

CARACTERÍSTICAS DO CIMENTO DOS DEPÓSITOS SEDIMENTARES DA BACIA BAURU: REGIÃO DE PRESIDENTE PRUDENTE – SP

Manoel Carlos Toledo F. de GODOY ¹, Antenor ZANARDO ²,
Pablo Xavier do Prado MARTIN-COCHER ³, Maria Cristina PERUSI ¹, Ítalo TSUCHYIA ⁴

(1) Departamento de Geografia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista/Campus de Presidente Prudente. Rua Roberto Simonsen, 3005. CEP 19060-900. Presidente Prudente, SP. Endereços eletrônicos: godoy@fct.unesp.br; joaacris@fct.unesp.br. (2) Departamento de Petrologia e Metalogenia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista/Campus de Rio Claro. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: azanardo@rc.unesp.br. (3) Curso de Graduação de Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista/Campus de Rio Claro. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. CEP 13.506-900. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: pprado@rc.unesp.br. (4) Departamento de Cartografia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Campus de Presidente Prudente. Rua Roberto Simonsen, 3005. CEP 19060-900. Presidente Prudente, SP. Endereço eletrônico: italo@fct.unesp.br.

Introdução
Objetivos
Materiais e Métodos
Materiais
Métodos
Resultados da Pesquisa
Diferenciação de Áreas de Acordo com o Grau de Cimentação
Informações da Amostragem de Poços
Identificação de Unidades Estratigráficas nos Perfis
Minerais Constituintes do Cimento
O Cimento como Fator Hidrogeoquímico
A Distribuição da Cimentação e a Localização de Aquíferos em Perfil
Conclusões
Agradecimentos
Referências Bibliográficas

RESUMO – Este artigo apresenta resultados parciais de uma pesquisa referente à cimentação em rochas sedimentares na região de Presidente Prudente – SP, que é integrada a um projeto aplicado à gestão de águas subterrâneas. Geologicamente, a área está localizada em depósitos sedimentares da Bacia Bauru, do Cretáceo Superior. Os resultados da pesquisa, baseados em dados de superfície e subsuperfície, demonstram uma correspondência entre o grau de cimentação carbonática e distinções petrográficas. Uma distinção nítida na porção leste da área da pesquisa deve ser relacionada a eventos tectônicos sindeposicionais ou pós-deposicionais. A presença de analcima no cimento indica a ocorrência de hidrotermalismo, que pode estar associado a esses eventos. Do ponto de vista hidrogeoquímico, a variação do pH das águas subterrâneas em função da profundidade dos poços está relacionada ao comportamento hidroquímico dos minerais constituintes do cimento. A pesquisa mostra também que as camadas menos cimentadas são as mais valorizadas do ponto de vista da exploração de águas subterrâneas.

Palavras-chave: Cimentação, carbonato, rocha sedimentar, analcima.

ABSTRACT – *M.C.T.F. de Godoy, A. Zanardo, P.X.P. Martin-Cocher, M.C. Perusi, I. Tsuchyia. Characteristics of sedimentary deposits cement in the Bauru Basin: Presidente Prudente Region, State of São Paulo, Brazil.* This paper presents partial results of a research on cementation of sedimentary rocks in the Presidente Prudente Region, State of São Paulo, Brazil, based on surface and sub-surface data, related to a project of groundwater management. According to recent mapping, the studied area is geologically located on Upper Cretaceous sedimentary deposits of the Bauru Basin. The results demonstrate a correlation between the degree of cementation and the types of petrographic facies. They also indicate that a remarkable petrographic distinction, located in the eastern portion of the area, is associated to tectonic events. The presence of analcime in the cement is probably due to hydrothermal processes, which may be associated to the tectonic events. The research demonstrates a pH variation of groundwater according to the deepness of wells, which is related to the hydrochemical behavior of minerals composing the sedimentary rock cement, and shows that the less cemented layers are the most valuable aquifers.

Keywords: Cementation, carbonate, Bauru Basin, analcime.

INTRODUÇÃO

As pesquisas sobre o cimento nas rochas sedimentares da Bacia Bauru são importantes como subsídio para estudos de variadas finalidades sobre a referida bacia, em especial para o entendimento dos aquíferos (porosidade, permeabilidades e composição química da água).

A contribuição destas pesquisas para a diferenciação entre litofácies é exemplificada no mapeamento executado por Almeida et al. (1981), pelo qual a Formação Adamantina do Grupo Bauru é desmembrada em cinco subunidades. O critério do grau de cimentação carbonática é adotado neste mapeamento para a distinção das duas subunidades superiores, designadas como K_{IV} e K_V . Ambas as subunidades são caracterizadas por uma sucessão de arenitos finos e muito finos, com intercalações e lentes de argilitos, siltitos, localmente aparecendo arenitos com intraclastos pelíticos. A subunidade K_V é diferenciada da K_{IV} pela maior frequência de cimentação carbonática e por algumas particularidades de estruturas sedimentares.

É reconhecida a importância de pesquisas da

cimentação em arenitos das rochas da Bacia Bauru em abordagem hidrogeoquímica, como é demonstrado em estudo referente a uma área localizada na porção meridional do Sistema Aquífero Bauru no Estado de São Paulo (Barinson, 2003). Nesse estudo, como minerais constituintes do cimento, são reconhecidos argilominerais, sílica, analcima, óxidos/hidróxidos de ferro, calcita e dolomita, às vezes com ferro.

O presente artigo apresenta resultados parciais de um estudo geológico aplicado à gestão de recursos hídricos subterrâneos na região de Presidente Prudente – SP, tendo sido constatado que os cimentos de depósitos sedimentares da Bacia Bauru, sobretudo os carbonáticos, têm assumido importância relevante no desenvolvimento das pesquisas relacionadas ao referido tema.

OBJETIVOS

A pesquisa, aqui limitada a uma área particularmente representativa para o estudo onde ela se integra, propõe-se a analisar a correspondência entre o grau de cimentação e as distinções petrográficas dos depósitos sedimentares da Bacia Bauru, enfocando também

particularidades na constituição mineralógica dos cimentos, a atuação hidrogeoquímica, direta ou indireta, dos minerais cimentantes, a sua influência na porosidade dos diversos termos petrográficos encontrados e a correlação entre o grau de cimentação e a localização de aquíferos.

MATERIAIS E MÉTODOS

MATERIAIS

A área da pesquisa está localizada no extremo oeste do Estado de São Paulo, estendendo-se por um território de 6.930 km² em torno da cidade de Presidente Prudente (Figura 1).

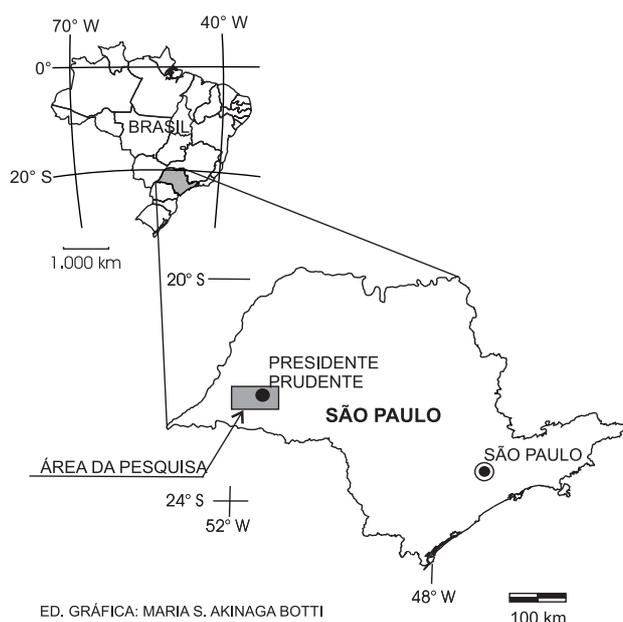


FIGURA 1. Mapa de localização da área da pesquisa.

Do ponto de vista de referências de mapeamento geológico, as investigações apoiaram-se em informações fornecidas por diversas pesquisas, em atenção à diversidade de interpretações estratigráficas característica da Bacia Bauru, tendo optado por reproduzir aqui as informações mais recentes no tocante a mapeamento geológico do Estado de São Paulo (Perrotta et al., 2005). De acordo com este mapeamento, a área da pesquisa está localizada em domínios da Formação Santo Anastácio / Grupo Caiuá (Ks) e das Formações Vale do Rio do Peixe e Presidente Prudente, do Grupo Bauru (Ks), com nítida predominância em extensão destas duas últimas unidades (Figura 2). A área de deposição dos dois citados grupos é considerada como unidade independente da Bacia Sedimentar do Paraná, sendo denominada “Bacia Bauru”.

De acordo com Perrotta et al. (2005) a Formação Santo Anastácio é constituída de arenito quartzoso fino a muito fino, com seleção pobre e pouca matriz, de arenito conglomerático com lentes de conglomerado e arenito, sendo a sua gênese identificada como um ambiente continental desértico, de planícies de bordas de mares de areia. Para Fernandes (2004), esta unidade é constituída de arenitos quartzosos subarcoseanos fino a muito fino, com seleção pobre e pouca matriz siltar-gilosa, com grãos subangulosos a subarredondados, encobertos por película de óxidos de ferro, dispostos

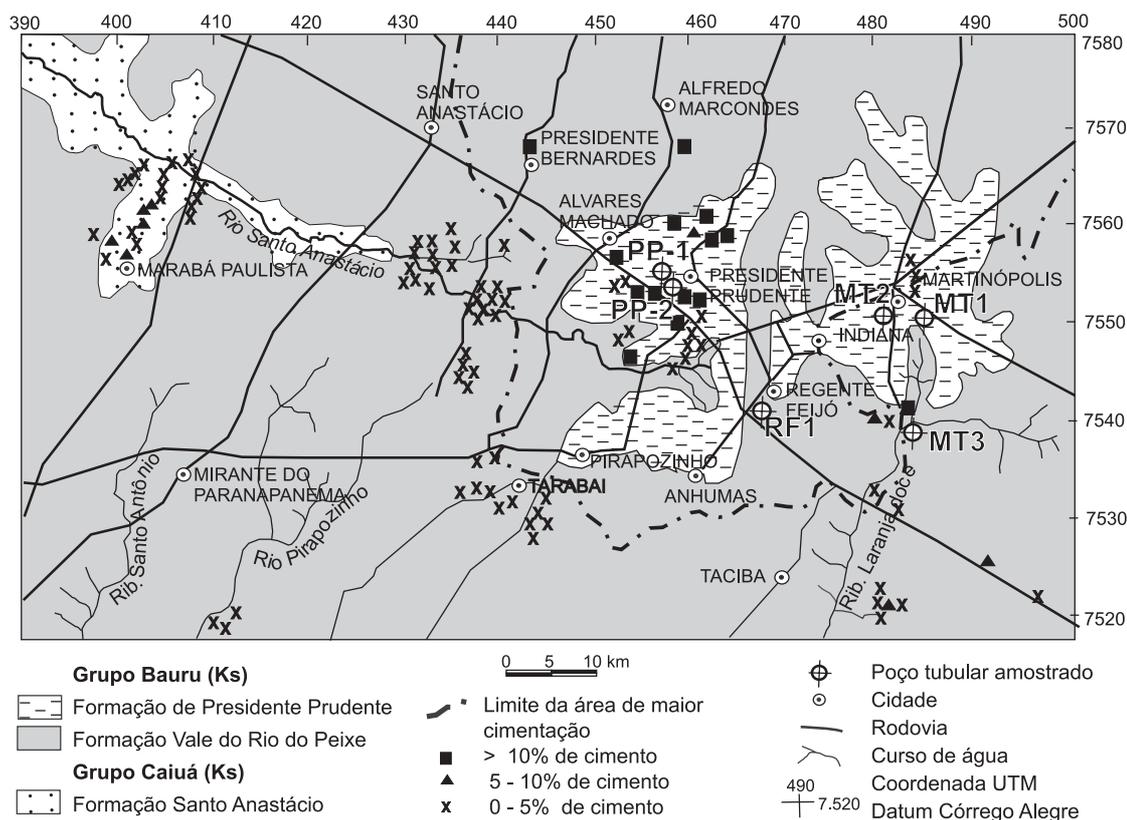


FIGURA 2. Mapa geológico e de localização da área de maior cimentação.

em estratos arenosos tabulares de aspecto maciço, típicos de depósitos de lençóis de areia, marginais aos mares de areia.

A Formação Vale do Rio do Peixe, segundo Perrotta et al. (2005), é composta de arenitos muito finos a finos, de cor marrom, rosa e alaranjado, seleção boa, com camadas tabulares de siltito maciço, cor creme a marrom e lentes de arenito conglomerático com intraclastos argilosos ou carbonáticos, tendo sido depositada em ambiente continental desértico eólico. Descrição idêntica a de Fernandes (2004), para quem a unidade é composta de arenitos muito finos a finos, de cor marrom, rosa e alaranjado, seleção moderada a boa, com aspecto maciço típico de lençóis de areia ou com estratificação cruzada tabular e acanalada de médio a pequeno porte, sendo que na parte oeste e norte do Estado de São Paulo, são comuns as intercalações com siltitos originados de depósitos de *loess*.

Para Perrotta et al. (2005) a Formação Presidente Prudente é composta de arenitos muito finos a finos, marrom avermelhado a bege, moderadamente a mal selecionada, com matriz pelítica e cimento calcítico, lamito argiloso marrom escuro, tendo sido depositada em ambiente continental desértico, fluvial meandrante. Também a descrição e interpretação genética desta unidade são equivalentes as de Fernandes (2004).

MÉTODOS

Para o mapeamento geral da área, a pesquisa baseou-se em levantamento de campo complementado com os recursos da aerofotogeologia. Na foto-interpretção foi ressaltada a identificação daquelas feições de relevo que estão associadas à presença significativa de cimento carbonático. As fotos utilizadas são do Projeto IAC/GEOFOTO de 1962, em escala 1:25.000.

Como material de estudo em laboratório, a pesquisa dispôs, além das amostras coletadas em afloramentos, de amostras indeformadas referentes a dois poços em Presidente Prudente, com profundidades de 140 m (PP-1) e 90 m (PP-2) e de um poço localizado nas proximidades da cidade de Regente Feijó (RF-1), com profundidade de 198 m até o embasamento basáltico. Também contou com a amostragem de calha de três poços tubulares localizados no Município de Martinópolis, com profundidades de 140 m (MT-1), 70 m (MT-2) e 70 m (MT-3) (Figura 2).

No Laboratório de Sedimentologia e Análises de Solos da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP/Campus de Presidente Prudente, procedeu-se à análise de distribuição granulométrica de amostras superficiais e de amostras coletadas de poços tubulares. A determinação de porcentagem de cimento carbonático foi baseada nos resultados da aplicação

da digestão ácida para desagregação das amostras que necessitaram deste recurso, tendo sido adotada a providência de separar previamente os nódulos existentes em algumas amostras. Não foi experimentada nenhuma técnica de separação exclusiva de cimento calcítico, uma vez que, neste sentido, os resultados de tentativas anteriores por diferentes meios revelaram-se de validade discutível (Godoy, 1999). No mesmo laboratório foram determinados, para algumas amostras selecionadas, os valores de porosidade, a partir da determinação da densidade de rocha seca pelo método da balança hidrostática e da densidade de partículas sólidas pelo método do balão volumétrico.

No Laboratório de Petrografia do Departamento de Petrologia e Metalogenia do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP/Campus de Rio Claro, foram executadas análises mineralógicas e de petrografia sedimentar. Nas amostras de rochas mais litificadas, o estudo foi realizado utilizando-se seções delgadas normais, enquanto que as mais frágeis foram totalmente desagregadas e os grãos, com diâmetros menores que 74 μ m, foram dispostos sobre lâmina de vidro, cobertos com lamínula e imersos em líquido com

índice de refração de 1,535. Os grãos maiores foram dispostos sobre vidro relógio e observados em lupa petrográfica (estereomicroscópio).

Dados de análises químicas de água referentes a coletas em surgências, em cacimbas e poços tubulares foram reunidos a partir da compilação de relatórios do Laboratório Adolfo Lutz em Presidente Prudente e dos arquivos da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), referentes a 77 pontos de coleta. Por esta empresa foi fornecida também uma cópia de gráfico de perfilagem geofísica referente ao poço de Regente Feijó e dados referentes a localização, cota de boca e profundidade de poços localizados na área, os quais foram complementados por informações cedidas por empresas de perfuração.

No Laboratório de Estatística Aplicada da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP/Campus de Presidente Prudente, valores de pH das águas amostradas foram correlacionados às surgências e à profundidade e ao nível, em termos de altitude, atingidos pelas cacimbas e poços tubulares. Nessa correlação foi utilizado o programa de regressão r-projeto, da Foundation for Statistical Computing, versão 2.1.

RESULTADOS DA PESQUISA

DIFERENCIAÇÃO DE ÁREAS DE ACORDO COM O GRAU DE CIMENTAÇÃO

No mapa da Figura 2 é delimitada uma área onde a cimentação carbonática é mais abundante. A sua configuração é quase inteiramente concordante com a área correspondente à subunidade Ka_v do mapa de Almeida et al. (1981).

Com o apoio de determinações laboratoriais referentes à distribuição granulométrica, petrografia e mineralogia, é verificada nitidamente, tanto com referência aos dados de afloramentos como aos de poços tubulares, a maior concentração de cimento carbonático em siltitos e lamitos do que em arenitos, sendo particularmente abundante nos siltitos. As litofácies mais cimentadas ocorrem caracteristicamente na área do espigão divisor de águas entre as bacias do Rio do Peixe, a norte e nordeste, do Rio Santo Anastácio, a noroeste e oeste, e do Rio Parapanema, a sul e sudeste.

Nos arenitos a maior porcentagem de cimentação é verificada naqueles onde a quantidade de matriz é relativamente maior. Arenitos subarcoseanos, incluindo aqueles mapeados como pertencentes à Formação Santo Anastácio, apresentam os valores mais baixos dentre as litofácies pesquisadas. Na comparação entre as rochas amostradas em afloramentos e aquelas

coletadas de poços tubulares constata-se nitidamente a maior presença, tanto pela frequência como pela porcentagem de cimento, nestas últimas, indicando perda de cimentação à medida que os depósitos são expostos às intempéries.

Nas áreas onde a cimentação é proporcionalmente menos abundante, são distinguidos como típicos da Formação Vale do Rio do Peixe, os bancos de arenito maciço, identificados com a deposição em lençóis de areia, em concordância com a descrição de Fernandes (2004). Notadamente no curso médio do Rio Santo Anastácio, estes bancos formam encostas dos vales, sendo comumente intercalados com siltitos, tendo sido, no entanto, mapeados por Stein (1999) como componentes da Formação Santo Anastácio.

A distribuição em área das subunidades propostas por Almeida et al. (1981), diferenciadas como Ka_I , Ka_{II} , Ka_{III} , Ka_{IV} e Ka_v , não é confirmada, verificando-se um grau de diversificação e complexidade de litofácies de tal ordem, que se torna incompatível com a característica de regularidade de suas delimitações, tal como elas foram mapeadas.

Deve ser ressaltado que a região de Presidente Prudente foi afetada por tectonismo pós-deposicional, exemplificado no Alto de Paraguaçu Paulista e no Baixo Estrutural de Presidente Bernardes mapeados por Paula

e Silva et al. (2003), e basculamentos, como aquele mapeado por Stein (1999) no Vale do Rio Santo Anastácio. No tocante à distribuição em área dos diferentes depósitos sedimentares, a atuação destas formas de tectonismo possivelmente tenha contribuído para aumentar a sua complexidade, já determinada pela variabilidade de depósitos continentais, em especial aqueles originados em ambiente fluvial.

INFORMAÇÕES DA AMOSTRAGEM DE POÇOS

Com relação aos poços tubulares amostrados em testemunhos de perfuração, duas zonas pelo menos são diferenciadas no tocante à distribuição granulométrica dos clastos e à cimentação, com um contraste nítido entre elas quanto a estes dois tipos de componentes. Numa zona superior, do ponto de vista petrográfico, observa-se a predominância de lamitos, arenitos muito finos a finos, em grande parte siltosos, de cor castanha a alaranjado, siltitos de cor cinza a castanho, e argilitos marrons até a profundidade de 70 m – cota 380 m – no poço RF-1 em Regente Feijó e até a profundidade de 80 m – cota de 354 m – no poço PP-1, e até pelo menos 90 m – cota 336 m – no poço PP-2, os dois últimos sendo localizados em Presidente Prudente (Figura 2). Nesta zona superior, de modo comum ao perfil dos três poços, nas camadas areníticas é observada a presença de laminações cruzadas por migração de ondulações e intraclastos pelíticos ou carbonáticos. Dobras convolutas por sobrecarga são frequentemente identificadas e feições de bioturbação são reconhecidas em diferentes níveis. Estratificações cruzadas de baixo ângulo aparecem nos testemunhos dos três poços, sendo, no entanto, pouco comuns. Localmente é observado um grau muito elevado de cimentação, alcançando valor superior a 50%, em camadas brechóides, onde os clastos são predominantemente de carbonato de cálcio.

À zona descrita acima, mais heterogênea do ponto de vista petrográfico, sobrepõe uma zona reconhecidamente mais uniforme neste aspecto, como se observa na Figura 6, referente ao poço RF-1. Nela há predominância de arenito vermelho-amarelo, maciço, fino a muito fino, subarcoseano, com pouca matriz, com teor de feldspato entre 10% e 15% em média, presença de calcedônia relativamente comum e ocorrência muito rara de opala.

Os grãos de quartzo, em geral subarredondados, na maior parte apresentam-se límpidos, revelando, no entanto, a coloração avermelhada intensa em alguns deles, devido ao seu envolvimento por películas de óxidos de ferro. O teor de cimento carbonático é sensivelmente mais baixo do que na zona superior, sendo bem típica, contudo, a presença de nódulos carbonáticos. Comumente, em perfis geológicos é distinguida

a presença desta segunda zona, sendo ela identificada como Formação Santo Anastácio, a exemplo dos perfis traçados por Paula e Silva et al. (2003).

Nesta ordenação em perfil a partir da superfície, uma terceira zona é reconhecida. Nela, de acordo com todas as análises laboratoriais referentes ao poço RF-1, são intercalados os termos petrográficos da primeira zona com os da segunda zona, reproduzindo-se a correspondência entre a maior cimentação e os termos siltíticos e lamíticos e o menor grau de cimentação nas camadas de arenitos com menor presença de matriz. Deve ser salientada, entretanto, a presença entre as profundidades de 194 m e 198 m, junto ao contato com o embasamento basáltico, de um microconglomerado polimítico, onde os seixos são predominantemente de fragmentos de rochas basálticas e carbonáticas. A sua presença indica fonte próxima dos detritos, admitindo-se também a influência de desnível de origem tectônica na energia dos agentes de transporte de detritos.

Os dados dos poços MT-1, MT-2 e MT-3, localizados em Martinópolis, possibilitam o traçado de um perfil diferente dos perfis descritos acima, tanto do ponto de vista da variação granulométrica, quanto no aspecto da distribuição vertical do grau de cimentação.

No poço MT-1, desde a superfície, de cota de 562 m, até a profundidade final de 140 m, foi determinada a presença de cimento em apenas 6 amostras, as quais correspondem às profundidades de 84 a 86 m, 120 a 126 m e de 130 a 132 m, sendo elas, significativamente, de lamitos. Além da generalizada ausência de cimento, observa-se nítida predominância de arenitos subarcoseanos, vermelhos, friáveis, finos a muito finos, com pouca matriz argilosa. Os grãos de quartzo apresentam-se em geral incolores, sendo uma parcela deles recoberta por película de óxidos de ferro.

Os resultados do poço MT-2, com profundidade de 70 m, localizado nas proximidades da usina da empresa Caiuá S.A., onde Fúlfaro et al. (1999) identificaram a Formação Santo Anastácio, revelam a nítida predominância de características comparáveis aos encontrados no poço MT-1. Neles a porcentagem de cimento está restrita ao intervalo de 1,94 a 3,3%.

Quanto ao poço MT-3, os resultados obtidos reproduzem de modo geral aqueles referentes aos poços MT-1 e MT-2.

A comparação entre os dados de distribuição granulométrica do poço de Regente Feijó (RF-1), com os resultados referentes ao poço MT-1 de Martinópolis, está resumida no diagrama triangular da Figura 3, adaptado de Shepard (1954), onde a constituição granulométrica é determinada com base na presença dos clastos, tendo sido dela excluída a participação do cimento carbonático. Os dados do diagrama ressaltam

a predominância de arenitos e a homogeneidade de constituição granulométrica das amostras do poço MT-1 e a característica de dispersão granulométrica das amostras do poço RF-1.

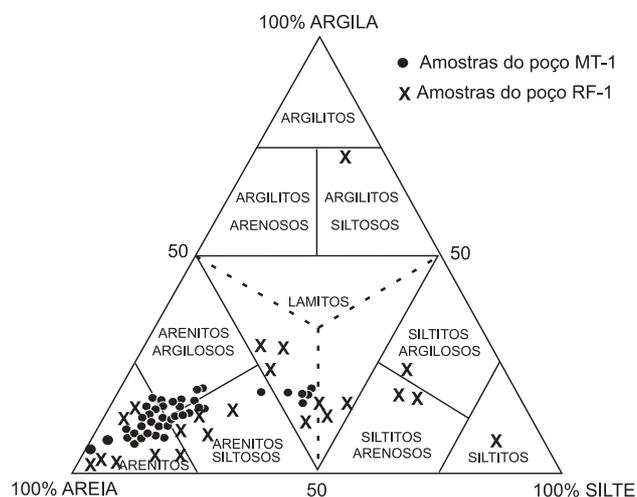


FIGURA 3. Diagrama de distribuição granulométrica de amostras dos poços MT-1 e RF-1.

De acordo com os resultados já alcançados, o contraste de zonas diferenciadas pelo grau de cimentação corresponde ao contraste nestas mesmas zonas quanto a outras características petrográficas, conforme é resumido acima. Deve-se ressaltar que os resultados referentes a estes três poços são semelhantes àqueles correspondentes ao intervalo entre 70 m e 136 m do poço de Regente Feijó. Os contrastes entre a zona superior identificada neste poço com os perfis integrais dos poços de Martinópolis possibilitam mapear duas áreas distintas do ponto de vista petrográfico, inclusive no tocante ao grau de cimentação. Esta separação caracteriza uma descontinuidade estratigráfica concordante com um trecho do limite de direção NE-SW da zona de maior porcentagem relativa do cimento carbonático, conforme se observa na Figura 2, cuja causa deve estar relacionada à sua localização no flanco do Alto Estrutural de Paraguaçu Paulista. De acordo com a figura, este trecho é exatamente aquele onde a área mapeada da Formação Presidente Prudente ultrapassa a limitação da referida zona.

Uma hipótese que deve ser considerada é a identificação dos depósitos analisados nos poços de Martinópolis e a segunda zona definida nos perfis de poços de Regente Feijó e Presidente Prudente, sendo esta uma continuação de tais depósitos nos rumos SW e W, estendendo-se sob as litofácies mais cimentadas.

Para esta disposição deve ter contribuído a atuação da estrutura do Alto de Paraguaçu Paulista.

IDENTIFICAÇÃO DE UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS NOS PERFIS

A presença das litofácies identificadas com as unidades propostas em mapas e perfis dos mapeamentos de Perrotta (2005) e Almeida et al. (1981) não foi reconhecida nos perfis referentes aos poços RF-1, PP-1 e PP-2.

Quanto às subdivisões propostas por Almeida et al. (1981), nos trechos dos perfis traçados pelos autores que são mais próximos aos três poços, são incluídas as subunidades designadas como $K_{a_{IV}}$ e K_{a_V} . Sendo esta última basicamente diferenciada pela maior presença de cimento carbonático, inexistente a correlação com os perfis dos poços referidos acima, pelo fato de que na primeira zona não se observa diminuição abrupta no grau de cimentação até o contato com o arenito subarcoseano, que identifica a segunda zona.

Quanto à inclusão da Formação Vale do Rio do Peixe nos perfis dos referidos poços, não há nenhuma indicação neles da presença de bancos maciços de arenito típicos de lençóis de areia. Poucos metros acima do topo da segunda zona do perfil, onde se encontra o arenito mais poroso, são identificadas camadas de arenito muito fino a fino, com muita matriz siltosa, sendo, portanto, diferentes granulometricamente daqueles mais típicos da citada formação.

MINERAIS CONSTITUINTES DO CIMENTO

Dentre os minerais identificados, o carbonato de cálcio apresenta uma proporção sensivelmente maior do que os outros. Em seções delgadas a determinação de porcentagem de sua presença mostrou valores próximos dos obtidos a partir da digestão ácida. A forma de ocorrência dos cristais identificados denota crescimento posterior à deposição dos clastos, ocupando espaço intersticial entre eles, cimentando-os. A identificação de calcita poiquilotópica confirma a idéia da atuação mais significativa da fase mesodiagenética, tal como é observado por Caetano-Chang & Wu (2003) em estudo da diagênese do arenito Pirambóia.

Óxidos e hidróxidos de Fe formam espessa película de coloração vermelho-amarelo, em alguns casos recobrindo os grãos inteiramente. São mais característicos dos arenitos subarcoseanos de cor vermelho-amarelo. Em determinados níveis aparecem em mistura com os argilominerais presentes também no cimento.

A presença de analcima ($NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$) foi reconhecida em seção delgada referente a 4 amostras indeformadas, cujas referências de identificação estão na Tabela 1.

Os grãos observados são caracterizados por seu relevo alto e negativo, comportamento isotrópico e pelo

TABELA 1. Localização de analcima nos perfis dos poços tubulares.

| Poço | Profundidade (m) | Cota (m) | Distância vertical do substrato basáltico (m) | Rocha |
|------|------------------|----------|---|----------------------|
| PP-1 | 124 | 310 | 109 | Arenito subarcoseano |
| PP-1 | 135 | 299 | 63 | Arenito subarcoseano |
| RF-1 | 179 | 271 | 19 | Arenito subarcoseano |
| RF-1 | 190 | 260 | 08 | Arenito subarcoseano |

hábito leucitiforme, em seção exibindo 8 faces, sempre limpos (Foto 1). A sua cristalização aparenta ter sido posterior à própria cimentação carbonática. A observação destas características confirma o que foi descrito por Barison (2003), que identificou este mineral em amostras provenientes de poços tubulares em depósitos sedimentares da Bacia Bauru.

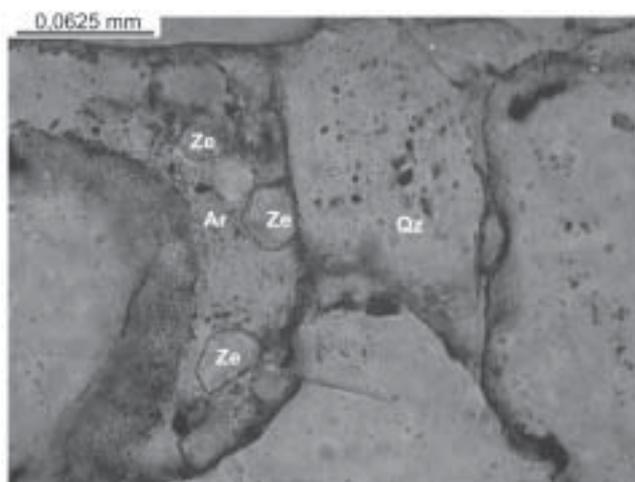


FOTO 1. Fotomicrografia da amostra de 179 m de profundidade do poço RF-1: clastos de quartzo (Qz), cristais eudrais de analcima (Ze), ferriargilãs (Ar).

Brandt Neto et al. (1987) atribuem a origem hidrotermal às ocorrências de analcima em rochas desta mesma bacia, sendo elas formadas contemporaneamente a um magmatismo alcalino próximo. A gênese deste mineral para Aoyagi & Kazama (1980, segundo Barison, 2003) resulta da transformação de zeólitas a temperatura em torno de 116°C.

A presença do referido mineral pode estar relacionada a tectonismo sindeposicional ou pós-deposicional, que teria possibilitado a subida de águas quentes a partir dos aquíferos confinados do Sistema Pirambóia-Botucatu, ao longo de discontinuidades que atravessariam os corpos de basalto, ainda em estado de resfriamento.

O CIMENTO COMO FATOR HIDROGEOQUÍMICO

Nas investigações em desenvolvimento são destacadas presentemente as inter-relações entre os valores de pH das águas subterrâneas pesquisadas e o grau de cimentação, adotando-se como premissa a constatação de que a cimentação da rocha diminui conforme a profundidade atingida pelos poços amostrados. As Figuras 4 e 5 são baseadas na análise estatística de regressão, na qual se ajustou melhor um modelo de regressão linear, apresentando uma alta correlação das variáveis consideradas ($P < 2 \times 10^{-3}$).

Num dos gráficos, que inclui dados de surgências, a variação de pH é relacionada com a profundidade e no outro a variável independente é a cota atingida pelos poços em seu limite inferior ou a cota do contato com o substrato basáltico.

Apesar da dispersão de valores correspondentes às coletas de surgência, pela sua sujeição a condições ambientais instáveis, os resultados significam que o valor pH sofre elevação conforme a profundidade das zonas aquíferas, de modo que as águas se tornam progressivamente mais alcalinas.

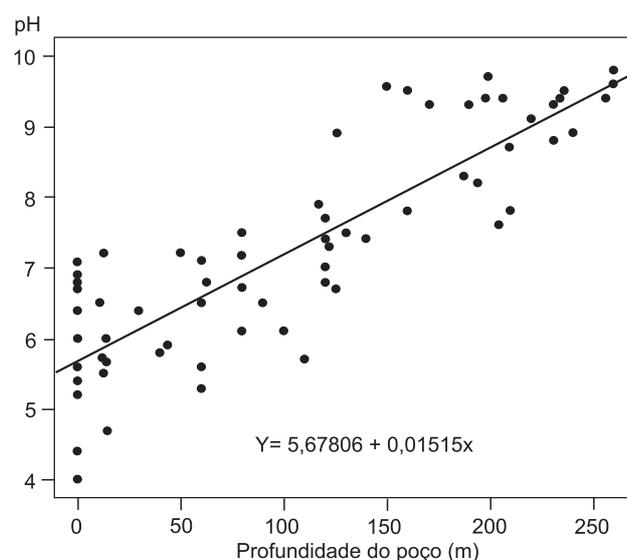


FIGURA 4. Gráfico de correlação: profundidade dos poços x pH da água captada.

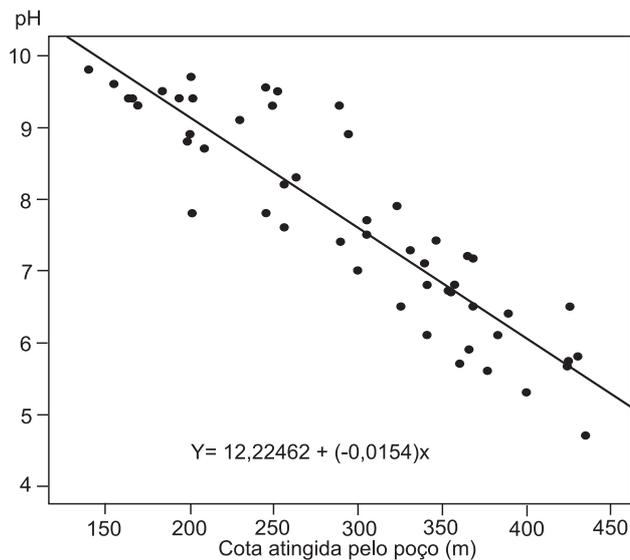


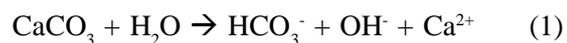
FIGURA 5. Gráfico de correlação: cota atingida pelos poços x pH da água captada.

De acordo com Barison (2003), o aumento de pH em função da profundidade da zona aquífera e da proximidade do embasamento de rochas basálticas é devido à decomposição da analcima pela água percolante.

O comportamento do pH em dependência da profundidade pode ser determinado também pela atuação sobre o carbonatos de águas de zonas mais próximas à superfície, cujo pH é menor que 5. A presença menos comum e em mais baixa proporção do cimento carbonático em afloramentos do que no interior do depósito rochoso indica a maior ocorrência de dissolução dos carbonatos junto à superfície, o que

favorece o aumento do pH em águas mais profundas.

Deve-se considerar também a influência da dissolução por hidrólise do carbonato de cálcio cimentante de termos areníticos. Em seções delgadas referentes aos arenitos localizados a mais de 100 m de profundidade do poço PP-1 e mais de 70 m do poço RF-1, onde o grau de cimentação é relativamente mais baixo, são observados indícios de corrosão do cimento carbonático. A maior porosidade nestes níveis possibilita contato mais efetivo da água percolante com o cimento, favorecendo este processo de dissolução, que é simplificado na equação (1).



Outro fator que pode estar contribuindo para o aumento do pH com a profundidade dentro dos limites do aquífero, é a maior densidade das águas básicas em relação às ácidas, determinando a sua tendência em se posicionar nas porções basais dos aquíferos.

A DISTRIBUIÇÃO DA CIMENTAÇÃO E A LOCALIZAÇÃO DE AQUÍFEROS EM PERFIL

Na Tabela 2 são relacionados os valores de grau de cimentação por carbonatos, porosidade em porcentagem de volume ocupado pelos poros (ϕ) e características de identificação de rochas especialmente selecionadas para este fim. Os valores menores de porosidade correspondem a lamito (Amostra 1) e siltito (Amostra 3) muito cimentados, sendo estes valores, por exemplo, inferiores ao de um argilito. Os arenitos que não contêm cimento carbonático são os mais porosos.

TABELA 2. Comparação de valores de porosidade, distribuição granulométrica e grau de cimentação de amostras coletadas na área da pesquisa.

| N° | Localização | ρ_s (g/cm ³) | ϕ (%) | Cimento Carbonático* (%) | | Tipo de rocha |
|----|-----------------|-------------------------------|------------|--------------------------|--|---|
| | | | | | | |
| 1 | Afloramento | 2,29 | 9,48 | 34,35 | | Lamito arenoso |
| 2 | Poço PP-1 19m | 2,12 | 18,14 | 19,09 | | Siltito arenoso |
| 3 | Poço RF 50,3m | 2,17 | 14,22 | 21,51 | | Siltito |
| 4 | Afloramento | 1,84 | 30,82 | 0 | | Arenito – seção tipo da Fm. Santo Anastácio |
| 5 | Poço PP-1 74m | 2,20 | 17,29 | 23,32 | | Siltito |
| 6 | Poço PP-1 90m | 1,80 | 30,50 | 0 | | Arenito muito friável, com bioturbação |
| 7 | Poço PP-1 100m | 1,97 | 23,04 | 2,23 | | Arenito fino com pouca matriz |
| 8 | Poço PP-1 135m | 1,94 | 23,62 | 2,50 | | Arenito fino com pouca matriz |
| 9 | Afloramento | 1,84 | 35,43 | 0 | | Arenito fino com pouca matriz |
| 10 | Afloramento | 2,22 | 16,54 | 0 | | Argilito adensado, com bioturbação |
| 11 | Poço RF-1 83m | 1,81 | 30,38 | 2,91 | | Arenito fino a muito fino com pouca matriz |
| 12 | Poço RF-1 144,6 | 2,17 | 19,63 | 33,00 | | Arenito fino a muito fino com pouca matriz |

ρ_s massa específica de rocha seca ϕ porosidade * porcentagem em massa

A Figura 6 compara gráficos de raio gama API já interpretados, de resistividade induzida e de perfilagem sônica com dados petrográficos e de cimentação de poço RF-1, em perfil limitado ao intervalo de 40 a 160 m de profundidade, correspondente à amostragem de testemunhos mais precisamente localizada do ponto de vista de referência de profundidade.

Do ponto de vista da exploração de águas subterrâneas, as rochas encontrados entre as profundidades de 81 m a 136 m são duplamente favorecidas, exibindo maior porosidade devido tanto ao fator de cimentação como de baixa proporção de finos. Estas qualidades de aquífero são atribuídas à formação Santo Anastácio.

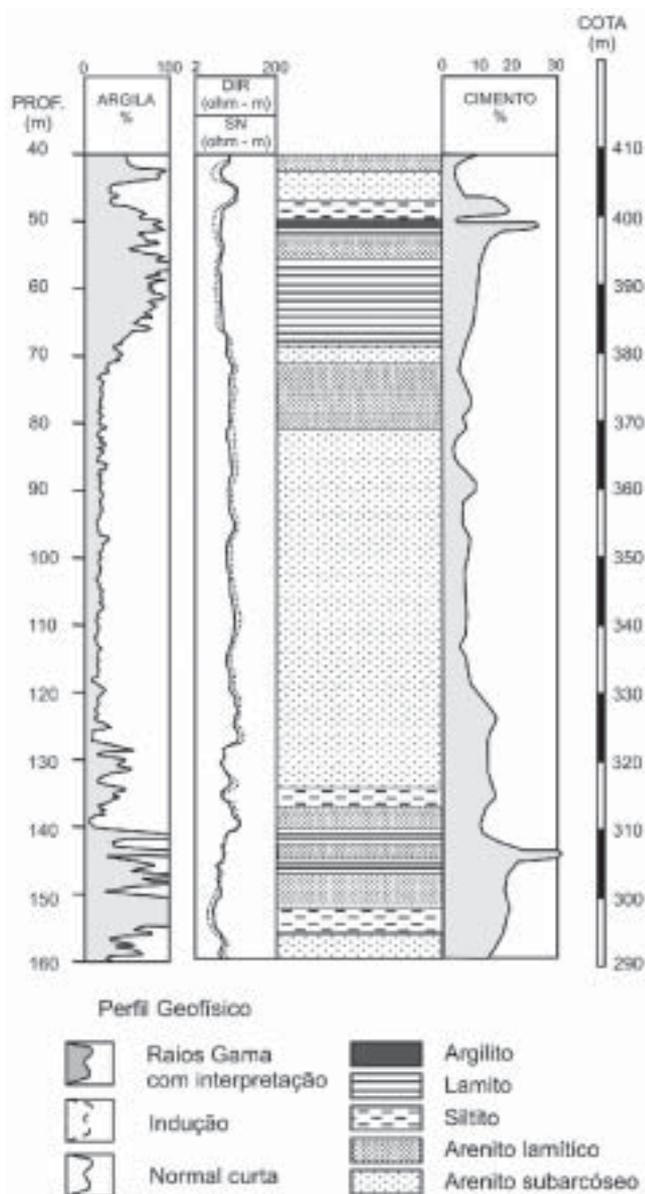


FIGURA 6. Poço RF-1: comparação entre perfil geofísico e perfil geológico com a variação do grau de cimentação.

CONCLUSÕES

Os resultados da pesquisa, ainda preliminares, apontam para a validade do grau de cimentação como um dos critérios para a distinção estratigráfica nos depósitos da Bacia Bauru na região de Presidente Prudente. Em corte geológico, são caracterizadas pelo menos duas zonas petrográficas: uma superior, onde

se intercalam siltitos, lamitos e arenitos com grau de cimentação relativamente elevado, e outra, onde predominam arenitos subarcoseanos, com grau de cimentação relativamente menor, sendo esta segunda zona comumente identificada com a Formação Santo Anastácio em perfis geológicos. Uma terceira zona,

sotoposta às duas acima mencionadas, aparentemente associa, em disposição de camadas alternadas, características petrográficas dessas outras duas zonas, merecendo, no entanto, um estudo aprofundado do ponto de vista petrográfico.

Em mapa, é identificada na porção leste, próximo à cidade de Martinópolis, uma associação petrográfica que contrasta nitidamente com aquela delimitada a oeste, a partir dos dados dos poços PP-1, PP-2 de Presidente Prudente e RF-1 de Regente Feijó, caracterizando uma descontinuidade lateral e apontando, deste modo, para a interferência de evento tectônico sobre as litofácies aí depositadas, embora se admita a correlação destes arenitos aflorantes em Martinópolis com a zona de fácies mais arenosas sotopostas aos lamitos, siltitos e arenitos lamíticos.

Pela presença bem distinta da analcima no cimento, deduz-se que os depósitos pesquisados sofreram a ação de hidrotermalismo, reforçando as hipóteses

sobre sua origem anteriormente apresentadas em pesquisas na Bacia Bauru e a hipótese da sua associação com eventos tectônicos.

Do ponto de vista hidrogeoquímico, é entendido que o cimento é um agente importante para determinar as características físico-químicas das águas subterrâneas. Sendo constatada a evolução dos valores de pH nelas em função da profundidade de cacimbas e poços e em função da cota atingida através destas formas de captação, associa-se o comportamento bem definido destes valores à interação química da água percolante com os minerais constituintes do cimento.

Quanto ao comportamento como aquífero, deduz-se que a zona dos arenitos comumente identificados com a Formação Santo Anastácio é nitidamente mais favorável à captação de águas subterrâneas, tanto pelo grau relativamente menor de cimentação, quanto pela menor presença de clastos finos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP, na pessoa do Eng^o. Almiro Cassiano Filho, Diretor do Departamento de Manutenção e Automação, que autorizou, sem restrição, a coleta de dados de seus arquivos referentes a poços tubulares. Agradecem também ao Instituto Adolfo Lutz, Laboratório I de Presidente Prudente, na pessoa da Diretora Técnica do Serviço de Saúde, a Sra. Mariza Menezes Romão, pela importante colaboração prestada com a permissão de acesso aos seus arquivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, M.A.; STEIN, D.P.; MELO, M.S.; BISTRICHI, C.A.; PONÇANO, W.L.; HASUI, Y.; ALMEIDA, F.F.M. Geologia do oeste paulista e áreas fronteiriças dos Estados de Mato Grosso do Sul e Paraná. In: A FORMAÇÃO BAURU NO ESTADO DE SÃO PAULO E REGIÕES ADJACENTES, Mesa Redonda, 1980, São Paulo. **Coletânea de Trabalhos e Debates...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia/Núcleo São Paulo, Publicação Especial, n. 7, p. 31-47, 1981.
2. AOYAGI, K. & KAZAMA, T. Transformational changes of clays minerals, zeolites and silica minerals during diagenesis. **Sedimentology**, v. 27, p. 179-188, 1980.
3. BARISON, M.R. **Estudo hidrogeoquímico da porção meridional do Sistema Aquífero. Bauru no Estado de São Paulo.** Rio Claro, 2003. 151 p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista/Campus de Rio Claro.
4. BRAND NETO, M.; BARELLI, N.; BARCHA, S.F.; COIMBRA, A.M. Ocorrência de analcima em sedimentos da formação Adamantina em Macedônia (Estado de São Paulo), uma evidência de hidrotermalismo no Grupo Bauru. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 6, 1987, Rio Claro. **Atas...** Rio Claro: Sociedade Brasileira de Geologia/Núcleo São Paulo, 1987, v. 1, p. 113-121.
5. CAETANO-CHANG, M.R. & WU, F.F. Diagênese de arenitos da Formação Pirambóia no Centro Este Paulista. **Geociências**, v. 22, N. Especial, p. 33-47, 2003.
6. FERNANDES, L.A. Mapa litoestratigráfico da parte oriental da Bacia Bauru (PR, SP, MG), escala 1:1.000.000. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 55, p. 53-66, 2004.
7. FÚLFARO, V.J.; ETCHEBEHERE, M.L.C.; PERINOTTO, J.A.J.; SAAD, A.R. Santo Anastácio: um geossolo cretácico na Bacia Caiuá. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCIO DO BRASIL, 5, 1999, Rio Claro. **Boletim...** Rio Claro: UNESP, 1999, p. 125-130.
8. GODOY, M.C.T.F. **Estudo das zonas não saturada e saturada da Formação Adamantina do Grupo Bauru em Presidente Prudente, Estado de São Paulo.** São Paulo, 1999. 159 p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
9. PERROTTA, M.M.; SALVADOR, E.D.; LOPES, R.C.; D'AGOSTINO, L.Z.; PERUFFO, N.; GOMES, S.D.; SACHS, L.L.B.; MEIRA, V.T.; LACERDA FILHO, J.V. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:750.000.** São Paulo: Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2005.
10. PAULA E SILVA, F.; CHANG, H.K.; CAETANO-CHANG, M.R. Perfis de referência do Grupo Bauru (K), oeste do estado de São Paulo. **Geociências**, v. 22, N. Especial, p. 21-32, 2003.
11. SHEPARD, F.P. Nomenclature based on sand-silt clays ratios. **Journal of Sedimentary Petrology**, n. 24, p. 151-158, 1954.
12. STEIN, D.P. **Avaliação da degradação do meio físico – Bacia do Rio Santo Anastácio.** Rio Claro, 1999. 197 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista/Campus de Rio Claro.

*Manuscrito Recebido em: 30 de março de 2006
Revisado e Aceito em: 4 de agosto de 2006*