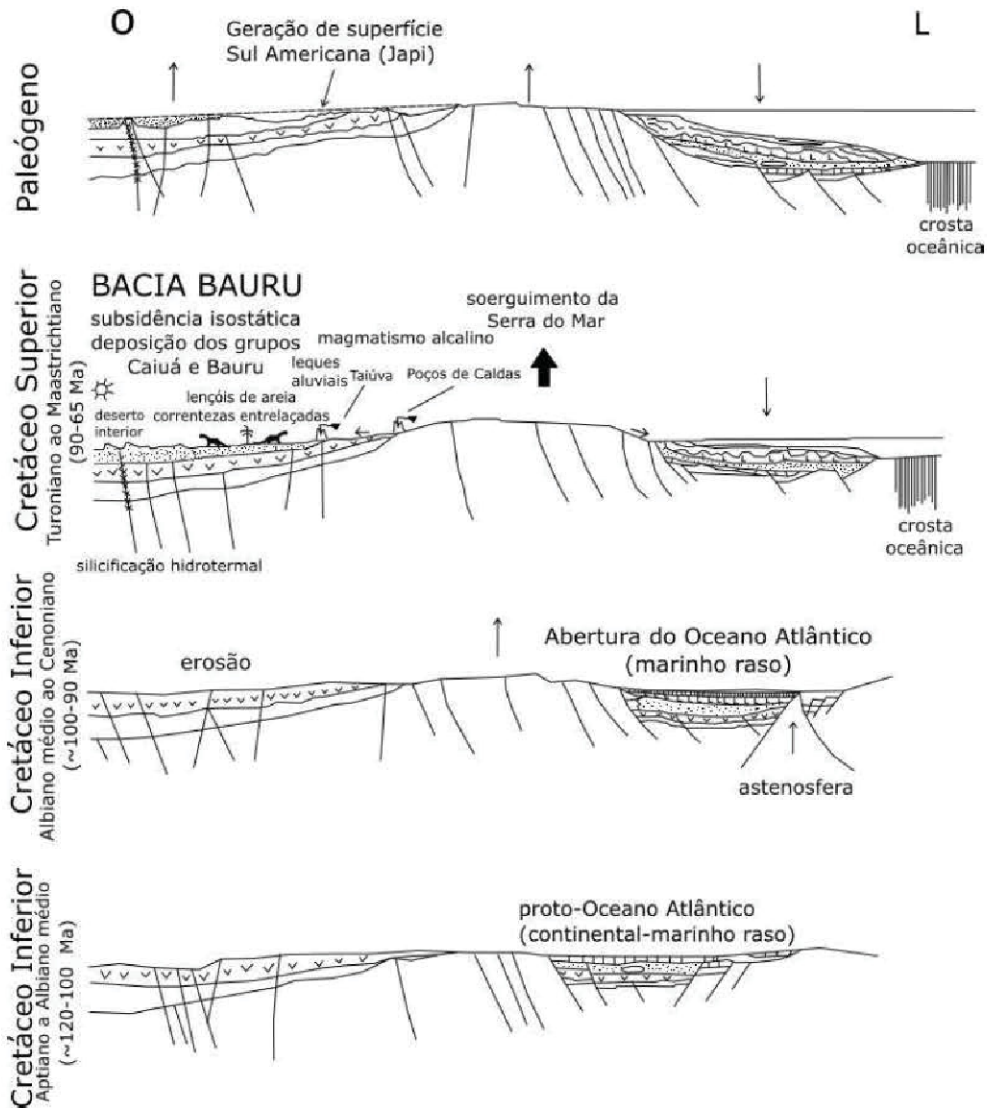
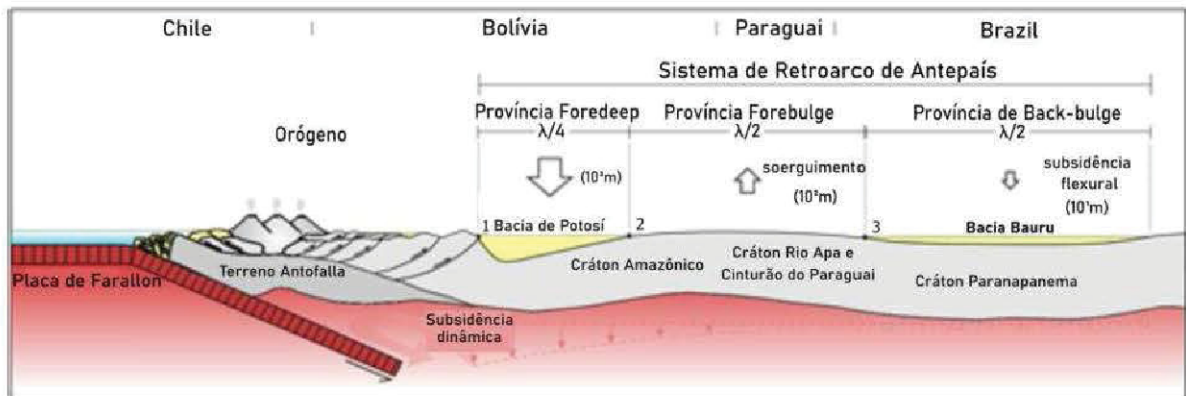


FIGURA 6 - SISTEMA DE RETROARCO DE ANTEPAÍIS SUL-AMERICANO DESENVOLVIDO NO CRETÁCEO SUPERIOR.



NOTA: O perfil flexural é dividido em províncias de *foredeep*, *forebulge* e *back-bulge*, este último onde se desenvolveu a Bacia Bauru. λ = comprimento de onda flexural; 1 = front orogênico; 2 e 3 = linha de dobra flexural. Sem escala vertical. Traduzido de Menegazzo *et al.* (2016).

Do final do Triássico Superior ao Cretáceo Inferior prevaleceu na Placa Sul-Americana um regime extensional relacionado a ruptura do megacontinente Gondwana e abertura do oceano Atlântico (MEGARD, 1984). Após o rompimento e evolução das bacias de Pelotas e Santos no Cretáceo Inferior, a Placa Sul-Americana mudou o rumo de movimentação absoluta para oeste, aumentando a taxa de convergência com a Placa de Farallon e o regime de esforços tectônicos na América do Sul mudou de extensional para compressional (RICCOMINI *et al.*, 2004; RAMOS, 2009, 2010). Portanto, a margem oeste da América do Sul foi primeiramente submetida a compressão dando início ao soerguimento do orógeno Andino inicial (MEGARD, 1984; RAMOS, 2009, 2010). Conseqüentemente, no início do Cretáceo superior, uma série de bacias de antepaís se desenvolveram paralelas à frente de empurrão Andino, com a Bacia Andina as regiões noroeste e central do Andes Central (MPODOZIS *et al.*, 2005).

No interior do continente, sucessões do Cretáceo Superior foram depositadas sobre bacias paleozoicas paralelas à Bacia Andina. A Bacia Bauru instalou-se na parte norte da Bacia do Paraná, sobre as rochas da Província Magmática do Paraná (PMP). Nesta área, a crosta tem espessura média de 40 km (ASSUMPÇÃO *et al.*, 2013) com alta rigidez flexural e constitui grande parte do Cráton Paranapanema, do Paleoproterozoico.

Os limites atuais da bacia são altos estruturais regionais, com centros de magmatismo localizados. Durante sua evolução, houve dois períodos de maior intensidade de eventos alcalinos intrusivos: 87–80 Ma e 70–60 Ma (ALMEIDA; MELO, 1981). Estes corpos intrusivos se encontram principalmente nos limites da bacia.

Os principais padrões estruturais foram mantidos durante a subsidência do embasamento, como herança tectônica (FERNANDES; MAGALHÃES-RIBEIRO, 2015). A evolução da bacia foi também influenciada pela ação dos altos internos e alinhamentos, como o Paranapanema, além do soerguimento das margens da bacia (FÚLFARO, 1974) e Tietê (COIMBRA *et al.*, 1997). A reativação de estruturas marginais e reflexos da orogenia Andina promoveram modificações subseqüentes no Cretáceo Superior e Paleoceno, com caráter direcional dominante (RICCOMINI, 1997; ZALÁN, 2004). O tectonismo, principalmente associado aos lineamentos Paranapanema e Ibitinga-Botucatu, causou o aumento do suprimento de sedimentos

e vulcanismo alcalino ao longo do Lineamento Rio Moji-Guaçu. São considerados por Riccomini (1997) dois regimes tectônicos de transcorrência sobrepostos que marcam a deformação pós-sedimentar, provavelmente neotectônicos, como indicado, por exemplo, pelo Lineamento Rio Paraná.

No início do preenchimento, as unidades basais da sequência Bauru ocuparam áreas originalmente mais baixas, reduzindo e eliminando desníveis topográficos mais significativos. Segundo Fernandes e Magalhães-Ribeiro (2015), o preenchimento da Bacia Bauru ocorreu em duas fases principais (Figura 7). A primeira fase ocorreu, sobretudo, em condições desérticas (trato de sistema de deserto), e a segunda fase envolveu mais água, embora sob clima semiárido (trato de sistema fluvial-eólico).

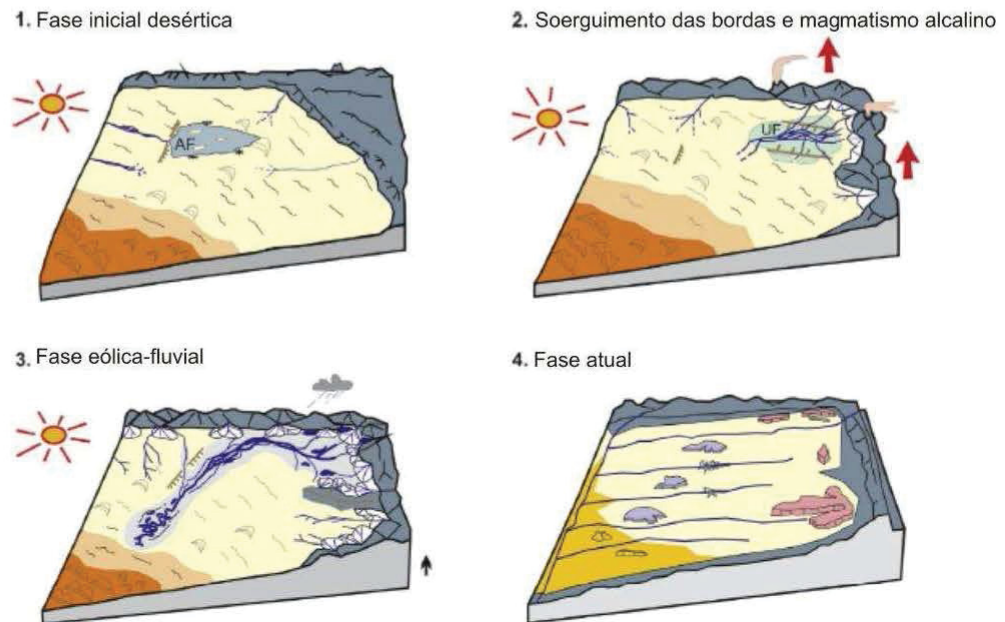
A primeira fase corresponde principalmente a depósitos de lençóis areia, com dunas de porte moderado e depósitos de loesse intercalados, e corresponde ao progressivo soterramento do substrato basáltico regional por depósitos arenosos extensos e homogêneos. Nesta fase, a baixa atividade fluvial se restringia a fluxos de escoamento desérticos (*wadis*). Em termos litoestratigráficos, o trato de sistema desértico corresponde as formações Vale do Rio do Peixe, Santo Anastácio, Goio Erê e Rio Paraná. O relevo regional original do substrato criou condições endorrêicas na bacia na fase inicial de preenchimento, com instalação de extensa área de charcos, em clima semiárido, dando origem ao Pantanal de Araçatuba, formado na parte central da bacia.

No decorrer da segunda fase de sedimentação houve mudanças no contexto geográfico e geomorfológico da bacia, causado por reativações tectônicas que levaram ao avanço de leques aluviais e mudanças climáticas graduais que trouxeram mais umidade, sobretudo nas bordas, desenvolvendo sistemas fluviais de maior porte em contexto regional semiárido. Em termos litoestratigráficos, o trato de sistema fluvial-eólico é corresponde às formações Marília, São José do Rio Preto e Presidente Prudente.

Corpos intrusivos de rochas alcalinas vinculados com altos marginais, instalaram-se durante a principal fase de soerguimento das bordas da bacia. No mesmo período, há registro de magmatismo extrusivo próximo da atual borda leste da bacia, designados de Analcimitos Taiúva, assim como de silicificação localizada

na porção sul da bacia (FERNANDES; MAGALHÃES-RIBEIRO, 2015). Na segunda fase deposicional a bacia era delimitada por importantes altos tectônicos regionais: a antéclice de Rondonópolis (COIMBRA, 1991) a noroeste, o alto de Alto Parnaíba (HASUI; HARALYI, 1991) no nordeste, e a Serra do Mar (ALMEIDA, 1976) a leste.

FIGURA 7 - EVOLUÇÃO PALEOGEOGRÁFICA DA BACIA BAURU.



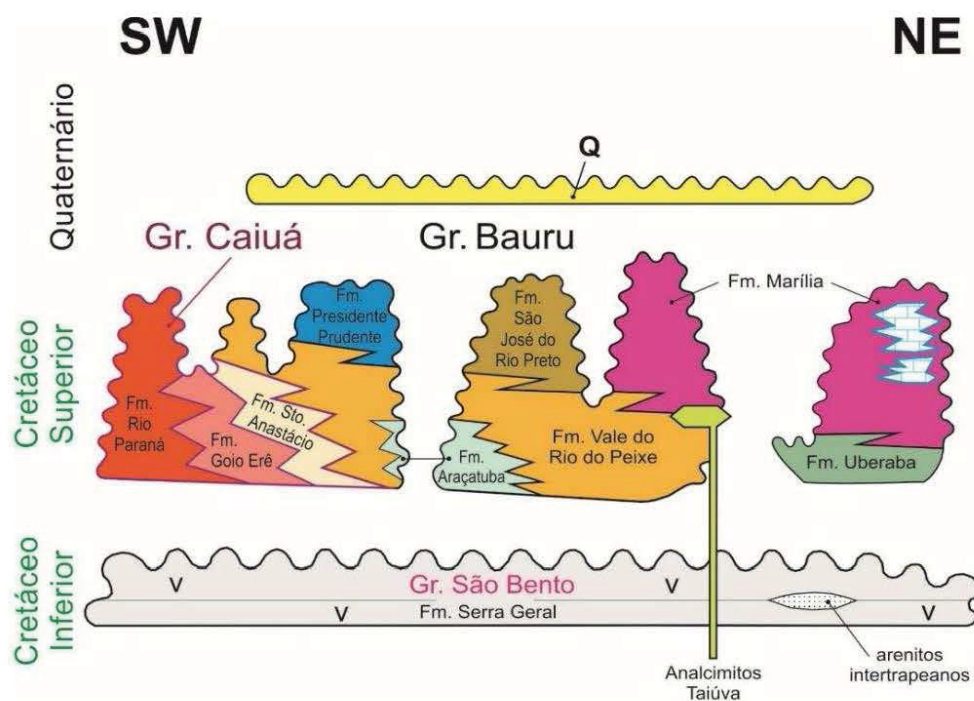
CONVENÇÕES: 1. fase desértica inicial (lençóis de areia e depósitos paludiais); 2. soerguimento das bordas e magmatismo alcalino; 3. fase eólica-fluvial, clima predominante semiárido e condições desérticas, mas envolvendo maior disponibilidade de água (lençóis de areia, rios entrelaçados e depósitos de dunas); 4. Fase atual. Traduzida de: Fernandes e Magalhães-Ribeiro (2015).

A bacia foi preenchida por leques aluviais marginais e sistemas de rios distributários vindos das bordas (membros Serra da Galga e Ponte Alta) e sistemas fluviais entrelaçados a meandranes arenosos (formações São José do Rio Preto e Presidente Prudente). Com o progressivo aumento na evaporação e na escassez de água no ambiente, a aridez aumentava rumo ao interior, até o cessamento do aporte de natureza fluvial nas planícies arenosas de lençóis de areia, marginais do deserto Caiuá. Entre o final do Cretáceo Superior e Paleógeno Inferior, o sentido de movimento do substrato da Bacia Bauru se inverteu. Com a elevação e exposição dos depósitos, iniciou-se um novo ciclo de erosão, no qual se desenvolveu a Superfície Sul-Americana (KING, 1956; *apud* FERNANDES; MAGALHÃES-RIBEIRO, 2015) ou Japi (ALMEIDA, 1964).

3.3. LITOESTRATIGRAFIA

A Supersequência Bauru, que preencheu a Bacia Bauru é corresponde a dois grupos cronocorrelatos, definidos por Fernandes e Coimbra (2000) como 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) (Figura 8). Os grupos têm passagem lateral gradual e interdigitada. O contato basal da supersequência é associado geralmente a um intervalo brechóide de espessura métrica, sustentado por matriz arenosa imatura, com cimento carbonático frequente, com clastos angulosos de basalto.

FIGURA 8 - CARTA LITOESTRATIGRÁFICA DA BACIA BAURU (FERNANDES *et al.*, 2013).



3.3.1. Grupo Caiuá

O Grupo Caiuá é constituído por depósitos arenosos acumulados em ambiente eólico, composto pelas formações Rio Paraná, Goio Erê e Santo Anastácio (FERNANDES; COIMBRA, 1994, 1996). As formações Rio Paraná e Goio Erê são constituídas por quartzarenitos marrom-avermelhados a arroxeados, finos a muito

finos, por vezes subarcoseanos, com característica estratificação cruzada tabular, tangencial na base, de médio a grande porte. As duas formações diferenciam-se pelo arranjo geométrico dos litossomas, maturidade (textural e mineralógica), bem como pela disposição geográfica na bacia. A Formação Santo Anastácio, é composta por quartzoarenitos marrom-arroxeados claro, eventualmente subarcoseanos, muito finos a finos, com fração siltica subordinada. Apresentam aspecto maciço, às vezes com estratificação plano-paralela ou cruzada de baixa inclinação, mal definidas.

3.3.2. Grupo Bauru

O Grupo Bauru é composto pelas formações Marília, Uberaba, Vale do Rio do Peixe, Araçatuba, São José do Rio Preto e Presidente Prudente. A Formação Vale do Rio do Peixe constitui-se de estratos geralmente tabulares de arenitos finos a muito finos e lamitos siltosos, de cor rósea a castanho, com intercalações de argilitos de cor castanho-avermelhado. Em geral, apresentam-se em estratos maciços, ou de acamamento plano-paralelo, alternados com camadas de estratificação cruzada de médio a pequeno porte. A Formação Marília compreende quartzoarenitos e conglomerados, textural e mineralogicamente imaturos, dispostos em estratos tabulares maciços de espessura métrica, com cimentação, concreções e crostas duras carbonáticas (calcretes). A Formação Uberaba é constituída por arenitos com cimento calcítico e/ou matriz argilosa, de cor cinza esverdeado característica, com intercalações subordinadas de siltitos, argilitos, arenitos conglomeráticos e conglomerados arenosos, vulcanoclásticos. Os Analcimitos Taiúva são rochas efusivas de carácter alcalino, ricas em analcima, intercaladas na Formação Vale do Rio do Peixe, identificadas em subsuperfície, em São Paulo.

3.4. MAGMATISMO E SILICIFICAÇÃO

A Bacia Bauru tem seus limites atuais definidos em grande parte por altos tectônicos regionais, onde estão situados centros de magmatismo alcalino neocretáceos. As manifestações alcalinas mesozoico-cenozoicas do centro e sul do Brasil ocorreram em dois períodos distintos, segundo Almeida e Melo (1981). O

primeiro ocorreu anteriormente a sedimentação na Bacia Bauru, durante o Jurássico Superior-Cretáceo Inferior (Neocomiano), contemporâneo ao vulcanismo Serra Geral. 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 supersequência neocretácea (FERNANDES; COIMBRA, 1996). A ocorrência de derrames de natureza analcímica contemporâneos à sedimentação da atual Formação Vale do Rio do Peixe em São Paulo os 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; COIMBRA, 1996). Estruturas atribuídas a eventos sísmicos penecontemporâneos à deposição do Grupo Caiuá, no Pontal do Paranapanema foram descritas por Coimbra *et al.* (1992). Esta sismicidade e silicificação provavelmente sincrônicas ao magmatismo alcalino do Cretáceo Superior estão temporalmente, ao menos, relacionadas com o contexto tectônico.

Uma feição sugestiva da associação entre atividade tectônica e silicificação foi observada no alto do Morro dos Três Morrinhos (PR), onde há uma faixa subvertical de direção NNE, de 0,7 m de espessura e aspecto brechóide, silicificada, como o arenito adjacente (FERNANDES *et al.*, 1993). Algumas falhas de pequeno deslocamento vertical foram encontradas em locais onde o arenito ocorre silicificado, na base do Morro do Diabo, em 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 (FERNANDES *et al.*, 1993). Diversas ocorrências de arenitos silicificados foram descritas na porção meridional da Bacia Bauru. São de caráter pontual e, algumas vezes afetando várias unidades litoestratigráficas sobrepostas simultaneamente. As maiores exposições destes arenitos se dispõem na forma de morrotes, que se destacam na paisagem de relevo de colinas amplas, relativamente plana da região. As mais notáveis são os morros do Diabo e da Fazenda Santa Ida localizados no Pontal do Paranapanema, em São Paulo e os Três Morrinhos e o morro da fazenda Porto Rico, no Paraná.

No noroeste do Paraná e extremo oeste de São Paulo há outras ocorrências menos expressivas de arenitos silicificados dos grupos Caiuá e Bauru. Uma característica interessante destas ocorrências é que as mais expressivas se alinham concentram no cruzamento de duas das três principais direções estruturais regionais, NE e NW, sobretudo, sobre o Arco de Ponta Grossa.

As características e a distribuição peculiar das ocorrências de rochas silicificadas, concentradas no cruzamento de estruturas tectônicas regionais, assim como a ocorrência de palygorskita em basaltos sotopostos e carbonato-fluorapatita em arenitos do Grupo Caiuá, sugerem processos de natureza hidrotermal (percolação de fluidos silicosos), provavelmente relacionados com o magmatismo alcalino no Cretáceo Superior, e finalizados com a silicificação, no fechamento da sedimentação na Bacia Bauru (FERNANDES; COIMBRA, 1993). Características petrográficas tais como o preenchimento posterior por sílica microcristalina pressupõe aumento na concentração de sílica resultando em rápida precipitação, e a ocorrência de palygorskita em zonas brechadas dos basaltos subjacentes e carbonato-fluorapatita nos arenitos também permite supor o processo de silicificação hidrotermal, segundo Coimbra (1991). Brandt Neto *et al.* (1978) identificaram o mineral analcima no arcabouço de arenitos basais da Formação Vale do Rio do Peixe, em amostras de subsuperfície da região de Macedônia, no noroeste do estado de São Paulo. Coimbra *et al.* (1981) associaram sua origem a eventos hidrotermais possivelmente contemporâneos ao magmatismo alcalino registrado nas imediações de Jaboticabal, na mesma região.

4. RESULTADOS

ARTIGO

GENESIS OF THE SILICIFICATION OF NEOCRETACEOUS SANDSTONES IN THE BAURU BASIN BY ANALYSIS OF FLUID INCLUSIONS IN DIAGENETIC CEMENTS

Abstract The Bauru Basin is in the states of São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Minas Gerais, and Goiás in Brazil, and in the northeast of Paraguay. It was filled during the Late Cretaceous by the Bauru sedimentary supersequence, which is composed of two chronocorrelated groups: Caiuá and Bauru. In the southern portion of the basin, mainly in the Caiuá Group, there are several occurrences of silicified sandstones considered to be of hydrothermal origin. However, other genetic hypotheses are possible such as the formation of crusts (silcretes) by processes of pedogenesis, eodiagenetics, or due to burial, mesodiagenetics. The main objective of this study was to investigate the hypothesis of hydrothermal genesis of silicification by analyzing fluid inclusions. The method provides quantitative and qualitative information about the nature of diagenetic processes and conditions. The context of silicification of sedimentary deposits, whether under surface conditions, under burial or because of hydrothermal processes, can be discussed by determining the temperature and composition of the fluids trapped in the cements developed in the diagenesis. In the present study, microthermometric analyzes were performed in inclusions representative of the origin of silicification, associated with the formation of quartz cements. The results obtained were high fluid trapping temperatures, between 240.1 and 405.8 °C above the known burial diagenetics, as well as low salinity, between 1.2 and 6.0 (% eq ms. NaCl). These results have certified, therefore, the hydrothermal origin of the processes, which took place in interior continental conditions with little burial, and in the context of water scarcity with the possible influence of regional structures such as the Ponta Grossa Arch.

Keywords: Upper Cretaceous, Bauru Basin, fluid inclusion, silicified sandstone, hydrothermal, diagenesis.

Introduction

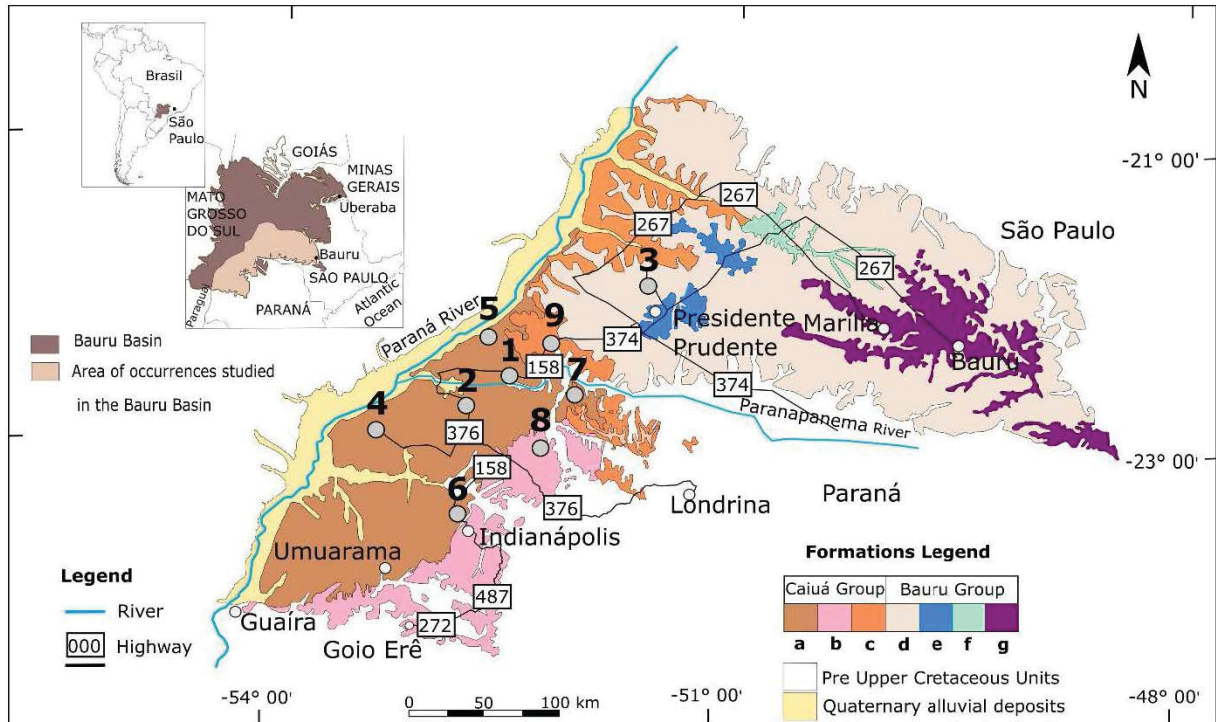
In this article we present a detailed study of the genesis of the silicified sandstones of the Bauru Basin, using fluid inclusions analysis coupled with geospatial analysis (Figure 1). The Bauru Basin encompasses a large sedimentary

cover of semi-arid to arid deposits in Southeastern Brazil and Paraguay, that originated in the Late Cretaceous (Coniacian–Maastrichtian) (FERNANDES; MAGALHÃES-RIBEIRO, 2015; MENEGAZZO *et al.*, 2016). In the Southeastern Bauru Basin, several instances of silicified sandstones outcrops in isolated hills the intersection between NE–NW lineaments (FERNANDES *et al.*, 1993) (Figure 1). The silicified sandstones are not limited to any specific stratigraphic intervals, and do not show any direct association with igneous rocks (Fernandes *et al.*, 1993). The genesis the silicified sandstones in Southeastern Bauru Basin has been attributed to paleo-hydrothermal fluids (FERNANDES *et al.*, 1993).

Pervasive quartz cementation is a major feature found in sedimentary-hosted geothermal systems, such as conventional geothermal systems (NIELSEN *et al.*, 2019). Conventional geothermal systems are high heat-flow environments where the meteoric water infiltrates and migrates to depths of several kilometers generating convective heat transport mechanism by ascending hot aqueous (hydrothermal) fluids (HEASLER *et al.*, 2009; PROCESI *et al.*, 2019). Geothermal refers to any system that transfers heat from within the Earth towards the surface, while hydrothermal is a subset of geothermal system, where heat is transferred by the convection of water as a liquid or vapor (NEUENDORF *et al.*, 2011; PROCESI *et al.*, 2019). Furthermore, large-scale paleo-geothermal provinces are linked to deep-crustal and mantle activity (PIRAJNO, 2020). However, the identification of paleo-geothermal systems is difficult, requiring advanced tools such as fluid inclusions (WILKINSON, 2001).

In brief, our results provide new data (paleotemperature, salinities, Pressure-Volume-Temperature) for the conceptual reconstruction of the paleo-geothermal system in the Southern Bauru Basin, and a discussion of the implications of such phenomena. We hope this research may trigger new interest in the role of geothermal systems in the development of intracratonic basins and its relationship to the tectonic evolution of the South American continent during the Late Cretaceous.

FIGURE 1 - LOCATION OF SILICIFIED SANDSTONES OCCURRENCES AND GEOLOGICAL CONTEXT OF THE STUDY AREA IN THE BAURU BASIN.



KEY STRATIGRAPHY: a. Rio Paraná Formation, b. Goio Erê Formation, c. Santo Anastácio Formation, d. Vale do Rio do Peixe Formation, e. Presidente Prudente Formation, f. Araçatuba Formation and g. Marília Formation. **SAMPLING SITES:** in the state of São Paulo (SP) and Paraná (PR): 1. Morro do Diabo (SP), 2. Três Morrinhos (PR), 3. Santa Ida Farm (SP), 4. Porto Rico (PR), 5. Alegria Farm (SP), 6. Indianópolis (PR), 7. Mairá (PR), 8. Uniflor (PR), and 9. Floresta Farm (SP).

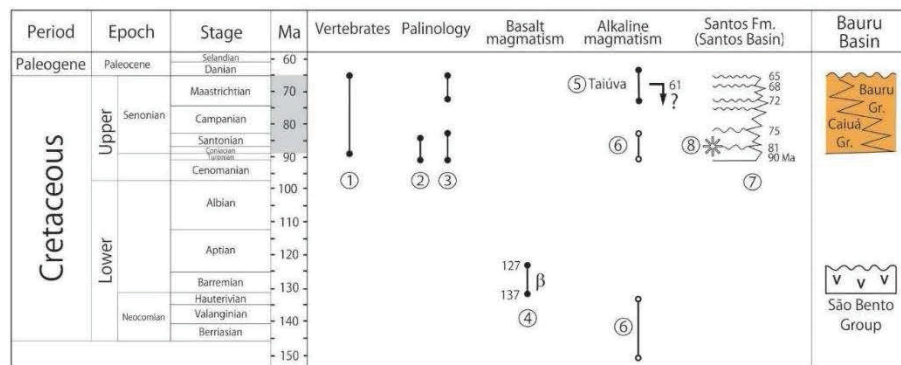
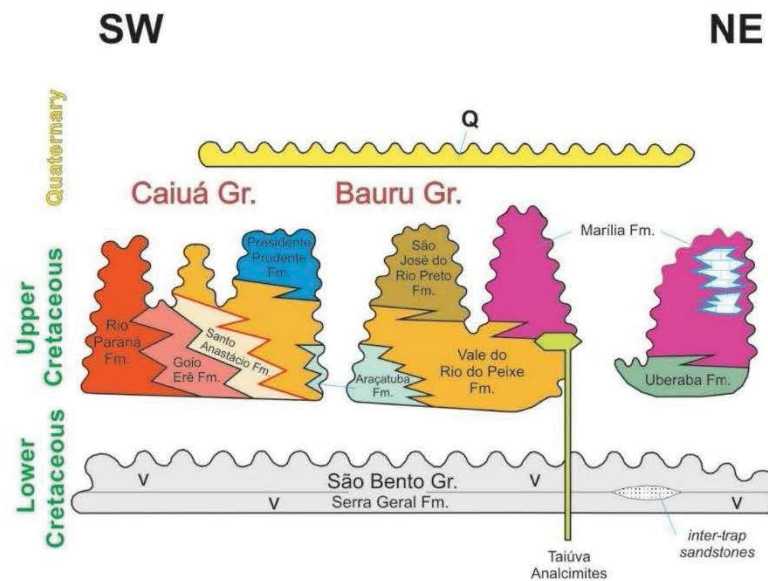
2. Geological setting

2.1. The Bauru Basin

The Bauru Basin sedimentary deposits comprise sandy siliciclastic units, spanning an area of 370,000 km² and with maximum thickness of approximately 480 m (FERNANDES; MAGALHÃES-RIBEIRO, 2015). The onset of deposition of the Bauru Basin began after the opening of the South Atlantic Ocean, in an erosive non-conformity over the basaltic rocks of the Paraná Igneous Province (LICHT, 2018; MILANI *et al.*, 2007). Two main causes are attributed to the origin of the Bauru Basin: (i) Isostatic adjustment causes by the weight oof basaltic lavas (FERNANDES; MAGALHÃES-RIBEIRO, 2015); (ii) The beginning of the Andean orogeny, that caused flexural subsidence in response to the crustal loading (MENEGAZZO *et al.*, 2016). It is possible that both mechanisms acted together, since the Andean orogeny alone could not explain the thickness of the sedimentary fill (MENEGAZZO *et al.*, 2016).

The stratigraphic record of the Bauru Basin is divided into two Late Cretaceous lithostratigraphic units (Figure 2): (i) The Caiuá Group, comprising Rio Paraná, Goio Erê, and Santo Anastácio formations; and (ii) the Bauru Group, that includes Vale do Rio do Peixe, São José do Rio Preto, Presidente Prudente, Araçatuba, Marília, and Uberaba formations. In addition, analcimite rocks (Taiúva Analcimites) occur intercalated with sediments of the Bauru Group. The lateral contact between the Bauru and Caiuá groups is gradual and interdigitated (FERNANDES; MAGALHÃES-RIBEIRO, 2015).

FIGURE 2 - LITHOSTRATIGRAPHY AND CHRONOLOGY OF THE BAURU SUPERSEQUENCE (FERNANDES; MAGALHÃES-RIBEIRO, 2015).



Key: ① Huene (1939), ② Lima et al. (1986)/Mitsuro Arai (1994, verbal communication), ③ Dias-Brito et al. (2001), ④ Turner et al. (1994), ⑤ Coutinho et al. (1982), ⑥ Almeida & Melo (1981), ⑦ Moreira et al. (2007), ⑧ Alves et al. (1994).

The Caiuá Group consists of aeolian sand deposits accumulated in a wind environment (FERNANDES; COIMBRA, 1994, 1996). The Rio Paraná and Goio Erê

formations are composed of fine to very fine reddish-brown to purplish-brown quartz sandstones, sometimes subarcosean, with characteristic cross-stratification. The two formations are differentiated by the geometric arrangement of the litesomes, maturity (textural and mineralogical), as well as by the geographical layout in the basin. The Santo Anastácio Formation is composed of light brown-purple quartz sandstone, eventually subarcosean, very fine to fine, with subordinate silica fraction. They have a massive aspect, sometimes with low slope plan parallel or crossed stratification, poorly defined.

The Bauru Group is comprised of the Marília, Uberaba, Vale do Rio do Peixe, Araçatuba, São José do Rio Preto and Presidente Prudente formations. The Vale do Rio do Peixe Formation consists of tabular strata of fine to very fine sandstones and silty lamites, from pink to brown in color, with intercalations of reddish-brown clay. In general, they are presented in solid strata, or flat-parallel bedding, alternating with medium to small cross-stratification layers. The Marília Formation comprises quartzarenites and conglomerates, textural and mineralogically immature, arranged in massive tabular layers of metric thickness with cementation, concretions, and hard carbonate crusts (calcretes). The Uberaba Formation consists of sandstones with calcitic cement and/or clayey matrix, of characteristic greenish gray color, with subordinate intercalations of siltstones, claystones, conglomeratic sandstones and sandy, volcanoclastic conglomerates. Analcimitos Taiúva are effusive rocks of alkaline character, rich in analcime, interspersed in the Vale do Rio do Peixe Formation.

At the beginning of the filling, the basal units of the Bauru sequence occupied originally lower areas reducing and eliminating more significant topographic gaps. The Bauru Basin was filled in two main phases (FERNANDES; MAGALHÃES-RIBEIRO, 2015). The first phase occurred, mainly, in desert conditions (desert system treatment), and the second phase involved more water, although under a semi-arid climate (river-wind system treatment).

The first phase corresponds mainly to deposits of sand sheets, with moderate dunes and interlaced loess deposits, and corresponds to the progressive burial of the regional basaltic substrate by extensive and homogeneous sandy deposits. In this phase, the low river activity was restricted to desert flow flows (wadis). In lithostratigraphic terms, the desert system corresponds to the Vale do Rio

do Peixe, Santo Anastácio, Goio Erê and Rio Paraná formations. The original regional relief of the substrate created endorheic conditions in the basin in the initial filling phase, with the installation of an extensive area of ponds, in a semiarid climate, giving rise to the Araçatuba Swamp, formed in the central part of the basin.

The current limits of the Bauru Basin are largely defined by high regional tectonics, where Late Cretaceous alkaline magmatism centers are located. The mesozoic-cenozoic alkaline manifestations of central and southern Brazil occurred in two different periods, according to Almeida and Melo (1981). The first occurred before sedimentation in the Bauru Basin, during the Late Jurassic-Early Cretaceous (Neocomian), contemporary to the Serra Geral volcanism. The second period of the Aptian-Eocene interval comprises two maximum intensities of intrusive events: 87-80 Ma and 70-60 Ma, contemporary with the sedimentation of the neocretaceous sequence (FERNANDES; COIMBRA, 1996). The occurrence of spills of an analcymitic nature contemporary to the sedimentation of the current Vale do Rio do Peixe Formation in São Paulo (Analcimitos Taiuva), and the association between siliciclastic and volcanoclastic rocks on the northern edge of the basin suggest the importance of tectonic activities and associated alkaline magmatism in the evolution of the Basin Bauru (FERNANDES; COIMBRA, 1996). Structures attributed to penecontemporary seismic events to the deposition of the Caiuá Group, in Pontal do Paranapanema were described by Fernandes *et al.* (2007). This seismicity and silicification probably synchronic to the alkaline neocretaceous magmatism are temporally related to the tectonic context.

The main structural patterns were maintained during the subsidence of the basement rock, as a tectonic heritage (FERNANDES; MAGALHÃES-RIBEIRO, 2015). The evolution of the basin was also influenced by the action of the internal topographic highs and alignments, such as Paranapanema, in addition to the uplift of the margins of the basin (FÚLFARO, 1974) and Tietê (COIMBRA *et al.*, 1997). The reactivation of marginal structures and reflexes of the Andean orogeny promoted subsequent changes in the Late Cretaceous and Paleocene, with a dominant directional character (RICCOMINI, 1997; ZALÁN, 2004). Tectonism, mainly associated with the Paranapanema and Ibitinga-Botucatu lineaments, caused an increase in the supply of sediments and alkaline volcanism along the Moji-Guaçu River Lineament. Riccomini (1997) considers two overlapping tectonic regimes that

mark post-sedimentary deformation, probably neotectonic, as indicated, for example, by the Rio Paraná Lineament.

2.2. Silicification in the Bauru Basin

The silicified sandstone outcrops in the Bauru Basin displays a regional scale structural control, reflecting basement structures. The outcrops occur over the area of the western extension of the Ponta Grossa Arch (FERNANDES *et al.*, 1993), a prominent NW-SE-trending tectonic associated with important alkaline and alkaline-carbonatitic magmatic activity in Early and Late Cretaceous (GOMES *et al.*, 2011). The silicification processes was suggested to be controlled by the northeastern structures, such as the Loanda–Presidente Epitácio Failure Zone (FERNANDES *et al.*, 1993).

One possible origin of the silicification in the Bauru Basin has been attributed to hydrothermal process (FERNANDES *et al.*, 1993). This interpretation stands on the lack of facies and stratigraphic control of the silicified intervals, and the association with carbonate-rich fluorapatite cementation (FERNANDES *et al.*, 1993). In addition, the occurrence of paligorskite in the underlying basalts were also considered as evidence of hydrothermal activity. The occurrence of analcime in basal sandstones of the Vale do Rio do Peixe Formation in drilling samples from the region of Macedonia, in northwest São Paulo, was reported by Brandt Neto *et al.* (1978). There, the authors associated its origin with a possibly contemporary hydrothermal event to the alkaline magmatism recorded in the vicinity of Jaboticabal (COIMBRA *et al.*, 1981).

3. Material and methods

3.1. Sampling and petrography

Sixteen samples of silicified sandstones were selected from nine sampling areas across the southeastern Bauru Basin (Figure 1). The basic sedimentary description was performed using a 10x magnifying glass, which focused on the characterization of sedimentary structures and cements, matrix, and pores. In addition, this analysis aimed at the selection of samples displaying the highest degree of silicification, that could be evaluated for the study of fluid inclusions.

Petrography was performed in 11 non-polished thin sections (30 μm thick) and nineteen double polished thick sections (90–100 μm thick) made for the analysis of fluid inclusions. Non-polished thin sections were impregnated with blue stained resin for porosity evaluation. All thin and thick sections were manufactured at the Laboratory of Mineral and Rock Analysis (*Laboratório de Análises Mineralógicas*, LAMIR) in the Federal University of Paraná. Petrography was carried out using a polarizing ZEISS Imager.A2m™ microscope under transmitted light. The mineral and textural composition of the cement framework, matrix and porosity were obtained, as well as its visual qualification. The characterization of features and post-sedimentary mineral deposits aimed to establish the diagenetic evolution, with the identification of different compositions and/or generations of cements (HARWOOD, 1988).

3.2. Fluid inclusion analysis

Fluid inclusion analysis included petrography and microthermometry were also conducted at LAMIR facilities. Fluid inclusion petrography were performed using a polarizing ZEISS Imager.A2m™ microscope. Fluid inclusions were described according to its main characteristics (mode of occurrence, number and types of trapped phases, relative proportion of vapor fraction, and host cement), and classified according to its genesis (primary and secondary inclusions; *sensu* (ROEDDER, 1984) and number of Fluid Inclusion Assemblages (FIA; *sensu* GOLDSTEIN; REYNOLDS, 1994a). Since this study aimed at the understanding the genesis of the quartz cementation, both the primary inclusions hosted in the detrital grains and the secondary inclusions were not addressed.

Fluid inclusion microthermometry (GOLDSTEIN; REYNOLDS, 1994b) was carried out in a Linkam THMS600™ heating/freezing stage mounted in a ZEISS Imager.A2m™ microscope. The calibration of the heating/freezing stage was performed using synthetic fluid inclusions of pure H₂O composition (critical density) and H₂O-CO₂ (25% mol). The calibration parameters comprised the melting point of pure CO₂ (-56.6 °C), the triple point of water (0 °C), and the critical point of water (374.5 C). Data of the temperature phase changes (*i.e.*, homogenization temperatures and final ice melting temperatures) were taken at the precision of 0.1 °C using a x50 objective plus ancillary lens of 1.6x and 2.5x. Nevertheless, given the

extreme reduced size of the studied fluid inclusions (<5 μm), first melting of aqueous inclusions could not be observed.

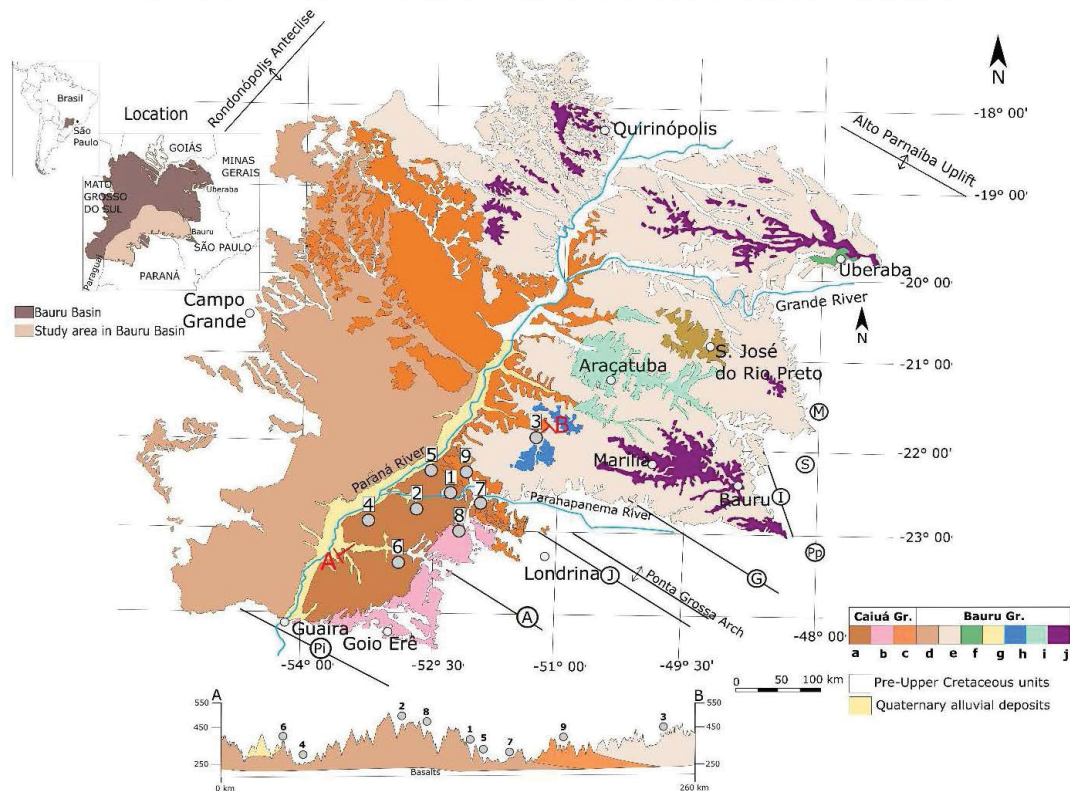
The equivalent salinities of fluid inclusions were calculated using the final ice melting temperature of the $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ system (BODNAR, 1993). In addition, the predicted critical temperature expected for each fluid inclusion have been calculated using the estimated equivalent salinities for the $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ system (KNIGHT; BODNAR, 1989). Fluid inclusion isochores and isopleths were modeled for fluids in the $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ system using the empirical equations of (BODNAR; VITYK, 1994) and (ATKINSON, 2002). The empirical models were implemented in pure Python 3 (PESTILHO, 2020a, 2020b), with the source code available at the GitHub repository (<https://github.com/AndrePestilho/FluidInclusion>).

4. Results

4.1. Facies characterization

The analyzed samples come from different places in the Bauru Basin (Figure 3), with a higher intensity of sandstone silicification.

FIGURE 3 - GEOLOGICAL MAP OF THE BAURU BASIN.

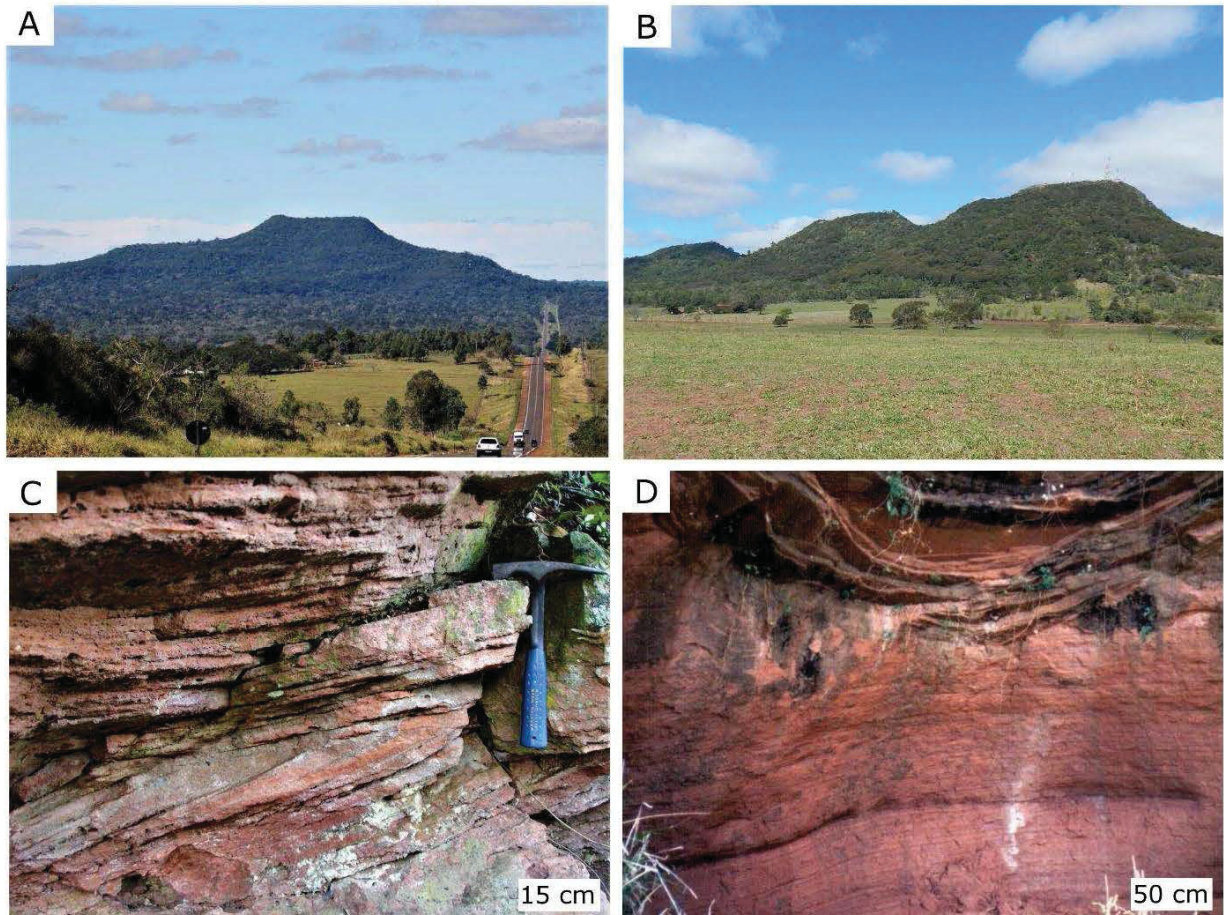


KEY LITHOSTRATIGRAPHY: a. Paraná River Formation b. Goio Erê Formation, c. Santo Anastácio Formation, d. Caiuá undivided Group, e. Vale do Rio do Peixe Formation f. Uberaba Formation, g. São José do Rio Preto Formation, h. Presidente Prudente Formation, i. Aracatuba Formation, j. Marília Formation. **LINEAMENTS:** Rio Piquiri (Pi), Rio Alonzo (A), São Jerônimo-Curiúva (J), Guapiara (G),

Paranapanema (Pb), Ibtíngua-Botucatu (I), Rio Moji Guaçú (M), São Carlos Leme (S), Paraná River (P). Sample locations: 1. Morro do Diabo (SP), 2. Três Morrinhos (Paraná State), 3. Santa Ida Farm (São Paulo State), 4. Porto Rico Farm (Paraná state), 5. Alegria Farm (São Paulo state), 6 Indianapolis (Paraná State), 7. Norte de Mairá (Paraná State), 8. Uniflor (Paraná state) and 9. Floresta Farm (São Paulo State). Modified from Fernandes and Magalhães-Ribeiro (2015).

The samples were selected from places with greater exposure of silicified rocks, such as regional elevations, inselbergs that stand out in the landscape of flat and smooth relief, in general, of wide hills. The main elevations are Morro do Diabo (Figure 4A) and hill on the Santa Ida farm in Sao Paulo, and Tres Morrinhos (Figure 4B) and hill on the Porto Rico farm in Paraná. The hills of Tres Morrinhos extend along the NW direction (for approximately 2 km) and are located on the central axis of the Ponta Grossa Arch, at the intersection of the NE and NW lineament systems. The hills of Fazenda Porto Rico form four ridges aligned in the NE direction, protruding from the flat landscape of the region (FERNANDES *et al.*, 1993). Generally, sandstones with a characteristic color varying between pale red, orange and red, are solid and with medium sized tabular cross-stratifications (Figures 4C and D).

FIGURE 4 - INSELBERGS SUPPORTED BY SILICIFIED SANDSTONES OF THE RIO PARANÁ FORMATION, AND CHARACTERISTIC ASPECT OF THE ROCK.



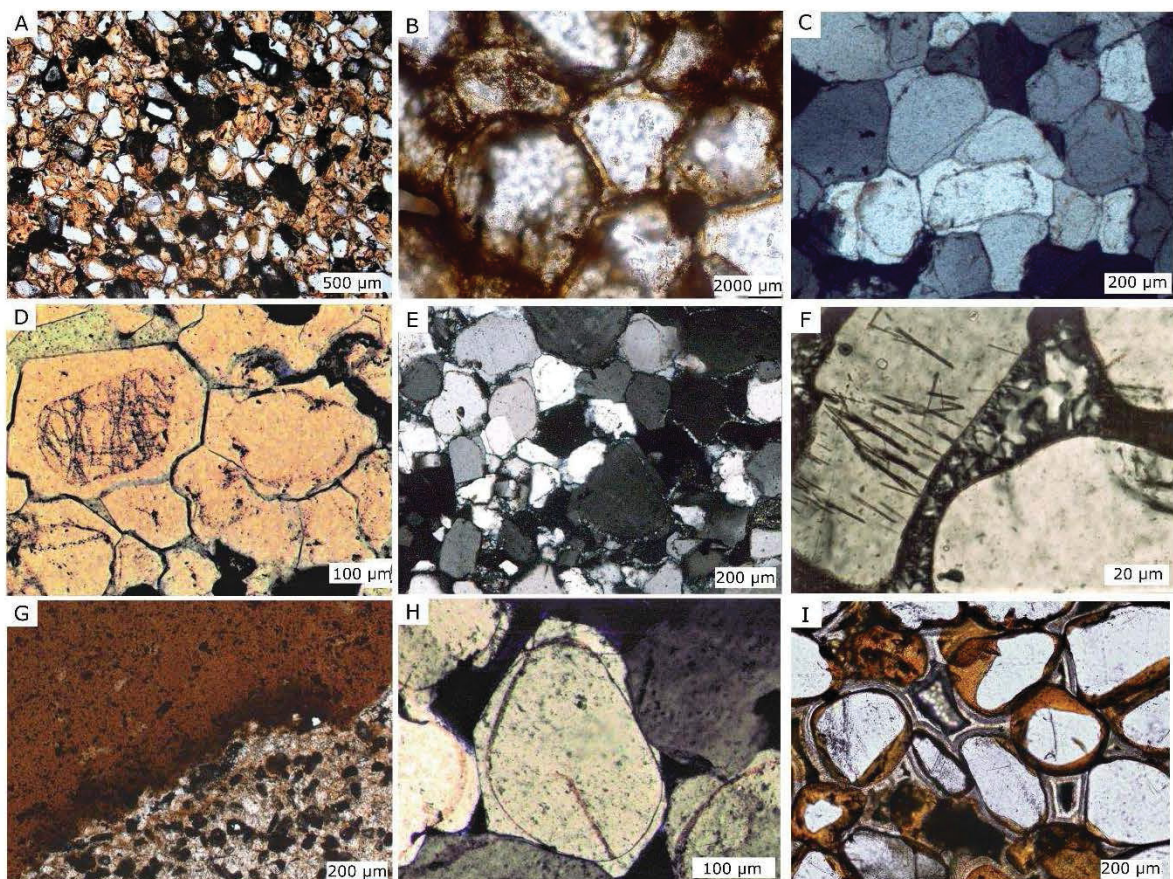
KEY: **A.** Morro do Diabo Hill, São Paulo State; **B.** Três Morrinhos Hill, Paraná State; **C.** Silicified quartzarenite with medium-sized cross-stratification, in section of access road to the top of Morro do Diabo; **D.** Outcrop of silicified quartzarenite with medium-sized tabular cross-stratification, in section of access road to the top of Três Morrinhos Hill. Photos by Luiz A. Fernandes.

In petrography, there are well-selected sandstones, with normal packaging, and a framework supported by grains, representing between 70-80%, composed essentially of quartz, with subhedral and rounded to sub-rounded grains, with opaque minerals (probable magnetite and other indeterminate) subhedral and sub-rounded detritus, present in amounts less than 5% (Figure 5A). Granulation varies from fine to coarse, with a predominance of fine to medium. The grains of the framework are rounded, subspherical to spherical.

In general, the framework was silicified while the grain arrangement was still loose, with cementation between the grains. The cement (15-25%) of the samples is composed of silica that occurs by coating surfaces or totally obliterating the intergranular spaces, as a syntaxial overgrowth texture (Figure 5B) in all samples, polygonal texture partially or totally filling the porous intergranular spaces (Figure 5C

and D) and acicular or palisade fringes (fringe of prismatic microcrystals (Figure 5E and F) and sometimes microcrystalline (Figure 5G), as in the slides of Três Morrinhos (GC107 and GC62), where they are venules formed by microcrystalline silica were found that in a hand sample have sizes up to 4 cm in thickness and 10 cm in length, being distributed at random. The cementing occurs between the grains, with few point contacts between grains ($> 10\%$) representing low mechanical compaction (Figure 5H). Some samples have reliquary secondary growths in the quartz grains, which were later involved by quartz overgrowth (Figure 5H). A characteristic feature of all samples is the presence of Fe and Mn oxide or hydroxide grains in the framework, delimiting the pre-cementation grain contour (Figure 5I).

FIGURE 5 - PETROGRAPHIC CHARACTERISTICS OF THE SILICIFIED SANDSTONES OF THE RIO PARANÁ FORMATION.



Thin sections images, parallel (PP) or crossed (PX) polarizers. **A.** Framework composed of detrital quartz grains, subhedral and rounded to sub-rounded and grains of opaque minerals, euhedral to subhedral, angular to sub-rounded. The framework is surrounded by silica syntaxial cement, with grain coating by Fe and Mn oxides and/or hydroxides (sample PN19; PP); **B.** Rounded quartz grains, with high sphericity, coated initially with iron oxide and later by overgrowth of syntaxial quartz, forming a polygonal texture with a mosaic appearance (sample 3M AB BP; PP); **C.** quartz grains surrounded by siliceous cement with a polygonal mosaic texture, partially or totally filling porous intergranular spaces (sample GC62; PX); **D.** silicified quartzarenite, showing original contours of rounded grains, pre-silicification, with cement in polygonal texture in mosaics (sample GC62; PP); **E.** quartzarenite with sub-rounded, sub-spherical grains, surrounded by silica and microcrystalline syntaxial cement (sample

SA94; PX); F. quartz grains with rutile inclusions, coated with cement in acicular fringes (sample LO60A; PX); G. microcrystalline silica in silicified sandstones, with solid structure and red color due to iron oxide (sample GC62; PP); H. contact between the quartz grains of the framework and secondary growth relic (sample GC62 RP; PX); I. quartz grains surrounded by syntaxial silica cement, coated with Fe and Mn oxides/hydroxides (sample PE18; PP). Photomicrographs by Caroline M. Martin (A, B, G and I) and Luiz A. Fernandes (C, D, E, F and H).

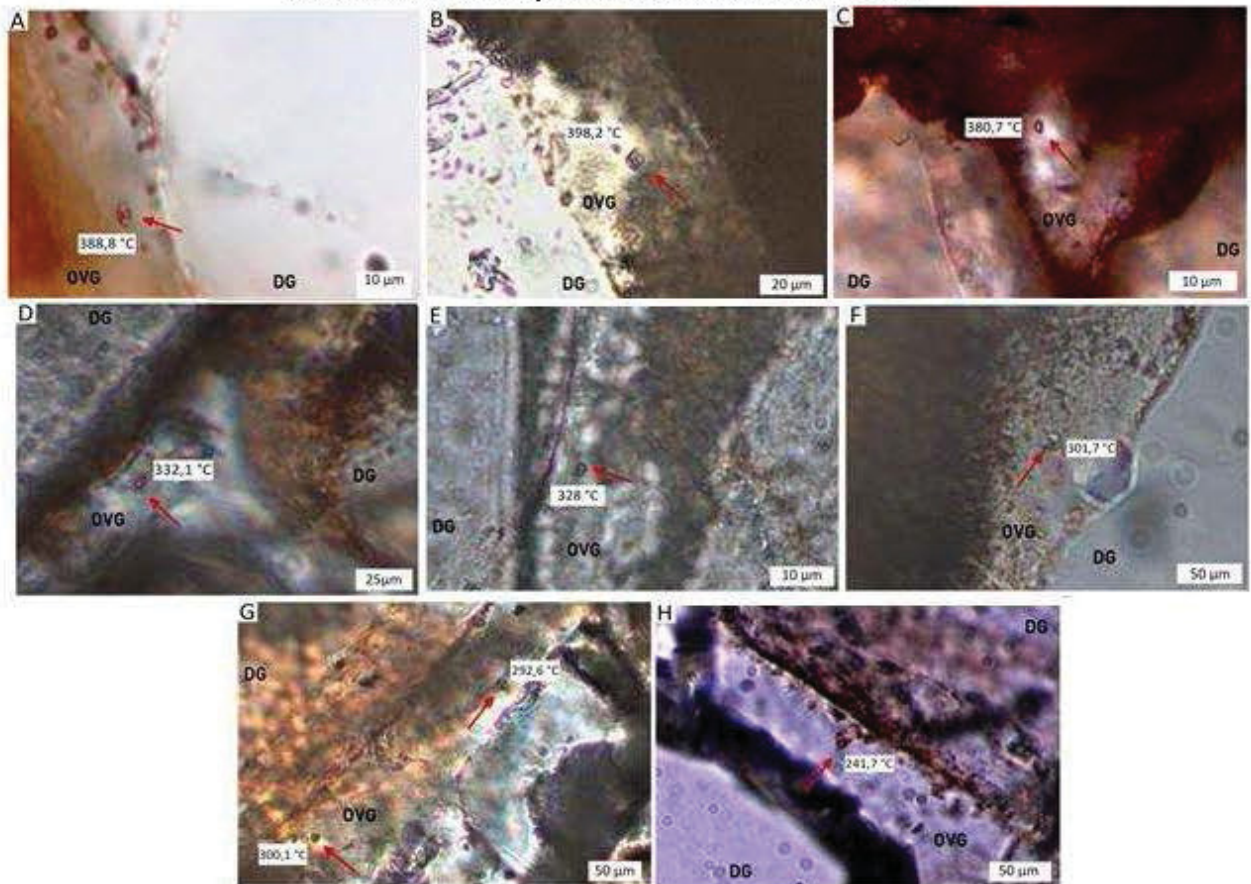
4.2. Fluid Inclusion analysis

4.2.1. Types of Fluid Inclusions

The fluid inclusions analyzed were the primary ones, associated with the fluid responsible for the formation of the quartz cement, after the deposition of the sediments. The inclusions found inside the grains, whether they are of primary or secondary origin, were not analyzed. Such inclusions, of indefinite origin, either do not provide reliable information on the cementation process, or they may even be from the source rock.

The fluid inclusions of the assemblages analyzed are those hosted in syntaxial quartz overgrowths (Figure 6) or contact zone and detrital grains (dust rims). These inclusions are aqueous with a rounded shape, presenting a liquid phase (monophasic), or a liquid and vapor phase (biphasic) at room temperature. In general, the form of occurrence is given by arrangement of inclusions in a concentric and isolated or random way. Most of these inclusions are less than 1 μm in size in the longest length, with some reaching between 2 and $\sim 3 \mu\text{m}$. Inclusions with dimensions less than 2 μm are monophasic or have low vapor fraction, and inclusions with more than 2 μm are biphasic with vapor fraction $<20\%$, based on the visual estimate of the bubble filling area. The primary biphasic inclusions, which were analyzed, have elongated shapes (Figure 6 A and D), or more regular and rounded shapes (Figure 6 B, C, E, F, G and H).

FIGURE 6 - FLUID INCLUSIONS OF THE ASSEMBLAGES ANALYZED, HOSTED IN SYNTAXIAL QUARTZ OVERGROWTHS.



ADDITIONAL EXPLANATION: **A.** biphasic fluid inclusion with an elongated, primary aspect, hosted in the quartz cement of the silicified sandstones of Três Morrinhos (PR); **B.** biphasic fluid inclusion of regular rounded shape, hosted in quartz cement of the silicified sandstones of Morro do Diabo (SP) that cover detrital grains of quartz; **C.** primary, biphasic and rounded fluid inclusion, hosted in the syntaxial cement of silicified sandstones from Porto Rico Farm (PR); **D.** biphasic primary fluid inclusion, with an elongated and rounded aspect hosted in quartz cement, from the Indianapolis (PR) arenites; **E.** Rounded primary fluid inclusion, housed in the quartz cement of the northern sandstone of Meirá (PR); **F.** rounded primary fluid inclusion, housed in the sandstone quartz cement of Floresta Farm (SP); **G.** rounded primary fluid inclusions of the same assembly, in syntaxial cement covering detrital quartz grain from Uniflor sandstone (PR); **H.** biphasic primary fluid inclusion in quartz cement of silicified sandstone from Santa Ida Farm (SP). Key: São Paulo State (SP), Paraná State (PR). Photomicrographs by Caroline M. Martin.

4.2.2. Geothermometry

Microthermometric analyzes were performed on all inclusions that belongs to assemblages considered relevant for the study. These assemblages are of primary fluid inclusions present in the silicified sandstone cements of the Bauru Basin, coating the detrital grains of quartz. Due to the small size of the inclusions found, the analyzes were made only in biphasic inclusions (L-V), as they are more easily

identifiable as fluid inclusions. Also due to the size of the inclusions, it was not possible to observe all phase changes, such as the first merger. Thus, only the melting and final homogenization temperatures were analyzed, and the salinity and density were calculated (Table 1).

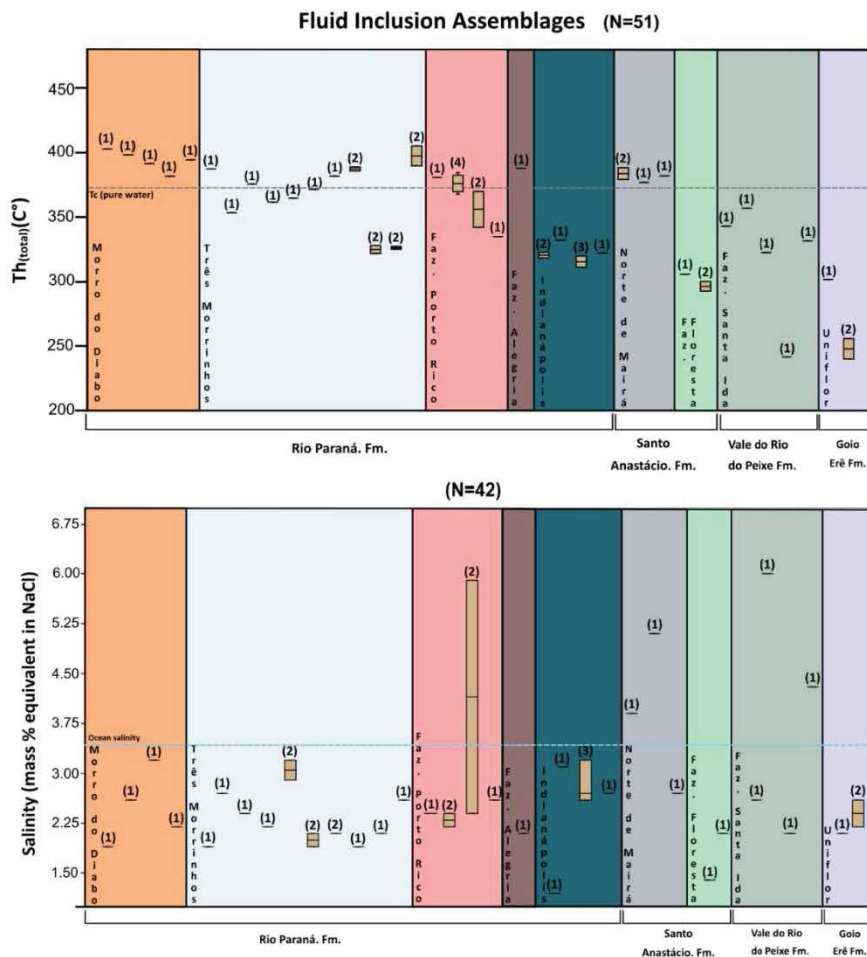
TABLE 1 - SUMMARY OF THE RESULTS OBTAINED FROM THE MICROTHERMOMETRIC ANALYZES PERFORMED AND SALINITY CALCULATIONS.

Formation	Location	Sample	Thin Section	F.I.	Th (°C)	Tm Ice (°C)	Salinity (mass % equivalent in NaCl)	Assemblages	Density at 20°C (g/cc)				
Rio Paraná	Morro do Diabo (SP)	SA94A	SA94A	a	402.7	-1.1	1.9	a	1.01181				
				b	398.2	-1.5	2.6	b	1.016581				
		SA94B	SA94B	a	391.4	-1.9	3.2	a	1.021267				
	b			381.6			b						
	Três Morrinhos (PR)	GC62	GC 62	GC 62 1	a	394.3	-1.3	2.2	c	1.014207			
					a	387.3	-1.1	1.9	a	1.01181			
					a	353.4	-1.6	2.7	a	1.017761			
					b	375.6	-1.4	2.4	b	1.015397			
					c	361.5	-1.3	2.2	c	1.014207			
					GC 62 A	a	328	-1.1	1.9	a	1.01181		
						b	321.8	-1.2	2.1		1.013011		
						c	327.2	-1.2	2.1	b	1.013011		
						d	325.1	-1.2	2.1		1.013011		
					GC62A	a	405.8	-1.5	2.6	a	1.016581		
						b	389.6						
					3M 26.5.17 A	3M-AB	3M-AB	a	381.7			a	
								b	385.7	-1.7	2.9	b	1.018935
								c	388.8	-1.9	3.2		1.021267
	Três Morrinhos (morro do meio)	GC 107A	GC 107A	a	364.7	-1.5	2.6	a	1.016581				
				b	371.4	-1.2	2.1	b	1.013011				
	Fazenda Porto Rico (PR)	LO60A	LO60A	a	380.7	-1.4	2.4	a	1.015397				
				b	376.3			b					
				c	384.4	-1.3	2.2		1.014207				
d				367.8	-1.4	2.4		1.015397					
e				375.5									
f				342.1	-3.6	5.9	c	1.040291					
g				369.8	-1.4	2.4		1.015397					
h				334.9	-1.5	2.6	d	1.016581					
F. Alegria (SP)	PE18	PE18	a	387.9	-1.2	2.1	a	1.013011					
Indianópolis (PR)	PN19 A	PN19 A	a	322.6			a						
			b	318.3	-0.7	1.2		1.006949					
			c	332.1	-1.8	3.1	b	1.020103					
			a	319.8	-1.5	2.6	a	1.016581					
			b	315.4	-1.6	2.7		1.017761					
PN19 F	PN19 F	a	311.3	-1.9	3.2		1.021267						
		c	322.1	-1.6	2.7	b	1.017761						
Santo Anastácio	Norte de Mairá (PR)	IP148	IP148	a	379.1	-2.3	3.9	a	1.025871				
				b	388.2								
				c	376.8	-3.1	5.1	b	1.034841				
				d	381.9	-1.6	2.7	c	1.017761				
	Fazenda da Floresta (SP)	RA105	RA105A	a	305.7	-0.8	1.4	a	1.008173				
				b	300.1	-1.2	2.1	b	1.013011				
				c	292.6								
Vale do Rio do Peixe	Fazenda Santa Ida (SP)	RP27 E	RP27 E	a	342.9	-1.5	2.6	a	1.016581				
				b	356.8	-3.7	6.0	b	1.041367				
				a	322.4			a					
				b	241.7	-1.2	2.1	b	1.013011				
RP27 G	RP27 G	c	331.6	-2.6	4.3	c	1.029271						
Goio Erê	Uniflor (PR)	NE47 A	NE47 A	a	301.7	-1.2	2.1	a	1.013011				
				b	255.9	-1.5	2.6	b	1.016581				
				c	240.1	-1.3	2.2		1.014207				

KEY: Fluid inclusion (F.I.), Homogenization temperature (Th), Ice melting temperature (Tm ICE).

Analyzing the results obtained, the fluid inclusions were separated into assemblages through the petrography of inclusions. An assembly of fluid inclusions (FIA) is defined as the most finely discriminated petrographically associated group of inclusions (GOLDSTEIN; REYNOLDS, 1994a). Each FIA is defined based on a petrographic association in which all the inclusion vacuoles represent the best possible temporal resolution regarding the initial closing time of the inclusion (GOLDSTEIN, 2003). Two key points in this definition are 1) an FIA is petrographically distinguishable, and 2) all inclusions in an FIA are synchronous. All inclusions in an FIA trap a fluid of similar composition at approximately the same temperature and pressure (BODNAR, 2003), in the case of a homogeneous parent fluid. Each identified assembly has inclusions found in the same cement crystal that lines the silicified sandstone framework (Figure 7).

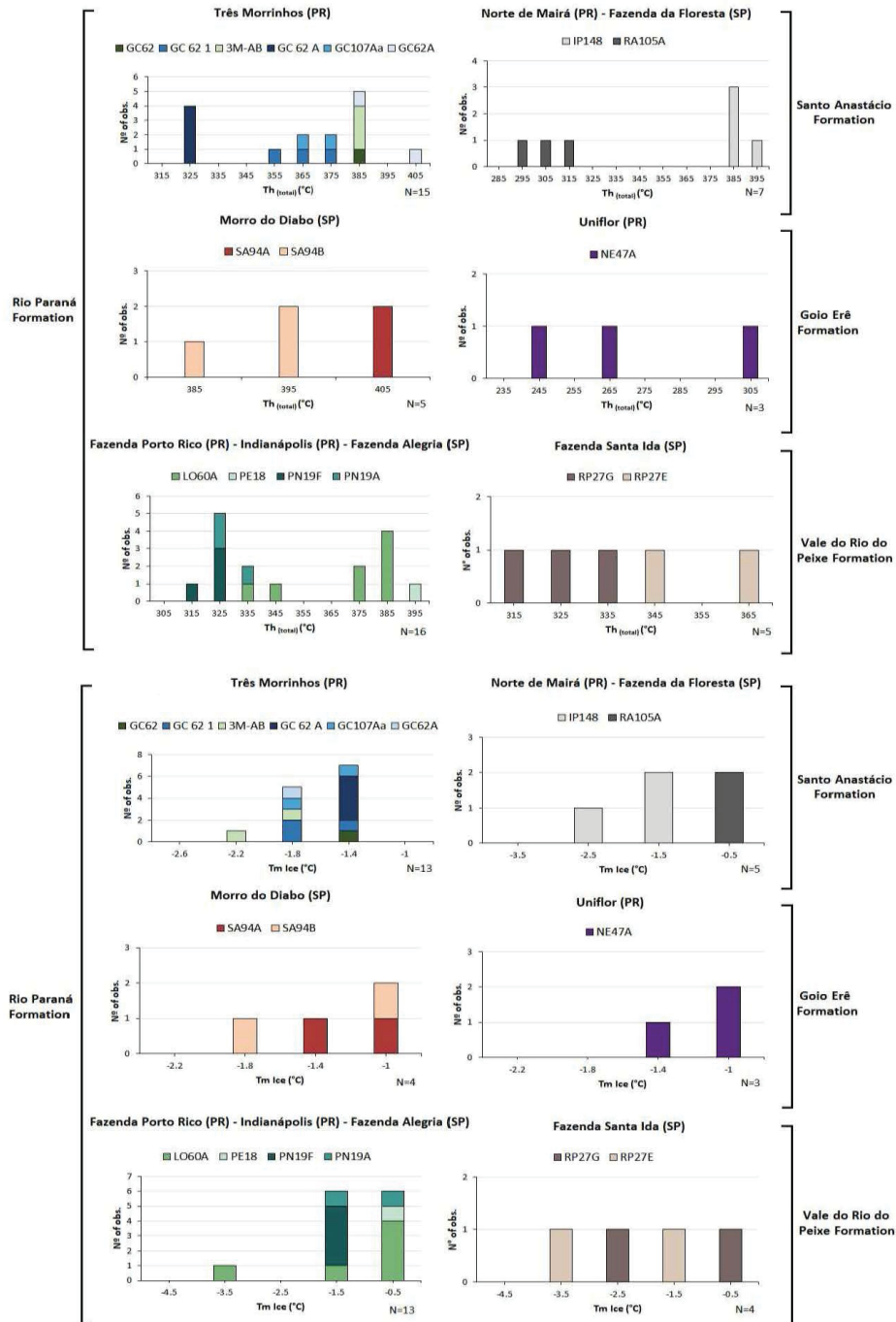
FIGURE 7 - HOMOGENIZATION TEMPERATURE AND SALINITY OF DIFFERENT ASSEMBLAGES OF FLUID INCLUSIONS IDENTIFIED PETROGRAPHICALLY, REPRESENTED IN BOXPLOTS. EACH COLUMN REPRESENTS A DIFFERENT ASSEMBLAGE.



Low temperature measurements - Final ice melting (T_{fg}) and high temperature measurements - Homogenization temperature (T_h)

The melting temperature values of ice (T_{m Ice}) (Figure 8) vary from -3.7 to -0.7 ° C. The values of final homogenization temperature (T_h) (Figure 8) vary from 240.1 to 405.8 ° C.

FIGURE 8 - HOMOGENIZATION TEMPERATURES (T_h) AND ICE MELTING TEMPERATURES (T_{m Ice}) OF THE PRIMARY FLUID INCLUSIONS FOUND IN THE CEMENT OF SILICIFIED SANDSTONES.



4.2.3. Paleosalinities

Salinity values (Figure 9) vary between 1,2 to 6% ms. Eq. NaCl.

FIGURE 9 - SALINITIES OF THE PRIMARY INCLUSIONS OF SILICIFIED SANDSTONES OF THE BAURU BASIN. SCATTER PLOT OF SALINITY X Th POINTS CALCULATED FOR THE TOTAL OF 42 Tm Ice RESULTS.

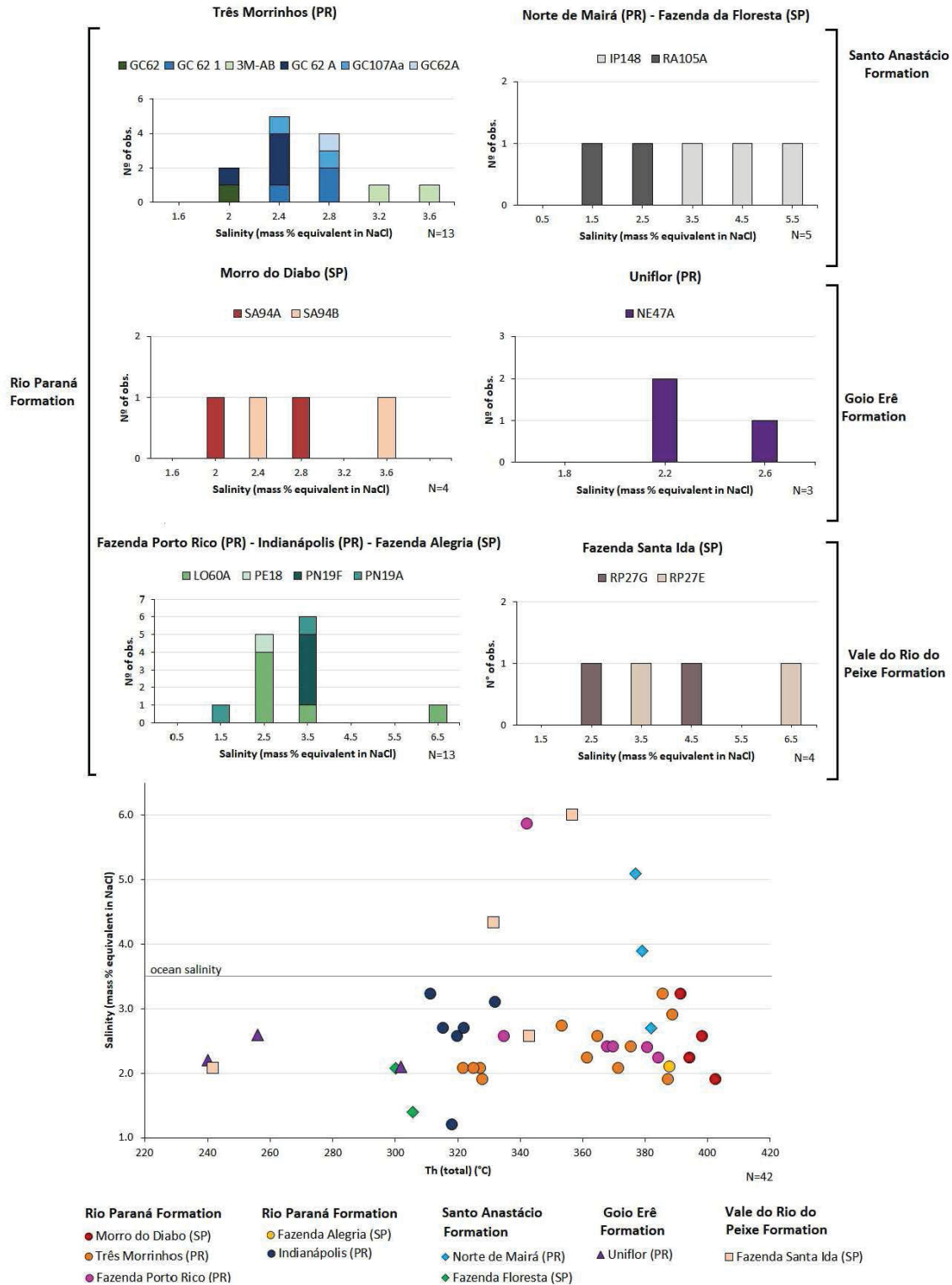
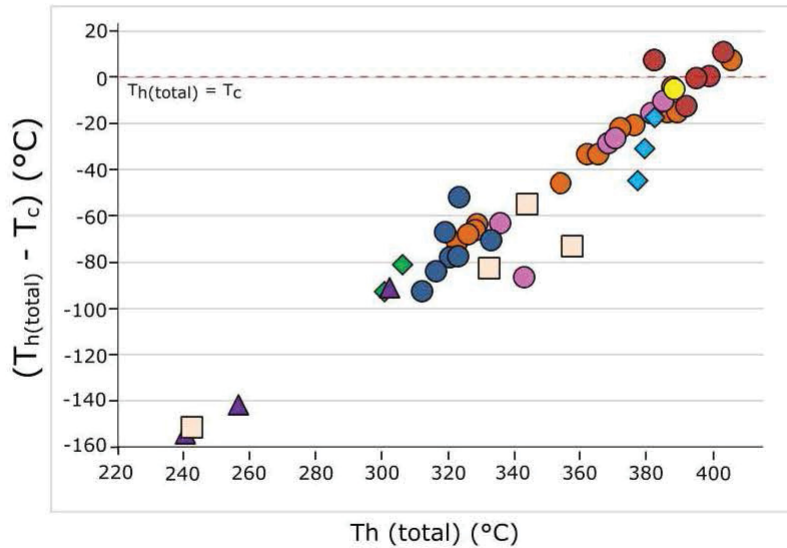
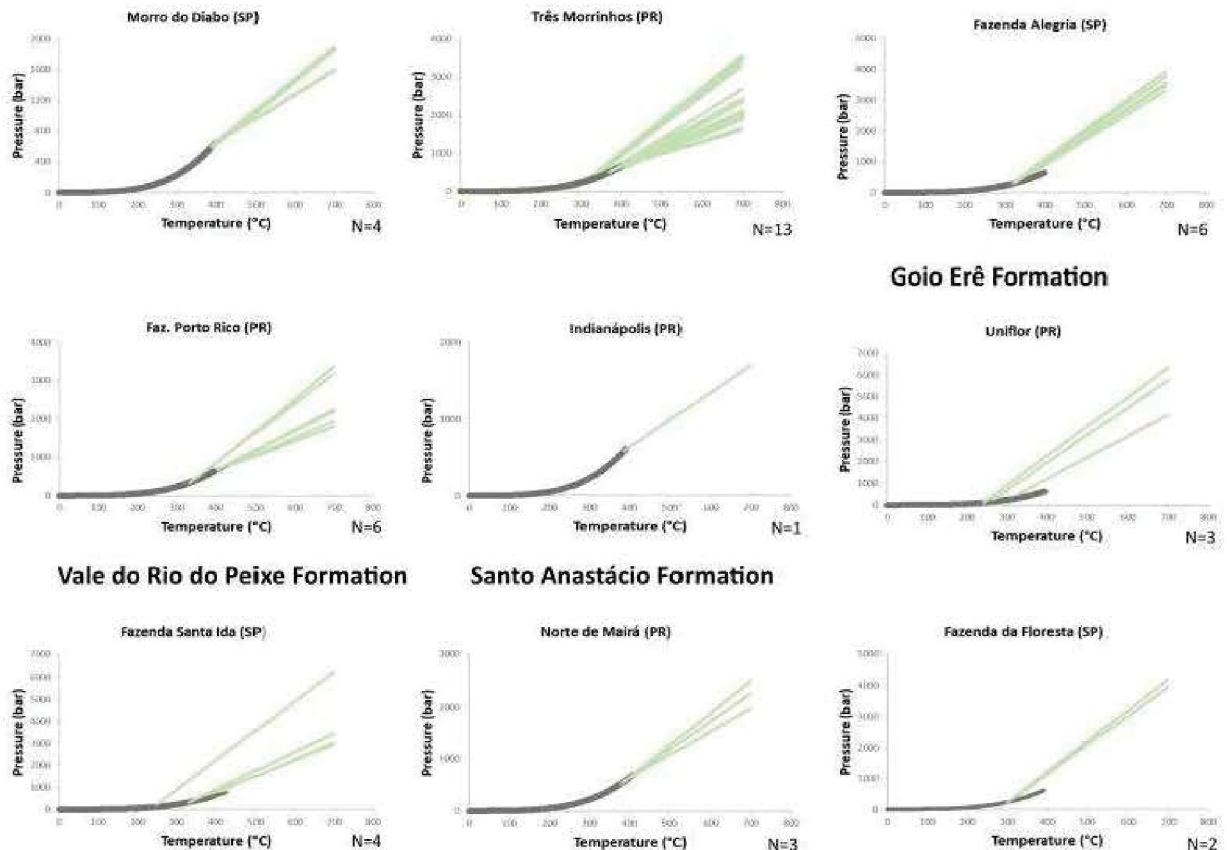


FIGURE 10 - CRITICAL TEMPERATURE RELATED TO HOMOGENIZATION TEMPERATURES. CRITICAL POINT OF PURE WATER AT 373.946 °C (WAGNER; PRUß, 2002).



4.2.4. Isochores

The density of inclusions was calculated based on the composition, using a pre-defined, simplified, binary H₂O NaCl system (BODNAR, 1993). The equation of state aqueous system used to calculate this value is from Archer (1992) NaCl, and it was used in the Bulk program.

FIGURE 11 - ISOCHORES AND ISOPLETHS OF THE STUDIED AREAS.**Rio Paraná Formation****Discussion****1. Hydrothermal fluids and silicification**

The microthermometric analyzes of the studied fluid inclusions provided the homogenization temperature and ice melting temperature of the fluids that originated the silica diagenetic cements present in different locations in the Bauru Basin. With this information, it was possible to calculate the salinity, density, and minimum pressure of homogenization of these fluids (Table 1).

In the studied area silicification was formed by fluids with homogenization temperatures between 240.1 and 405.8 °C salinity between 1.2 and 6.0 (wt.% NaCl equiv.) with minimum trapping pressure between 150 and 400 bar.

There is a variation of these parameters that reach the conditions of a super-critical fluid found in some analyzes of Morro do Diabo, Três Morrinhos, Porto Rico

Farm, Alegria Farm and Norte de Mairá (Figure 10) with temperatures between 380.1 and 405.8 °C. The calculated pressure for the fluids suggests that the sandstones were silicified under conditions of overpressure, given the low degree of burial in the basin and the minimum pressures estimated for this environment.

The measured homogenization temperatures that indicate the minimum fluid trapping temperature are not generally found in a shallow diagenetic environment, such as that of the Bauru Basin. Simple aqueous inclusions trapped at the highest temperatures in diagenetic environments would reflect homogenization temperatures below 220° C (GOLDSTEIN; REYNOLDS, 1994a).

Salinity shows low values, equivalent to brackish waters (0.05 - 3 wt.% NaCl equiv.), which can have different origins, such as sea water that has been modified through evaporation or meteoric dilution (GOLDSTEIN, 2001) or the more applicable case to the environment of the basin which has no marine influence, where water of meteoric origin has infiltrated and percolated through the porosity of the rocks, reaching a higher temperature and pressure, enabling the remobilization of the silica of the surrounding rocks. However, it is not possible to say the origin of the quartz present in the sandstone cements without a detailed geochemical study. This salinity possibly reflects the origin of recharge areas, as there is no signature of a fluid that suggests a magmatic origin, mainly due to low salinity values.

The salinity and temperature of the fluids trapped in the inclusions, when compared to the different types of fluids present in the crust, indicate that the fluids trapped in the silicified sandstones of the Bauru Basin analyzed are like fluids from Geothermal and Metamorphic sources, comparing the solution distributions from different origins by Bodnar (1999). Geothermal hydrothermal systems are composed of a heat source trapped by an insulating rock and a fluid in general of meteoric origin that transports heat to the surface, while metamorphic fluids are fluids formed during dehydration and devolatilization reactions during progressive metamorphism in the formation of metamorphic rocks (TOURET, 2001).

A causative agent of the high temperatures found could be a hydrothermal fluid. Hydrothermal fluids are essentially heated water, generated naturally below the surface. A fluid phase and heating source are required to generate the hydrothermal fluid. This fluid phase can derive from different sources such as magmatic, juvenile,

metamorphic reactions, meteoric, connate or sea water, where the heating can be obtained from a magmatic system, geothermal gradient, radiogenic decay, or metamorphic reactions (HUTCHISON, 1983).

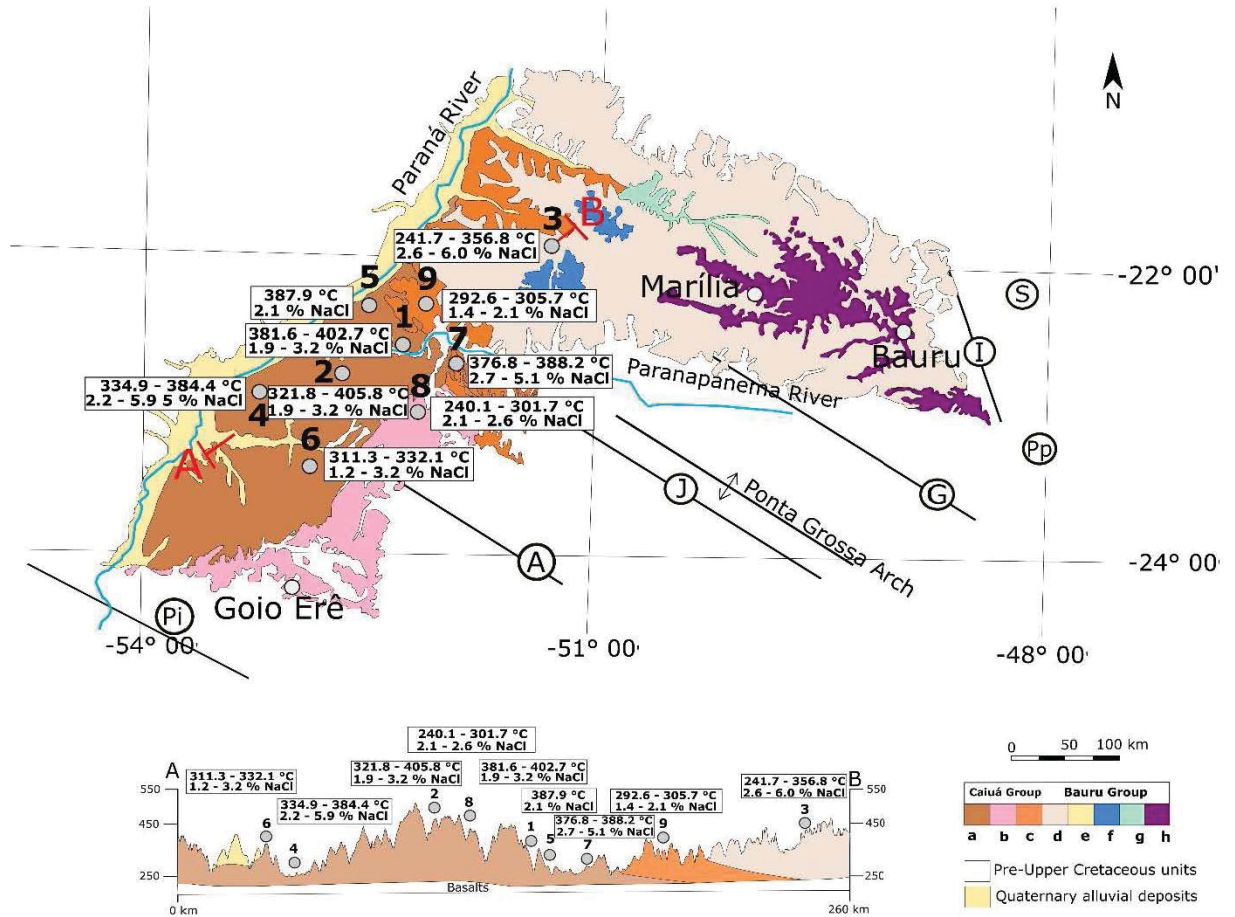
Silicification caused by hydrothermal processes is found, for example, in Irish-type deposits, with homogenization temperature ranging between 80–150 °C and salinity between 20–25 (wt.% NaCl equiv.) And Mississippi Valley-type deposits. type, with homogenization temperatures ranging between 50–180 °C and salinity between 15–30 (wt.% NaCl equiv.; WILKINSON, 2001) and geothermal fluids with temperatures between 220 and 350 °C and salinity between 0 ~ 40 (wt.% NaCl equiv., BODNAR, 1999).

Given the regional geological context and the models, the data in this study suggest that the sandstones were silicified through hydrothermal fluids, in a geothermal environment.

1.1. The Bauru hydrothermal system and the Ponta Grossa Arch

Since the fluid originating from the siliceous cements of the studied sandstones of the Bauru Basin is considered hydrothermal, of geothermal origin, an interpretation can be inferred about its relationship with the regional structural context. The main structure located near the region of the analyzed samples is the Ponta Grossa Arch, which has some contemporary reactivation periods and after the deposition of the studied sandstones, which formed between the Coniacian and the Maastrichtian (Figure 12).

FIGURE 12 - LOCATION OF THE SITES OF SILICIFIED SANDSTONES AND THEIR RESPECTIVE MEASUREMENTS OF HOMOGENIZATION TEMPERATURES RESULTING FROM MICROTHERMOMETRIC ANALYZES AND SALINITY.



The evolution of the Ponta Grossa Arch is related to the various reactivation events of the South American Platform in southeastern Brazil from the Lower Cretaceous. A period of exhumation that occurred during and after the deposition of the Bauru supersequence was the tectonic event related to a regional uplift that resulted in the elevation and erosion of the edges of the South American Platform basins, especially the Paraná Basin (Late Cretaceous – Early Paleocene). This event is also associated with the generator tectonism in the basins of the Continental Rift Southeast of Brazil, in the central segment. A record of the most recent reactivation of the NW fault zones, in particular the São Jeronimo-Curiúva Failure Zone (Oligocene-Miocene with apatite fission traits ages between 26 ± 3 Ma and 14 ± 2 Ma), associated with the rearrangement of the stress field, and consequent erosion of the rock portions, which marks the beginning of sedimentation in the southern

segment of the Continental Southeast Rift of Brazil, composed of the Curitiba Basin, Guaraqueçaba, Sete Barras and Cananeia grabens; and the Pariquera Açu and Alexandra formations (MAGALHÃES, 2009).

As can be seen in figure 12, the highest homogenization temperatures are found in the extension of the Ponta Grossa Arch, which may indicate a relationship with the large-scale tectonic reactivations mentioned above. A feature suggestive of the association between tectonic activity and silicification was observed at the top of Morro dos Tres Morrinhos (PR), where there is a subvertical strip of NNE direction, 0.7 m thick and a siliceous, breccoid aspect, such as the adjacent sandstone (FERNANDES *et al.*, 1993). Some faults with small vertical displacement were found in places where the sandstone occurs silicified, at the base of Morro do Diabo, in São Paulo. However, such events could not explain the high temperatures observed, suggesting a new anomalous thermal event, which may be related to a reactivation of the arc in age in the Lower Paleogene.

Conclusions

With the results of the microthermometric analyzes carried out on the diagenetic cements of the silicified sandstones of the Bauru Basin, remarkably high homogenization temperatures were obtained in relation to the basin's formation environment, higher pressure than expected for the maximum burial of the basin. Salinity shows low values, equivalent to brackish waters (0.05 - 3 wt.% NaCl equiv.), which is formed by the mixture of fresh water and saline water, from different origins. The salinity and temperature of the fluids trapped in the inclusions, when compared to the different types of fluids present in the crust, indicate that the fluids trapped in the silicified sandstones of the Bauru Basin analyzed are like the fluids from Geothermal and Metamorphic sources (TOURET, 2001). A causative agent of the high temperatures found could be hydrothermal fluids from deep sources reaching porous sandstones from the Bauru and Caiuá groups promoting an expressive silicification under abnormal pressure conditions.

The geothermal origin of the fluid indicates one link with to the regional structural context of the basin substrate. The Ponta Grossa Arch, which has records of

reactivation periods after the deposition of sandstones, has its axis and associated regional structures, forming bands where the main silicification occurrences are concentrated. The high cementation temperatures found suggest thermal events of basin scale reach during the Late Cretaceous, eventually also related to reactivations of the arc in the Cenozoic.

References

- ATKINSON JR., A. B. **A model for the PTX properties of H₂O-NaCl**. 126 p. *Dissertação (Master of Science)* - Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2002.
- BODNAR, R. J. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 57, n. 3, p. 683-684, 1993. DOI: 10.1016/0016-7037(93)90378-A
- BODNAR, R. J. Hydrothermal Solutions, *In*: MARSHALL, C. P.; FAIRBRIDGE, R. W. (Ed.). **Encyclopedia of Geochemistry**. Lancaster: Kluwer Academic Publishers, p. 333-337. 1999.
- BODNAR, R. J. Reequilibration of fluid inclusions. *In*: SAMSON, I.; ANDERSON, A.; MARSHALL, D. (Ed.), **Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation**. Mineral. Assoc. Canada, Short Course, 32. 2003. p. 213–230.
- BODNAR, R.J.; VITYK, M. O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. *In*: DE VIVO, B.; FREZZOTTI, M. L. (Ed.), **Fluid Inclusions in Minerals, Methods and Applications**. Blackburg: Virginia Tech, 1994. p. 117–130.
- FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. O Grupo Caiuá (Ks): revisão estratigráfica e contexto deposicional. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, p. 164–176, 1994. DOI: 10.25249/0375-7536.1994164176
- FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. A Bacia Bauru (Cretáceo Superior, Brasil). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 68, p. 195–205, 1996.
- FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M.; BRANDT NETO, M. Silicificação hidrotermal neocretácea na Porção Meridional da Bacia Bauru. **Revista do Instituto Geológico**, v. 14, p. 19–26, 1993. DOI: 10.5935/0100-929x.19930007
- FERNANDES, L. A.; MAGALHÃES-RIBEIRO, C. M. Evolution and palaeoenvironment of the Bauru Basin (Upper Cretaceous, Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, v. 61, p. 71–90, 2015. DOI: 10.1016/j.jsames.2014.11.007

FERNANDES, L. A.; BASILICI, G.; CASTRO, A. B. Seimites in continental sand sea deposits of the Late Cretaceous Caiuá Desert, Bauru Basin, Brazil. **Sedimentary Geology**, v. 199, p. 51-64. 2007. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2005.12.030.

GOLDSTEIN, R. H. Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic systems. **Lithos**, v. 55, n. 1, p. 159-193, 2001.

GOLDSTEIN, R. H. Petrographic analysis of fluid inclusions. *In*: SAMSON, I.; ANDERSON, A.; MARSHALL, D. (Ed.). **Fluid inclusions: Analysis and interpretation**. Mineral. Assoc. Canada, Short Course 32, p. 9-53, 2003.

GOLDSTEIN, R. H.; REYNOLDS, T. J. Fluid Inclusion Petrography. *In*: GOLDSTEIN, R. H.; REYNOLDS, T. J. **Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals**. p. 69–85, 1994a. DOI: 10.2110/scn.94.31.0069

GOLDSTEIN, R. H.; REYNOLDS, T. J. Fluid Inclusion Microthermometry. *In*: GOLDSTEIN, R. H.; REYNOLDS, T. J. (Ed.), **Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals**. Tulsa: Society for Sedimentary Geology, SEPM Short Courses, 31, 1994b. p. 87–121.

GOMES, C. B.; RUBERTI, E.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; AZZONE, R. G. Alkaline magmatism in the Ponta Grossa Arch, SE Brazil: a review. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 32, p. 152–168, 2011. DOI: 10.1016/j.jsames.2011.05.003

HARWOOD, G. Microscopic techniques: II. Principles of sedimentary petrography. *In*: TUCKER, M. E. (Ed.), **Techniques in Sedimentology**. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1988. p. 108–173.

HEASLER, H. P.; JAWOROWSKI, C.; FOLEY, D. Geothermal systems and monitoring hydrothermal features. *In*: YOUNG, R.; NORBY, L. (Ed.), **Geological Monitoring**. Boulder: The Geological Society of America, 2009. p. 105–140. DOI: 10.1130/2009.monitoring(05)

KNIGHT, C. L.; BODNAR, R. J. Synthetic fluid inclusions: IX. Critical PVTX properties of NaCl-H₂O solutions. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 53, p. 3–8, 1989. DOI: 10.1016/0016-7037(89)90267-6

LICHT, O. A. B. A revised chemo-chrono-stratigraphic 4-D model for the extrusive rocks of the Paraná Igneous Province. **Journal of Volcanology and Geothermal Research** 355, 32–54, 2018. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2016.12.003

MENEGAZZO, M. C.; CATUNEANU, O.; CHANG, H. K. The South American retroarc foreland system: The development of the Bauru Basin in the back-bulge province. **Marine and Petroleum Geology**, v. 73, p. 131–156, 2016. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2016.02.027

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.

NEUENDORF, K. K. E.; MEHL JR., J. P. JACKSON, J. A. (Ed.), **Glossary of Geology**, 5 ed. Alexandria: The American Geosciences Institute. 2011.

NIELSEN, M. T.; OLIVARIUS, M.; WEIBEL, R.; MATHIELSEN, A.; BONNELL, L.; NIELSEN, L. H. Geothermal reservoir quality prediction from diagenesis modelling. *In*: EUROPEAN GEOTHERMAL CONGRESS, 2019, Den Haag. p. 1-9.

PESTILHO, A. L. S. A command-line program written in Python 3 that calculates fluid inclusion isopleth for a fluid inclusion in the system NaCl-H₂O. 2020a. [Source code: <https://github.com/AndrePestilho/FluidInclusion/blob/master/isopleth.py>]. DOI: 10.13140/RG.2.2.16788.32641

PESTILHO, A. L. S. A. A command-line program written in Python 3 that calculates fluid inclusion isochores for a fluid inclusion in the system NaCl-H₂O, 2020b. [Source code: <https://github.com/AndrePestilho/FluidInclusion/blob/master/isochores.py>]. DOI: 10.13140/RG.2.2.36763.69925

PIRAJNO, F. Subaerial hot springs and near-surface hydrothermal mineral systems past and present, and possible extraterrestrial analogues. **Geoscience Frontiers**, v. 11, p. 1549–1569, 2020. DOI: 10.1016/j.gsf.2020.04.001

PROCESI, M.; CIOTOLI, G.; MAZZINI, A.; ETIOPE, G. Sediment-hosted geothermal systems: Review and first global mapping. **Earth-Science Reviews**, v. 192, p. 529–544, 2019. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.03.020

ROEDDER, E. **Fluid Inclusions**. Reviews in Mineralogy, v. 12, 1 ed. Blacksburg: Mineralogical Society of America, 1984.

WILKINSON, J. J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. **Lithos**, v. 55, n. 1, p. 229-272. 2001. DOI: 10.1016/S0024-4937(00)00047-5

5. CONCLUSÕES

Análises microtermométricas de inclusões fluidas em cimentos diagenéticos de arenitos silicificados da Bacia de Bauru registraram temperaturas de homogeneização muito elevadas para seu contexto deposicional, assim como de pressões, superiores às esperadas para grau de soterramento da bacia.

A salinidade dos fluidos apresentou valores baixos, equivalentes aos de águas salobras (0,05 - 3 wt.% NaCl equiv.). Tais resultados indicam que foram possivelmente formados pela mistura de água doce (pluvial) e água salina (freática).

Tais características são coerentes com o contexto deposicional deste setor da bacia, de interior de um grande deserto arenoso, quente e seco.

Por outro lado, quando comparados com diferentes tipos de fluidos encontrados na crosta terrestre, a salinidade e a temperatura dos fluidos aprisionados nos arenitos silicificados da Bacia de Bauru indicam similaridade com os de fontes geotermiais e metamórficas, indicando gênese associada a eventos hidrotermais.

A origem hidrotermal do fluido pode também ser vinculada ao contexto estrutural do substrato da bacia, assim como com os registros de magmatismo alcalino contemporâneo à sedimentação. No substrato da bacia são reconhecidas três direções estruturais regionais importantes, associadas a zonas de falha: NW, NE e E-W. O Arco de Ponta Grossa (NW), que tem registros de períodos de reativação posteriores à deposição dos arenitos, tem seu eixo e estruturas regionais associadas, formando faixas onde se concentram as principais ocorrências de silicificação. Além da distribuição peculiar das rochas silicificadas, tal origem relacionada a altas temperaturas e pressões de formação medidas nesta pesquisa, é corroborada pela ocorrência de bolsões de aspecto brechóide de matriz rica em palygorskita em basaltos sotopostos – em zonas de falhas-, assim como de cimentação por carbonato-fluorapatita em arenitos da Formação Rio Paraná.

As altas temperaturas de cimentação encontradas sugerem gênese relacionada a eventos hidrotermais de escala bacial, associados a dois períodos de maior intensidade de eventos intrusivos alcalinos nas bordas da bacia (87-80 Ma e 70-60 Ma), eventualmente também relacionados a reativações cenozoicas. Fluidos hidrotermais relacionados ao magmatismo penecontemporâneo à sedimentação, percolaram e cimentaram localizadamente, embora controlados por estruturas tectônicas regionais, depósitos arenosos do deserto, durante ou após o final da sedimentação na Bacia Bauru.

6. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Boletim do Instituto Geográfico e Geológico**, São Paulo, v. 41, p. 169-263, 1964.

ALMEIDA, F. F. M. System of continental rifts bordering Santos Basin, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 48, p. 15-26, 1976.

ALMEIDA, F. F. M.; MELO, M. S.; PONÇANO, W. L.; DANTAS, A. S. L.; BISTRICHI, C. A. Bacia do Paraná e o vulcanismo mesozóico. *In*: BISTRICHI, C. A.; CARNEIRO, C. D. R.; DANTAS, A. S. L.; PONÇANO, W. L.; CAMPANHA, G. A. C.; NAGATA, N.; ALMEIDA, M. A.; STEIN, D. P.; MELO, M. S.; CREMONINI, O. A. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:500.000. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A. 1981. Publicação IPT n. 1184, p. 46-69.

ASSUMPÇÃO, M.; FENG, M.; TASSARA, A.; JULIÀ, J. Models of crustal thickness for South America from seismic refraction, receiver functions and surface wave tomography. *Tectonophysics*, v. 609, p. 82-96, 2013. DOI: 10.1016/j.tecto.2012.11.014

ATKINSON JR., A. B. **A model for the PTX properties of H₂O-NaCl**. 126 p. Dissertação (*Master of Science*) - Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2002.

BRANDT NETO, M.; PETRI, S.; COIMBRA, A. M. Considerações sobre a estratigrafia e ambiente de sedimentação da Formação Bauru. *In* CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. **Anais...** Recife, Sociedade Brasileira de Geologia. 1978. p. 557-566.

BODNAR, R. J. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 57, n. 3, p. 683-684, 1993. DOI: 10.1016/0016-7037(93)90378-A

BODNAR, R. J. Hydrothermal Solutions, *In*: MARSHALL, C. P.; FAIRBRIDGE, R. W. (Ed.). **Encyclopedia of Geochemistry**. Lancaster: Kluwer Academic Publishers, p. 333-337. 1999.

BODNAR, R. J. Reequilibration of fluid inclusions. *In*: SAMSON, I.; ANDERSON, A.; MARSHALL, D. (Ed.), **Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation**. Mineral. Assoc. Canada, Short Course, 32. 2003. p. 213-230.

COIMBRA, A. M. **Sistematização crítica da obra**. 1991. 54 p. Tese de Livre-Docência - Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo. 1991.

COIMBRA, A. M.; FERNANDES, L. A.; HACHIRO, J. Sismitos do Grupo Caiuá (Bacia Bauru, Ks) no Pontal do Paranapanema (SP). *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., 1992, São Paulo. **Boletim de Resumos Expandidos...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1992. p. 271-275.

COIMBRA, A. M.; COUTINHO, J. M. V.; BRANDT NETO, M.; ROCHA, G. A. Lavas fonolíticas associadas ao Grupo Bauru no Estado de São Paulo. *In*: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3., 1981, Curitiba. **Atas...** Curitiba, Sociedade Brasileira de Geologia/Núcleo SP, 1991. v. 1, p. 324-327.

COIMBRA, A. M.; COUTINHO, J. M. V.; FERNANDES, L. A.; BRANDT NETO, M. Vertebrate Taphonomy in Bauru Basin (Upper Cretaceous, Brazil). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 69, p. 270-270, 1997.

FERNANDES, L.A.; COIMBRA, A.M. O Grupo Caiuá (Ks): revisão estratigráfica e contexto deposicional. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, n. 3, p. 164-176, 1994.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. A Bacia Bauru (Cretáceo Superior, Brasil). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 68, n. 2, p. 195-206, 1996.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 4, p. 723-734, 2000.

FERNANDES, L. A.; MAGALHÃES-RIBEIRO, C. M. Evolution and palaeoenvironment of the Bauru Basin (Upper Cretaceous, Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, v. 61, p. 71-90, 2015. DOI: 10.1016/j.jsames.2014.11.007

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M.; BRANDT NETO, M. Silicificação hidrotermal neocretácea na porção meridional da Bacia Bauru. **Revista do Instituto Geológico**, v. 14, n. 2, p. 19-26, 1993.

FERNANDES, L. A.; COUTO, E. V.; SANTOS, L. J. C. Três Morrinhos, Terra Rica, PR Arenitos silicificados de dunas do Deserto Caiuá testemunham nível de superfície de aplainamento K-T. *In*: WINGE, M.; SCHOBENHAUS, C.; SOUZA, C. R. G.; FERNANDES, A. C. S.; BERBERT-BORN, M.; SALLUN FILHO, W.; QUEIROZ, E.T. (Ed.). **Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil**, vol. III. 1 ed. Brasília: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2013. p. 69-84. <http://sigep.cprm.gov.br/sitio058/sitio058.pdf>

FÚLFARO, V. J. Tectônica do alinhamento estrutural do Paranapanema. **Boletim IG-USP**, v. 5, p.129-138, 1974.

GOLDSTEIN, R. H. Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic systems. **Lithos**, v. 55, n. 1, p. 159-193, 2001.

GOLDSTEIN, R. H. Petrographic analysis of fluid inclusions. *In*: SAMSON, I.; ANDERSON, A.; MARSHALL, D. (Ed.). **Fluid inclusions: Analysis and interpretation**. Mineral. Assoc. Canada, Short Course 32, p. 9-53, 2003.

GOLDSTEIN, R. H.; REYNOLDS, T. J. Fluid Inclusion Petrography. *In*: GOLDSTEIN, R. H.; REYNOLDS, T. J. **Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals**. p. 69–85, 1994a. DOI: 10.2110/scn.94.31.0069

GOLDSTEIN, R. H.; REYNOLDS, T. J. **Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals**. Short Course, 31. Tulsa: Society for Sedimentary Geology, 1994b.

HASUI, Y.; HARAYI, N. L. E. Aspectos lito-estruturais e geofísicos do Soerguimento do Alto Paranaíba. **Geociências**, v. 10; p. 57-77, 1991.

HUTCHISON, C. S. **Economic deposits and their tectonic setting**. London: Macmillan Press, 1983.

VAN DEN KERKHOFF, A. M.; HEIN, U. F. Fluid inclusion petrography. **Lithos**, v. 55, p. 27-47, 2001.

LESPINASSE, M. Are fluid inclusion planes useful in structural geology? **Journal of Structural Geology**, v. 21, n. 8, p. 1237-1243, 1999.

LICHT, O. A. B. A revised chemo-chrono-stratigraphic 4-D model for the extrusive rocks of the Paraná Igneous Province. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 355, p. 32-54, 2018.

MACEDO, J. M. Evolução tectônica da Bacia de Santos e áreas continentais adjacentes. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 3, n. 3, p. 159-173, 1989.

MARQUES, A.; ZANOTTO, Q. A.; PAULA Q. B.; ASTOLFI, M. A.; FRANÇA, A. B.; BARBOSA, E. A. Arcabouço tectônico da Bacia do Paraná. *In*: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 5., 1993, Curitiba. **Boletim de resumos expandidos e programa**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia/Núcleos PR/SC/RS. 1993. p.101-102.

MÉGARD, F. The Andean orogenic period and its major structures in central and northern Peru, **Journal of the Geological Society**, v. 141, n. 5, p. 893–900. 1984. DOI: 10.1144/gsjgs.141.5.0893.

MILANI, E. J.; FRANÇA, A. B.; SCHNEIDER, R. L. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da PETROBRÁS**, v. 8, n. 1, p. 69-82, 1994.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências Petrobrás**, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.

MPODOZIS, C.; ARRIAGADA, C.; BASSO, M.; ROPERCH, P.; COBBOLD, P.; REICH, M. Late Mesozoic to Paleogene stratigraphy of the Salar de Atacama Basin, Antofagasta, northern Chile: implications for the tectonic evolution of the Central Andes. **Tectonophysics**, v. 399, p. 125–154, 2005.

PESTILHO, A. L. S.; Monteiro, L. V. S. Uma revisão dos fundamentos do estudo de inclusões fluidas aquosas e de petróleo. **Terrae Didática**, v. 13, n. 2, p. 71-92, 2017.

RAMOS, V. Anatomy and global context of the Andes: main geologic features and the Andean orogenic cycle. *In*: KAY, S. M.; RAMOS, V. A.; DICKINSON, W. (Ed.), **Backbone of the Americas, Shallow Subduction, Plateau Uplift and Terrane Collision**. Geological Society of America, Memoir 204, 2009. p. 31-66.

RAMOS, V. The Grenville-age basement of the Andes. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 29, p. 77-91, 2010.

RICCOMINI, C. Arcabouço estrutural e aspectos do tectonismo gerador e deformador da Bacia Bauru no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 2, p. 153-162, 1997.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. Evolução geológica do rift continental do Sudeste do Brasil. *In*: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO NEVES, B. B. (Ed.). **Geologia do continente Sul-**

Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004, p. 383-405.

ROEDDER, E. **Fluid inclusions.** Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy, v. 12. Berlin: De Gruyter. 1984.

ROEDDER, E.; SKINNER, B. J. Experimental evidence that fluid inclusions do not leak. **Economic Geology**, v. 63, n. 7, p. 715-730, 1968. DOI: 10.2113/gsecongeo.63.7.715

TOURET, J. L. R. Fluids in metamorphic rocks. **Lithos**, v. 55, n. 1, p. 1-25, 2001.

TURNER, S.; REGELOUS, M.; KELLEY, S.; HAWKESWORTH, C.; MANTOVANI, M. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 121, n. 3-4, p. 333-348, 1994.

WAGNER, W.; Pruß, A. The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, v. 31, n. 2, p. 398, 2002. DOI:10.1063/1.1461829

WILKINSON, J. J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. **Lithos**, v. 55, n. 1, p. 229-272, 2001. DOI: 10.1016/S0024-4937(00)00047-5

YARDLEY, B. W.; BODNAR, R. J. Fluids in the continental crust. **Geochemical Perspectives**, v. 3, n. 1, p. 1-2, 2014.

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

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. Bacia do Paraná. *In*: RAJA GABAGLIA, G. P.; MILANI, E. J. (org.) **Origem e Evolução de Bacias Sedimentares.** Rio de Janeiro: Petrobrás, 1990. p. 681-708.