

INTERFERÊNCIAS DA ATIVIDADE MINERÁRIA ARGILEIRA NOS RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIBEIRÃO SANTA GERTRUDES - SP



ESTUDO DE CASO

**FLAVIO DE PAULA E SILVA
CHANG HUNG KIANG**

Interferência da atividade minerária argileira nos
recursos hídricos da Bacia do Ribeirão Santa Gertrudes, SP

Flávio de Paula e Silva
Chang Hung Kiang

Foto da capa gentilmente cedida por Gré de Araújo Lobo.

Cava de mineração aberta em siltitos e argilitos da Formação Corumbataí, inundada por água de chuva, Polo Ceramista de Santa Gertrudes (SP).



**INTERFERÊNCIAS DA
ATIVIDADE
MINERÁRIA
ARGILEIRA NOS
RECURSOS HÍDRICOS
DA BACIA DO
RIBEIRÃO SANTA
GERTRUDES – SP**

ESTUDO DE CASO

Barramento da captação municipal de água de Santa Gertrudes – SP (2005)

Interferência da atividade minerária argileira nos recursos hídricos da Bacia do Ribeirão Santa Gertrudes, SP

Estudo de caso

Flavio de Paula e Silva é bacharel em Geologia (1979) pela Universidade Estadual Paulista (UNESP); Doutor em Geologia Regional (2003) pela UNESP; Pós-doutor em Geociências e Meio Ambiente (2006) pela UNESP, Rio Claro; Pesquisador da Fundação para o Desenvolvimento da UNESP (FUNDUNESP) atuando no LEBAC - Laboratório de Estudo de Bacias. Atuou profissionalmente na Petrobras; no Agrupamento de Geologia Aplicada à Mineração e Obras Subterrâneas da Divisão de Minas e Geologia Aplicada do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo – IPT; no Centro de Estudos e Pesquisas de Água Subterrânea do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo – DAEE; e na Secretaria de Planejamento Urbano da Prefeitura Municipal de Araraquara. Sócio-fundador da GEODATA – Consultoria e Projetos Hidrogeológicos; Atua na área de hidrogeologia, hidroestratigrafia e gestão de aquíferos, com ampla experiência em projetos de poços tubulares profundos, testes de bombeamento, perfilagem geofísica de poços, prospecção de água subterrânea e avaliação de recursos hídricos subterrâneos.

Chang Hung Kiang é Bacharel em Geologia (1974) pelo Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (USP); Mestre em Geologia (1978) e PhD em Geologia (1983) pela Northwestern University (EUA); Livre Docente/Professor Adjunto (1997) pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). Em 2011 foi aprovado no concurso para o cargo de Professor Titular no Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE/UNESP). Desde 1987 é Professor do IGCE/UNESP, Rio Claro, e coordenador do Laboratório de Estudos de Bacias (LEBAC), desde sua criação em 2002. Por dois mandatos – 2001 a 2006 – foi Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente do IGCE/UNESP. Foi Pesquisador do Centro de Pesquisas (CENPES/PETROBRAS) de 1980 a 1991; Chefe do Setor de Geologia do CENPES/PETROBRAS de 1986 a 1991. Pela PETROBRAS, foi coordenador do Convênio PETROBRAS/UNICAMP, do Curso de Pós-graduação em Geoengenharia de Reservatórios entre 1992 e 1995. Foi Pesquisador Assistente da ARCO Oil & Gas (Dallas, Texas) em 1979. Iniciou sua carreira profissional como Geólogo da UNIGEO Geologia e Mineração (1975 a 1976). É Pesquisador Nível I do CNPq; assessor científico *ad hoc* da FAPESP, CAPES e CNPq; e membro do corpo consultivo das Revistas Águas Subterrâneas, Ciências Agrárias e Ambientais e Holos Environment. Atualmente desenvolve pesquisas relacionadas a Recursos Hídricos, Diagnóstico Ambiental, Análise de Risco e Remediação, com ênfase na área de hidrogeologia e modelagem geoquímica.

Os direitos autorais de todo o material apresentado neste livro digital são propriedade dos autores. A reprodução, adaptação, modificação ou utilização do conteúdo deste livro, parcial ou integralmente, é permitida somente com a autorização prévia dos autores.

Qualquer uso não autorizado de material incluído neste livro pode constituir uma violação das leis de direitos autorais, das leis de marcas comerciais e das leis de privacidade e das leis e regras de comunicação.

C454i

Paula e Silva, Flavio de & Chang, Hung Kiang

Interferências da atividade minerária argileira nos recursos hídricos da bacia do Ribeirão Santa Gertrudes / SP

Flavio de Paula e Silva & Chang Hung Kiang. São Paulo, SP, 2017.

ISBN 978-85-921716-2-9

1. Hidrogeologia. 2. Recursos hídricos 3. Bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Gertrudes. 4. Hidrologia. 5. Interferências nos recursos hídricos. 6. Recuperação de áreas degradadas. 7. Mineração de argila. I. Título.

PREFÁCIO

A publicação de relatórios técnicos no Brasil não é uma atividade comum, embora devesse ser levada muito mais a sério. Este fato é comprovado amplamente na área das geociências em geral, e a hidrogeologia em particular não destoa deste panorama. Os relatórios técnicos deveriam ser tornados públicos para que a comunidade técnica pudesse fazer bom uso do seu levantamento de informações, da sua interpretação de dados e resultados, e para ter acesso a dados de outra forma indisponíveis e que custam tempo e muito retrabalho.

Os relatórios técnicos, sob um estrito escrutínio acadêmico, não apresentam, em geral, uma contribuição científica original que lhes garanta o status de artigo técnico-científico passível de ser aceito por uma revista científica. Talvez esse filtro acadêmico seja uma das justificativas para que os relatórios técnicos sejam mantidos somente nas estantes daqueles que compraram o trabalho. Ou talvez a falta de permissão por parte dos proprietários do documento para que os resultados sejam tornados públicos. A lista de motivos pode se estender, mas sempre empalidece diante dos ganhos que sua publicação traz para a sociedade.

Desta forma, a publicação deste estudo de caso “Interferência da atividade minerária argileira nos recursos hídricos da Bacia do Ribeirão Santa Gertrudes, SP”, disponibilizado pelos colegas Flávio de Paula e Silva e Hung Kiang Chang, é uma novidade auspiciosa e que merece ser aplaudida e replicada. E a iniciativa da ABAS – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas de distribuir graciosamente o documento não é menos louvável.

Os autores contaram com a colaboração de um time de alto nível de técnicos do LEBAC – Laboratório de Estudos de Bacias e do DAEE-SP, que resultou num documento compreensivo e abrangente, que poderá servir de fonte de informação para trabalhos futuros, além de modelo de relatório técnico bem feito.

Que muitos outros autores de relatórios técnicos sigam este belo exemplo e facultem ao público técnico a possibilidade de acesso aos seus trabalhos. Parabéns.

Everton de Oliveira

AGRADECIMENTOS

É impossível desenvolver um trabalho de qualidade, que congregue diferentes especialidades, sem a participação efetiva e crítica de técnicos de larga experiência e indubitável competência nos temas conectados à área das ciências hidrogeológicas, como os discutidos neste livro. De fato, sem a participação e colaboração desses especialistas, este livro não teria a relevância que merece.

Assim, os autores agradecem ao Cientista de Computação MS. Dagmar Carnieri Neto (LEBAC-UNESP), ao Engenheiro Dr. Miguel Angel Alfaro Soto (LEBAC-UNESP), ao Geólogo Dr. Didier Gastmans (CEA-UNESP) e ao Engenheiro Dr. Gré de Araújo Lobo (CTH-DAEE) pela inestimável contribuição.

Os autores também agradecem o apoio do Geólogo Claiton Antonio Tamborim, do Engenheiro Almir Guilherme e do Geólogo Jose Pedro Nicola.

UNESP – Universidade Estadual Paulista

LEBAC – Laboratório de Estudo de Bacias

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo

CTH – Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos – USP/DAEE

PRÓLOGO

Este livro teve sua origem em estudos hidrogeológicos exigidos pela CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo –, em 2004, com a finalidade de avaliar o impacto da lavra de argila nos recursos hídricos, superficiais e subterrâneos da Bacia do Ribeirão Santa Gertrudes, na área do complexo ceramista de Santa Gertrudes, Estado de São Paulo.

O estudo foi conduzido por especialistas em recursos hídricos do Laboratório de Estudo de Bacias (LEBAC), da Universidade Estadual Paulista (UNESP), com a participação de especialistas do Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos (CTH/USP/DAEE). Foi finalizado em 2005 com a apresentação do relatório intitulado “Interferências da atividade minerária argileira nos recursos hídricos da Bacia do Ribeirão Santa Gertrudes – SP” (FUNDUNESP, 2005).

Os resultados dos estudos contribuíram para o melhor entendimento do comportamento dos recursos hídricos em áreas de mineração de argila, fornecendo subsídios técnicos para a aplicação de políticas de gestão ambiental sustentável. Decorridos mais de dez anos de sua apresentação, o estudo continua sendo uma referência importante nessa área.

Por esta e outras razões, que incluem a disseminação e livre acesso ao conhecimento científico, os autores se propuseram a adaptar o estudo original para uma linguagem acessível aos leitores e disponibilizá-lo, em formato de livro, para toda a comunidade de geocientistas e ambientalistas, especialmente para aqueles envolvidos com a gestão sustentável de recursos hídricos, e para o público em geral.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	9
INTRODUÇÃO.....	11
HISTÓRICO DO PROCESSO.....	13
ARCABOUÇO GEOLÓGICO	15
ARCABOUÇO HIDROGEOLÓGICO.....	17
ATIVIDADES DESENVOLVIDAS.....	18
Reconhecimento Hidrogeológico	18
Poços de Monitoramento.....	19
Monitoramento das Chuvas (Pluviometria).....	21
Monitoramento das Vazões Superficiais	23
Análise de Águas Subterrâneas	29
Análise de Águas Superficiais	30
Determinação da Condutividade Hidráulica do Meio Não Saturado	31
Determinação da Condutividade Hidráulica do Meio Saturado.....	32
Determinação da Granulometria de Amostras de Solo	33
Determinação da Porosidade Total e Efetiva de Amostras de Solo.....	34
Mesa de Tensão.....	35
Papel Filtro	35
Propriedades de retenção de água no solo	36
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	37
Pluviometria	37
Monitoramento do Nível de Água Subterrânea	42
Hidroquímica das Águas Subterrâneas e Superficiais	48
Águas Subterrâneas.....	48
Águas Superficiais.....	52
Condutividade Hidráulica do Meio Não Saturado.....	57
Condutividade Hidráulica do Meio Saturado	58
Análises Granulométricas	59
Porosidade Total e Efetiva.....	60
Monitoramento Fluviométrico.....	63
Estimativa das Perdas Hídricas Anuais	67
Método 1 - Perda por Remoção do Solo.....	67
Método 2 - Perda por Evaporação nas Cavas	69

Método 3 - Perda por Déficit de Escoamento Total	70
Avaliação das Perdas Hídricas	71
CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

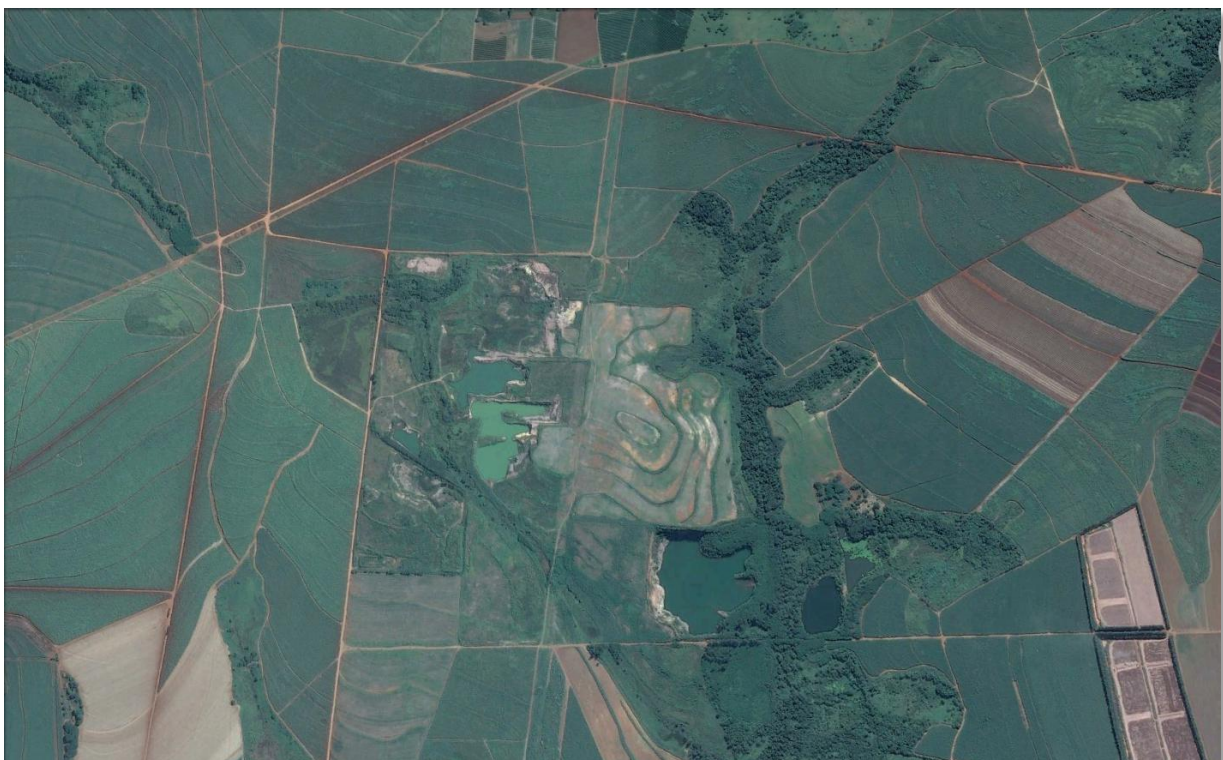


Imagem do Google Earth da área do Polo Ceramista de Santa Gertrudes, em 2016.

INTRODUÇÃO

O Polo Ceramista de Santa Gertrudes, situado na porção centro-leste do Estado de São Paulo, congrega a maior concentração de empresas de revestimentos cerâmicos do Brasil, configurando-se como um dos casos mais notáveis de aglomeração produtiva de base mineral do país (Cabral Jr. *et al.*, 2013).

As principais atividades produtivas desse polo mineiro estão concentradas num raio de 30 km a partir da área urbana de Santa Gertrudes e estendem-se aos municípios de Rio Claro, Cordeirópolis, Limeira, Ipeúna, Piracicaba e Araras (Figura 1).

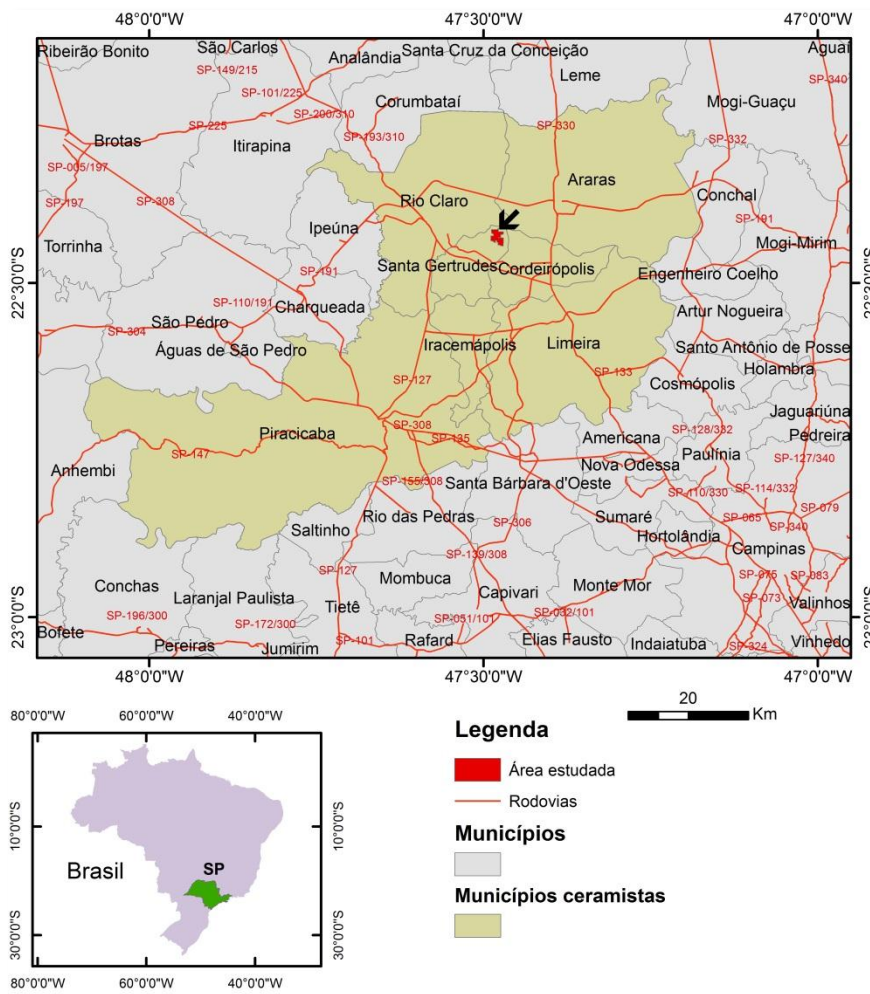


Figura 1 - Localização dos principais municípios mineiros do centro-leste paulista, integrantes do Polo Ceramista de Santa Gertrudes, e da área estudada.

O crescimento da demanda do mercado ceramista e a consequente degradação ambiental imposta pela extração de argila no Polo Ceramista de Santa Gertrudes suscitaram nos órgãos estaduais de controle ambiental preocupação com eventuais danos que poderiam

ser imputados, permanentemente, aos recursos hídricos da Bacia do Ribeirão Santa Gertrudes, com reflexos negativos na qualidade e na quantidade das águas captadas para abastecimento público.

Com a finalidade de avaliar o impacto da lavra de argila nos recursos hídricos, superficiais e subterrâneos, a CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo – condicionou a liberação de futuras licenças de instalação e de operação das empresas mineradoras do polo à apresentação de um estudo hidrogeológico conclusivo.

Com duração de um ano hidrológico, o estudo iniciado em dezembro de 2004 e finalizado em dezembro de 2005 foi conduzido pelo Laboratório de Estudo de Bacias (LEBAC) da Universidade Estadual Paulista (UNESP). Caracterização dos parâmetros hidrodinâmicos do meio físico, análise da distribuição e intensidade das precipitações atmosféricas, análise do comportamento hidrológico dos cursos de água superficiais, avaliação da qualidade físico-química das águas subterrâneas e superficiais, e avaliação dos impactos nos recursos hídricos da bacia

hidrográfica do Ribeirão Santa Gertrudes, decorrentes das atividades minerárias, constituíram objetivos essenciais da pesquisa.

O texto apresentado contempla a integração das atividades de pesquisa desenvolvidas no âmbito do estudo e apresenta os resultados que consolidaram as conclusões nele expostas, incluindo sugestões de aproveitamento e de recuperação das áreas degradadas, posteriormente aprovadas pelos gestores ambientais e implementadas pelas empresas de mineração no polo argileiro.

De caráter pioneiro, o estudo contribuiu para um melhor entendimento da interação e comportamento dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Gertrudes, fornecendo os subsídios técnicos para a aplicação de políticas de gestão ambiental sustentável.



Cidade de Santa Gertrudes, Ribeirão Santa Gertrudes e a área do complexo ceramista estudada, em fotografia aérea tomada em 21 de setembro de 2000.

HISTÓRICO DO PROCESSO

A realização deste estudo hidrogeológico fez parte do processo iniciado pela CETESB para avaliar eventuais danos aos recursos hídricos da Bacia do Ribeirão Santa Gertrudes, causados pela atividade mineira de extração de argila.

Por solicitação da Gerência Regional da CETESB de Piracicaba, a Diretoria da Bacia do Médio Tietê (BMT) do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo – DAEE – encaminhou laudo de vistoria sobre os recursos hídricos na área do Polo Ceramista de Santa Gertrudes, em 14/10/2004. O laudo do DAEE concluiu pela necessidade de apresentação, por parte dos empreendedores ceramistas, de estudos hidrogeológicos e hidrológicos com intuito de avaliar a potencialidade (*sic*) hídrica da bacia do Ribeirão Santa Gertrudes.

Assessorados pela empresa HG – Geologia e Meio Ambiente Ltda., os empreendedores ceramistas reunidos protocolaram no DAEE/BMT os resultados dos estudos contemplando a “*Avaliação do Potencial Hídrico da Bacia do Ribeirão Santa Gertrudes*”, em 27/01/2004 (HG, 2004). Esta avaliação inicial concluiu que o complexo mineiro instalado não interferia nos recursos hídricos da bacia.

Após análise do referido estudo, o DAEE/BMT encaminhou à Gerência Regional da CETESB parecer técnico em 17/02/2004, concluindo que o complexo argileiro não afetava significativamente a potencialidade (*sic*) hídrica do Ribeirão Santa Gertrudes.

Em ofício datado de 31/03/2004, a CETESB solicitou esclarecimentos complementares sobre o parecer emitido pelo DAEE. Em ofício datado de 20/04/2004, o DAEE atendeu à solicitação da CETESB ressaltando que, apesar de aparentemente pouco significativas, as interferências hídricas no Ribeirão Santa Gertrudes, decorrentes da atividade de extração de argila, não deveriam ser desconsideradas, findando por sugerir outros estudos para

obtenção de elementos técnicos necessários a uma avaliação efetiva.

Por seu turno, o extinto DEPRN – Departamento Estadual de Proteção de Recursos Naturais – emitiu parecer em 14/05/2004 condicionando a renovação da Licença de Operação aos resultados dos estudos hidrológicos e hidrogeológicos a serem realizados pelos mineradores, limitando as Licenças de Instalação de ampliações somente para extração do minério em cotas superiores às das áreas de proteção permanentes (APPs).

Em laudo intitulado “*Análise dos Impactos da Exploração do Complexo Argileiro na Vazão do Ribeirão Santa Gertrudes – Parecer Técnico, Jurídico e Institucional*” (Mariano & Herrmann, 2004), os autores apontaram que o impacto sobre os recursos hídricos superficiais na Bacia do Ribeirão Santa Gertrudes é função da vazão específica (ou contribuição unitária) do fluxo de base, tomando-se como referência a vazão mínima anual de sete dias consecutivos ($Q_{7,10}$).

Em atendimento à solicitação da Prefeitura Municipal de Santa Gertrudes, o Laboratório de Estudo de Bacias da UNESP (LEBAC) elaborou pareceres técnicos preliminares para a Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo (Fundunesp, 2004; 2005), avaliando as interferências da atividade minerária argileira nos recursos hídricos da Bacia do Ribeirão Santa Gertrudes.

Os referidos documentos apresentaram considerações embasadas em estudos anteriores do DAEE, em informações disponíveis na literatura técnica, em experiência profissional e em observações realizadas *in loco* na área do complexo minerário.

Fundamentado nos pareceres elaborados pelo LEBAC, o DAIA (Departamento de Avaliação de Impacto Ambiental), órgão vinculado à Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo

(SMA), exigiu das empresas mineradoras do Complexo Ceramista de Santa Gertrudes a elaboração de estudos hidrológicos e hidrogeológicos, com a finalidade de avaliar as interferências da extração mineral nos recursos hídricos da bacia do Ribeirão Santa Gertrudes.

Os estudos hidrogeológicos e hidrológicos realizados foram patrocinados pelo grupo de empresários do ramo ceramista, cujas áreas de extração situam-se na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Gertrudes, relacionados no Quadro 1.

Quadro 1 - Empresas de mineração financiadoras dos estudos hidrogeológicos e hidrológicos no Complexo Ceramista de Santa Gertrudes

Empresas financiadoras
André L. Ramos Argileira Fl. (Processos DNPM 820.521/99, 820.291/99, 820.244/99 e 820.160/03)
Boa Vista Extração Beneficiamento e Comércio de Argila Ltda. (Processos DNPM 820.566/92 e 821.415/99)
Incopisos Indústria. e Comércio de Pisos Ltda. (Processos DNPM 820.428/04 e 820.309/03)
Irmãos Granusso Santa Gertrudes Ltda. Processos DNPM 820.524/99 e 821.414/99)
Mineração Formigres Ltda. Processos DNPM 820.523/99 e 820.776/03)
Mineração Dois Irmãos Ltda. (Processos DNPM 820.525/99, 821.162/99 e 820.290/99)
Santo Antonio Agropecuária Ltda. (Processos DNPM 821.163/99 e 820.289/99)
Cecaf Cerâmica Carmelo Fior. (Processos DNPM 820.368/04 e 820.429/04)
Marcelo Ramos. (Processo DNPM 820.742/04)



Cava de mineração na área do polo ceramista inundada por águas pluviais.

ARCABOUÇO GEOLÓGICO

Implantado sobre relevo de degradação de conjunto sedimentar e vulcânico da Depressão Periférica Paulista, o Complexo Ceramista de Santa Gertrudes assenta-se, predominantemente, sobre rochas pelíticas da Formação Corumbataí, unidade geológica que serve de matéria-prima

para produção de cerâmica na região. A Formação Corumbataí pertence ao Grupo Passa Dois, nome utilizado para designar o pacote sedimentar permiano da Bacia Sedimentar do Paraná que reúne, ainda, as formações Irati, Serra Alta, Teresina e Estrada Nova (Figura 2).

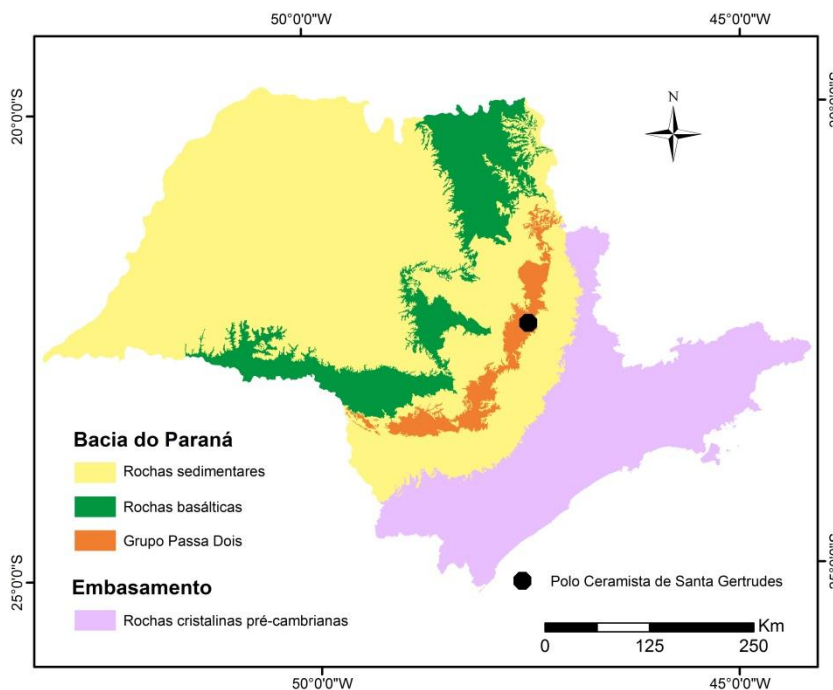


Figura 2 – Área de ocorrência do Grupo Passa Dois no Estado de São Paulo.

Regionalmente, a Formação Corumbataí ocorre em faixa que se estende desde o Rio Tietê, passando por Piracicaba, Rio Claro, Leme, Pirassununga, Porto Ferreira e Tambaú, até próximo ao limite com o Estado de Minas Gerais (IPT, 1981). Os sedimentos afloram em largura variável de 5 km a 20 km, com extensão contínua de cerca de 150 km, cobrindo aproximadamente área de 2.000 km² no Estado de São Paulo (DAEE, 1981). Sua espessura média é de cerca de 250 metros nas áreas de afloramento, com tendência de aumento no sentido oeste, onde dá lugar às formações Teresina e Serra Alta (Figura 2).

A Formação Corumbataí é constituída de siltitos, lamitos e folhelhos de cores predominantemente lilás na região, com eventuais intercalações de corpos de arenitos finos. Os sedimentos pelíticos apresentam laminação plano-paralela e rítmica, estrutura *flaser* e fendas de ressecamento, enquanto os arenitos apresentam estratificação cruzada de pequeno porte e marcas onduladas. Suas características sedimentares se coadunam com depósitos formados em planícies de maré de ambiente marinho de águas rasas, relacionados a um sistema deltaico (Gama Jr., 1979).

Em escala de afloramento, ao longo dos taludes das cavas de exploração do complexo argileiro, os elementos estruturais mais frequentes constituem intrincados sistemas de fraturas e,

localmente, falhas de pequeno rejeito, cortando os sedimentos da Formação Corumbataí.

Na área da Bacia do Ribeirão Santa Gertrudes que comporta a porção do complexo argileiro estudada, a Formação Corumbataí recobre rochas da Formação Irati e, localmente, do Grupo Tubarão, com espessura média estimada em 200 metros (Figura 3).

Emoldurando os limites da bacia comparecem rochas intrusivas básicas da Formação Serra Geral (Figura 3). Essas rochas podem, ainda, aflorar em pontos localizados ou secionar o pacote sedimentar em vários níveis de profundidade, conforme atestado por perfurações de poços profundos para abastecimento público da cidade de Santa Gertrudes.

No extremo nordeste da bacia, ocorrem sedimentos arenosos atribuídos, segundo mapa elaborado pelo Instituto Geológico (1987), à Formação Pirambóia (Figura 3). Sedimentos aluvionares recentes foram reconhecidos e mapeados ao longo de algumas drenagens.



Argilitos e siltitos da Formação Corumbataí intensamente fraturados.

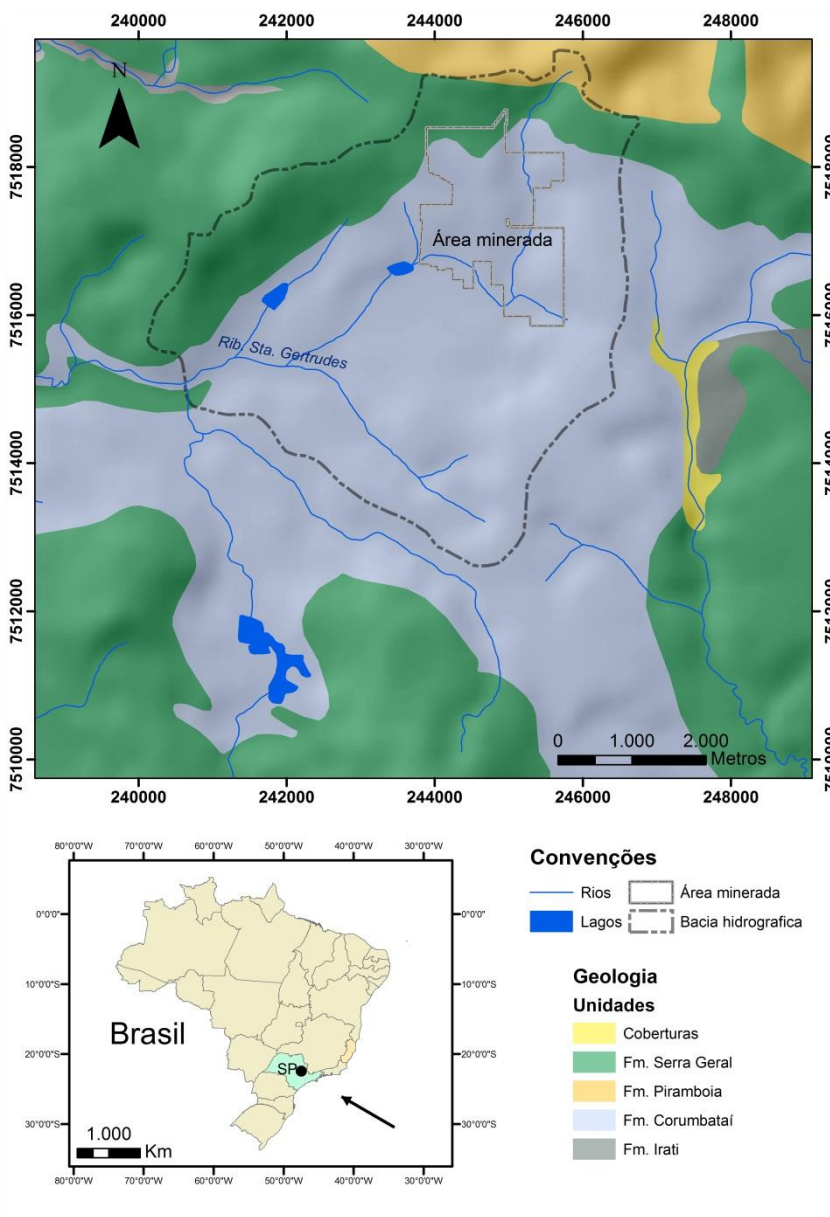
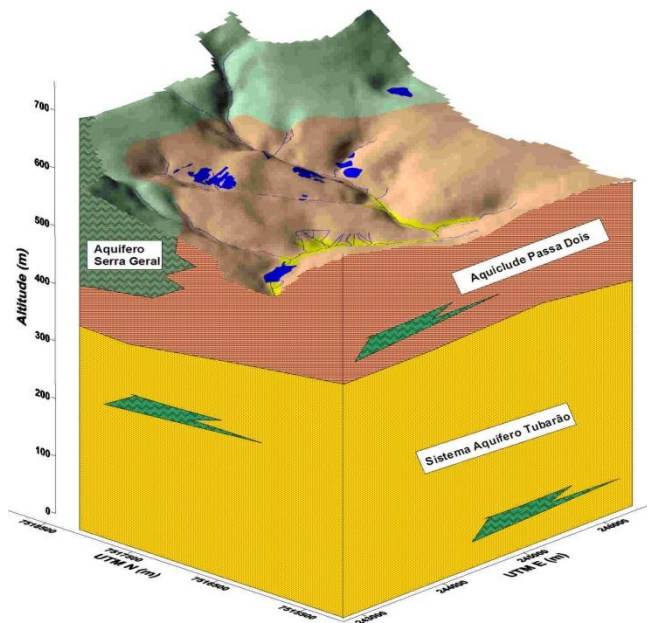


Figura 3 - Mapa geológico da área estudada do Complexo Ceramista de Santa Gertrudes, na bacia do Ribeirão Santa Gertrudes. Os limites da área minerada referem-se aos alvarás de pesquisa e de lavra do ano 2005.

ARCABOUÇO HIDROGEOLÓGICO

Em razão de suas características litológicas, o Grupo Passa Dois, que reúne os sedimentos das formações Irati, Serra Alta, Teresina e Corumbataí no Estado de São Paulo, assume regionalmente o comportamento de um aquífero ainda que, localmente, possa apresentar zonas aquíferas em bancos de calcário e zonas lamíticas fissuradas (DAEE, 1981; CETESB, 1997).

Os sedimentos predominantemente pelíticos desta unidade hidroestratigráfica constituem camada confinante que, ao contrário dos aquíferos, não tem capacidade de transmitir água (condutividade hidráulica muitíssimo baixa), ainda que possam apresentar porosidades elevadas.



Arranjo esquemático das unidades hidroestratigráficas presentes na área do Complexo Ceramista de Santa Gertrudes.

Exceções constituem eventuais corpos arenosos, descontínuos, de granulometria em geral fina, intercalados nesta sucessão. Zonas fraturadas e ou falhadas podem dar origem a porosidade e a permeabilidade secundárias, tornando estas rochas eventuais reservatórios de água, localizados e descontínuos, similares aos reservatórios formados por rochas cristalinas do

embasamento. Estudos regionais desenvolvidos pelo DAEE (1981) na região de afloramento da Formação Corumbataí obtiveram valores de transmissividade abaixo de 10 m²/d.

Confinado pelo Aquicludo Corumbataí e entrecortado por diversas intrusões de rochas básicas ao longo de seu perfil vertical, ocorrem os sedimentos componentes do Sistema Aquífero Tubarão, o mais importante reservatório de água subterrânea da região do polo ceramista. Este sistema, constituído pela Formação Tatuí e pelo Subgrupo Itararé no Estado de São Paulo, é composto de frequentes intercalações de materiais clásticos grossos e finos, com diferentes propriedades de permoporosidade que lhe conferem caráter heterogêneo e anisotrópico, as quais condicionam o armazenamento e a circulação de água subterrânea.

A espessura média do Sistema Aquífero Tubarão é de 400 metros nas áreas de afloramento, podendo atingir mais de 1400 metros em direção ao centro da bacia sedimentar. Estudos regionais realizados pelo DAEE (1981) apresentaram valores de transmissividade de 0,3 m²/d a 40 m²/d, distribuídos heterogeneamente por toda a área de ocorrência. O substrato deste sistema aquífero é constituído por rochas pré-cambrianas do embasamento cristalino na área do polo.

Em 2005, o município de Santa Gertrudes captava cerca de 80 m³/h de água subterrânea do Sistema Aquífero Tubarão por meio de poços tubulares, com profundidades variando de 200 metros até cerca de 300 metros, para abastecimento de setores específicos da cidade, os quais recebiam água superficial tratada somente em casos emergenciais de pane nos poços. Durante este mesmo ano, foi construído mais um poço profundo para abastecimento público, com profundidade de 350 metros e vazão informada de 60 m³/h, atestando o elevado potencial hídrico do Sistema Aquífero Tubarão.

ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

As atividades desenvolvidas pelo LEBAC para consecução dos estudos hidrogeológicos e hidrológicos realizados no Complexo Ceramista de Santa Gertrudes estão listadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Atividades desenvolvidas para consecução dos estudos hidrogeológicos e hidrológicos

Reconhecimento hidrogeológico da área
Instalação de poços de monitoramento do lençol freático
Instalação de pluviógrafo e pluviômetros para registro das chuvas
Instalação de estações hidrométricas para registro das vazões superficiais
Análise físico-química de amostras de águas subterrâneas e superficiais
Determinação da condutividade hidráulica do meio não-saturado
Determinação da condutividade hidráulica do meio saturado
Determinação da granulometria de amostras de solo
Determinação da porosidade total e efetiva de amostras de solo

Reconhecimento Hidrogeológico

A estreita relação entre unidades estratigráficas e hidroestratigráficas permite, numa primeira aproximação, distinguir formações ou partes destas, cujo comportamento hidrodinâmico se enquadre nas categorias de aquífero, aquífero confinado ou aquícluse.

O reconhecimento hidrogeológico da área do Polo Ceramista de Santa Gertrudes, auxiliado por informações extraídas de sondagens, evidenciou o predomínio de rochas pelíticas, siltíticas e argilosas da Formação Corumbataí e, subordinadamente, de rochas intrusivas básicas entremeadas aos sedimentos. Em termos regionais, essas rochas se enquadram como aquícluses.

Zonas fraturadas e ou falhadas podem dar origem a porosidade e permeabilidade secundárias, tornando estas rochas aquíferos eventuais.

O exame dos taludes das cavas mineradas mostrou reduzido número de fraturas com surgência de água, sugerindo que as estruturas constatadas estão, na maior parte, seladas e ou desconectadas hidráulicamente, restringindo ou impedindo a circulação da água subterrânea.



Zonas intensamente fraturadas em siltitos e argilitos da Formação Corumbataí, sem surgência de água.

Nos taludes adjacentes e em cota de piso inferior às áreas de proteção permanentes (APPs) não foram observadas surgências que configurassem drenagem direta do corpo de água superficial, através de fraturas interconectadas. Apenas em talude no extremo noroeste da área minerada foi constatada uma surgência com vazão estimada superior a 3 m³/h, resultante da interceptação da superfície topográfica com o lençol freático. Essa surgência acabou desaparecendo com a movimentação de terra para recuperação daquele setor do complexo minerário.



Poço do tipo cacimba perfurado em solo de alteração da Formação Corumbataí.

O capeamento de solo de alteração que recobre a Formação Corumbataí na área é delgado, do tipo argilo-siltoso, com espessuras variando de 2 metros a 7 metros, e média de pouco mais de 4 metros, de acordo com as sondagens e levantamentos prévios realizados durante a fase de pesquisa dos empreendimentos.

Apesar de ser um solo com características hidráulicas pobres (baixa condutividade em razão de seu elevado teor de argila), pode constituir aquífero localizado, de natureza livre. Esta zona aquífera é explorada, na área, por meio de poços rasos que abastecem pequenas propriedades rurais. A função principal da cobertura de solo que capeia a Formação Corumbataí é absorver a água da recarga direta proporcionada pelas precipitações atmosféricas e atuar como reguladora do fluxo subterrâneo que alimenta os pontos de descarga, no caso os corpos de águas superficiais. Nos períodos de estiagem, a água armazenada nessa cobertura é liberada gradativamente, indo contribuir com o fluxo de base dos cursos superficiais da área, caracterizando modelo de escoamento efluente.

Poços de Monitoramento

A instalação de poços teve a finalidade de extrair informações sobre as características do solo e das águas subterrâneas e monitorar as variações do nível de água durante um ciclo hidrológico anual, de modo a estabelecer relações entre a pluviometria da área e as variações volumétricas do meio físico saturado, decorrentes dos processos de recarga e de descarga naturais. O registro dos níveis de água, no caso do solo apresentar comportamento de aquífero, também permite o estabelecimento da configuração da superfície freática e do sentido de fluxo das águas subterrâneas na bacia hidrográfica.

A rede de poços de monitoramento foi implementada com a instalação de 20 unidades em dezembro de 2004, e com o aproveitamento

de um poço do tipo cisterna (P-21), utilizado para abastecimento de uma colônia rural (Figura 4).

Os poços foram perfurados com diâmetro de 4 polegadas, por meio de sistema rotativo a trado, sem utilização de fluido, e revestidos com tubos de PVC de 2 polegadas, tendo o intervalo basal coberto por seção de filtro de 1 metro de comprimento. O espaço anular foi preenchido com o próprio material extraído da perfuração, exceto no intervalo anular frontal aos filtros que foi preenchido com material granular selecionado (pré-filtro). No intervalo superior, o espaço anular foi preenchido por argamassa de cimento. Na superfície, ao redor dos poços, foram construídas lajes de concreto para evitar entrada direta de águas pluviais (Figura 5 e 6).

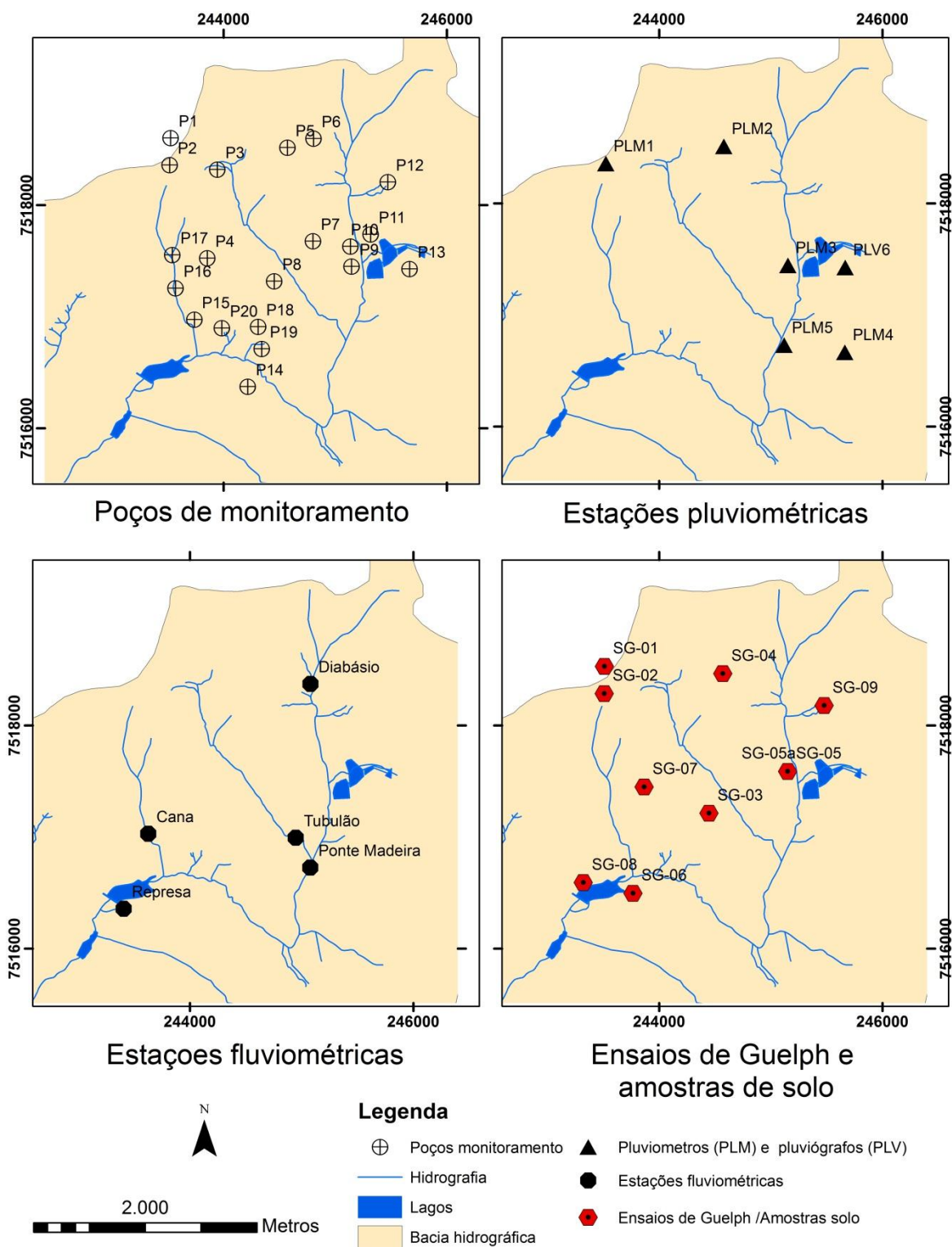


Figura 4 – Localização dos poços de monitoramento, das estações pluviométricas, das estações fluviométricas e dos pontos de ensaio com permeâmetro Guelph.

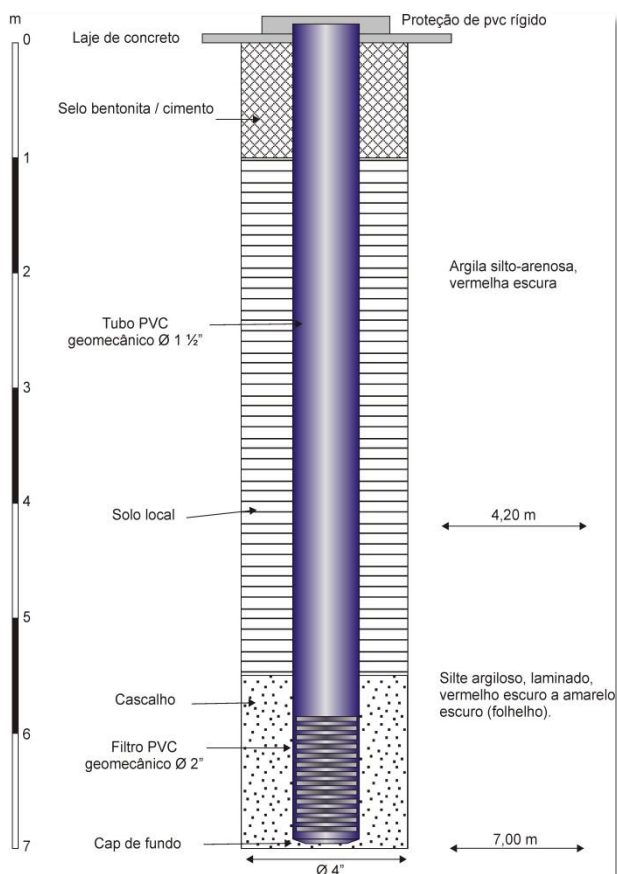


Figura 5 – Perfil construtivo do poço de monitoramento P-1.

Na cabeça dos poços foram instalados dispositivos de proteção com tampas fechadas por cadeados. A profundidade máxima alcançada pelos poços foi considerada como sendo a superfície limítrofe entre as zonas de solo e de rocha sã. Estabeleceu-se frequência semanal a quinzenal para monitoramento das variações do nível de água dos poços. Para medição manual dos níveis foi utilizado equipamento elétrico constituído de fita graduada em centímetros. A profundidade do nível de água é indicada pela medida do comprimento da fita até o nível de água, a partir de uma superfície de referência.

Para monitoramento contínuo do nível de água, foi instalado no poço P-5 um transdutor de pressão conectado a *data logger*, programado para adquirir registros com frequência de 5 minutos. Posteriormente, em razão do furto do transdutor, optou-se por realizar o monitoramento de níveis no poço P-3, localizado em ponto menos acessível a transeuntes. O transdutor utilizado, modelo PDCR 1730, foi fabricado pela GE Druck.

Monitoramento das Chuvas (Pluviometria)

As precipitações são componentes primárias e essenciais do ciclo hidrológico. Entende-se por precipitação a água proveniente do vapor de água da atmosfera, depositada na superfície terrestre sob a forma de chuva, granizo, orvalho, neblina, neve ou geada. A medida das precipitações é expressa pela altura de água caída e acumulada sobre recipiente de superfície plana e impermeável. Para sua avaliação, foram instalados cinco pluviômetros e um pluviógrafo na área estudada (Figura 4).

Foram instalados pluviômetros ao lado dos poços de monitoramento P-2, P-5, P-9 e P-21. Posteriormente, em razão de problemas operacionais, o ponto P-21 foi abandonado e instalado um pluviômetro junto à estação pluviométrica denominada de Ponte de Madeira.

A frequência das leituras nos pluviômetros para avaliação das precipitações foi diária.

Os pluviógrafos registram, de modo contínuo, as variações de chuva ao longo do tempo. O pluviógrafo utilizado na pesquisa foi o *Squitter S1610*, com capacidade de registro de mais de vinte mil eventos de chuva e precisão de 0,25 mm. Este aparelho é composto de recipiente de alumínio contendo mecanismo de balança de equilíbrio instável e foi acoplado a *data logger* para aquisição dos dados (Figura 7). Instalado próximo ao poço P-13, o pluviógrafo registrou data e horário de cada evento de chuva, chuva instantânea, chuva acumulada, chuva acumulada da hora e chuva acumulada do dia.



A



B



C



D



E



F

Figura 6 – Instalação dos poços de monitoramento. Perfuração a trado (A, B); colocação do revestimento (C, D); colocação do pré-filtro (E); cimentação da laje de proteção e colocação da tampa com cadeado (F).



Figura 7 – Pluviógrafo para monitoramento das chuvas e notebook para transferência de dados.

Monitoramento das Vazões Superficiais

O monitoramento das vazões superficiais compreendeu a instalação de cinco estações hidrométricas, que constituem seções estabelecidas nos cursos de águas superficiais com o objetivo de obtenção sistemática de vazões ao longo do tempo, de modo a estabelecer a curva chave para cada bacia hidrográfica monitorada. Os locais selecionados para instalação das estações foram denominados “Diabásio”, “Tubulão”, “Ponte de Madeira”, “Represa” e “Cana” (Figura 4).

A Estação Diabásio (Figura 8) foi instalada à montante da área de mineração, próxima à cabeceira de uma das principais drenagens

responsáveis pela formação do Ribeirão Santa Gertrudes. A Estação Tubulão (Figura 9) foi instalada em drenagem afluente, próxima à confluência com o Ribeirão Santa Gertrudes. A Estação Ponte de Madeira (Figura 10) foi instalada no Ribeirão Santa Gertrudes, à jusante da Estação Diabásio, logo após a confluência com drenagem que passa pela Estação Tubulão. A Estação Represa (Figura 11) foi instalada à jusante da antiga barragem existente no Ribeirão Santa Gertrudes e à jusante da Estação Ponte de Madeira. A Estação Cana (Figura 12) foi instalada em bacia cercada de cana-de-açúcar, sem interferência da atividade minerária.



Figura 8 - Estação Diabásio: (A) vista do trecho selecionado para implantação da estação; (B) detalhe do córrego; (C) instalação do sistema de monitoramento; (D) vertedor instalado; (E) nivelamento do vertedor; (F) calibração da régua com transdutor.

As estações hidrométricas ou fluviométricas comportam dispositivos de medição do nível de águas superficiais, como réguas graduadas e/ou transdutores de pressão etc. As medições de vazão normalmente são executadas com o uso de molinete hidrométrico (Figura 13) ou de

vertedores especialmente projetados. A relação nível-vazão para cada estação deve ser estabelecida por medições diretas em situações de descarga variável, de tal forma que permita estabelecer uma relação gráfica denominada de curva-chave da seção.



Figura 9 - Estação Tubulão: (A) vista do córrego à jusante do tubulão; (B) vista do tubulão de passagem sob a estrada; (C) córrego à jusante do tubulão após chuvas; (D, F) implantação do vertedor.

No início dos trabalhos, em época coincidente com o período das chuvas, foi utilizado o molinete hidrométrico para cálculo das vazões. A equipe de hidrometria determinou, em cada visita, o nível de água, a área da seção transversal molhada do canal do rio e a medição das velocidades observadas em vários pontos específicos da

seção medida. As velocidades e as áreas foram medidas em pontos selecionados por critérios técnicos definidos pela ANA (Agência Nacional de Águas), baseados em normas da OMM (Organização Meteorológica Mundial) e USGS (United States Geological Survey).

Posteriormente, a partir do final de julho de 2005, as vazões das estações Diabásio e Tubulão passaram a ser avaliadas com o emprego de vertedores especialmente projetados, assim como na Estação Cana, onde foram implementados em

fins de novembro de 2005. Estes dispositivos permitem o conhecimento da vazão pela simples medida do nível de água do volume represado à montante da estrutura.



Figura 10 - Estação Ponte de Madeira: (A, B) trecho selecionado para implantação da estação; (C) medições da seção transversal do córrego; (D) aspecto do córrego após chuvas; (E) nivelamento da régua; (F) régua de medição instalada.

Para as estações fluviométricas operadas manualmente foram realizadas medições diárias dos níveis de água, tomadas com base em régua graduada instalada na seção. Nas estações Diabásio, Ponte de Madeira e Cana foram instalados transdutores de pressão conectados a

data loggers, programados para aquisição de dados de nível de água em intervalos de 5 minutos. Esses dados foram periodicamente descarregados para um computador portátil e armazenados em planilha eletrônica para análises e interpretação.



Figura 11 - Estação Represa: (A) tubulão de passagem na saída da represa; (B) córrego à jusante da represa; (C, D) medições da seção transversal do córrego; (E) nivelamento da régua; (F) régua de medição instalada.



Figura 12 - Estação Cana: (A) vista da bacia; (B) detalhe do córrego; (C) medições da seção transversal do córrego; (D) detalhe da régua instalada; (E, F) vertedor instalado.



Figura 13 - Molinetes hidrométricos utilizados para medição da velocidade de fluxo de águas superficiais.

Análise de Águas Subterrâneas

As análises de amostras de água dos poços de monitoramento tiveram por finalidade determinar o padrão hidrogeoquímico das águas subterrâneas e estabelecer sua relação com o meio físico, mediante a identificação e a quantificação das principais espécies químicas dissolvidas.

A evolução hidrogeoquímica da água subterrânea conduz, em geral, ao incremento das concentrações das substâncias dissolvidas, na medida em que percola diferentes camadas de solo ou flui através do meio físico no sentido natural do fluxo subterrâneo. Outros fatores tais como clima, composição da água de recarga, tempo de residência e contaminação antrópica podem interferir nas características hidroquímicas originais da água subterrânea.

Foram realizadas duas campanhas de análises hidroquímicas de amostras extraídas dos poços de monitoramento, sendo uma no período das chuvas e outra na época da estiagem. Em razão da insuficiência de volume ou ausência de água, as análises físico-químicas da primeira campanha (fevereiro de 2005) só puderam ser realizadas para os poços P1, P3, P5, P6, P11, P17, P18, P19 e P20. A segunda campanha foi realizada em abril de 2005, com a repetição dos pontos de amostragem da primeira campanha, somando-se

àqueles os poços P12, P13, P15 e P21, além de uma surgência localizada próxima ao P11.

As análises foram efetuadas no Laboratório de Hidroquímica do Departamento de Geologia Aplicada da UNESP de Rio Claro, sendo determinados os seguintes parâmetros físico-químicos: temperatura, condutividade elétrica, pH, alcalinidade, cloreto, fluoreto, sulfato, nitrato, sódio, potássio, sílica, magnésio, cálcio, estrôncio, cobalto, manganês, cobre, fósforo, zinco, chumbo, alumínio, bário, cádmio, níquel, ferro e cromo.



Laboratório de hidroquímica da UNESP.

As amostras de água dos poços foram coletadas com a utilização de *bailer* descartável, acondicionadas em frascos apropriados de polietileno e mantidas sob refrigeração para transporte até o laboratório. Foram coletadas duas alíquotas de amostras, totalizando 1 litro.

No laboratório, as amostras foram filtradas em filtro *Milipore*® de abertura 0,45 µ, sendo uma alíquota da amostra (0,5 L) preservada com ácido nítrico até pH<2 para análise de cátions, e uma segunda alíquota mantida apenas sob refrigeração para a análise de ânions. Os métodos empregados para determinação dos diversos parâmetros foram baseados no *Standard Methods for the Examination for the Water and Wastewater*.

A determinação de cátions foi efetuada por dois métodos: sódio e potássio foram analisados por espectrometria de absorção atômica, com a utilização do equipamento CBC/906; cálcio, ferro, magnésio, manganês, estrôncio, bário, cobre,

zinco, chumbo, silício e alumínio foram analisados por espectrometria de indução em plasma, com o equipamento ARL/3410.

A alcalinidade foi determinada por métodos potenciométricos. Os ânions cloreto, nitrato e sulfato foram determinados por colorimetria, e fluoreto por eletrodo de íon seletivo. Os parâmetros condutividade elétrica, pH e temperatura foram medidos em laboratório, utilizando-se equipamento portátil.

O tratamento dos resultados analíticos incluiu a determinação dos erros de balanço iônico e a caracterização dos tipos hidroquímicos com emprego de diagramas de *Piper* e de *Stiff*.

Análise de Águas Superficiais

As análises físico-químicas dos cursos de água superficiais que drenam parte da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Gertrudes tiveram como objetivo determinar o padrão hidroquímico e o teor de sólidos totais em suspensão, tendo em vista que sofrem influência imediata da atividade minerária de argila. Foram realizadas coletas de amostras nas estações Diabásio, Tubulão, Ponte de Madeira e Represa.

Inicialmente, foram realizadas análises físico-químicas completas durante os 3 primeiros meses de 2005, sendo analisados os parâmetros: temperatura, condutividade, pH, cor, turbidez, alcalinidade total, cloreto, sulfato, fluoreto, nitrato, sólidos totais em suspensão (STS), sólidos totais (ST), sódio, potássio, sílica, magnésio, cálcio, estrôncio, cobalto, manganês, cobre, fósforo, zinco, chumbo, alumínio, bário, cádmio, níquel, ferro e cromo.

Posteriormente, foram realizadas apenas análises mensais dos parâmetros turbidez e sólidos totais em suspensão (STS), com a finalidade de avaliar eventuais alterações físicas nas águas superficiais provocadas pela atividade de mineração.

As análises visaram, ainda, obter informações sobre a influência do substrato geológico no perfil hidroquímico das águas superficiais, uma vez que estes corpos hídricos nascem em compartimentos geológicos distintos e atravessam diferentes unidades estratigráficas em seu percurso, além de estimar o volume de sedimentos carreados provenientes da área lavrada. A comparação entre resultados das análises de amostras de água dos rios e dos poços auxilia no entendimento da evolução química das águas subterrâneas e da participação efetiva dessas águas no escoamento de base dos rios.

O processo de preparação das amostras foi o mesmo utilizado nas águas subterrâneas, tendo sido retirada alíquota adicional não filtrada, com volume de aproximadamente 0,5 L, para análise de cor, turbidez e sólidos totais em suspensão. Os métodos empregados para a determinação dos parâmetros físico-químicos basearam-se no *Standard Methods for the Examination for the Water and Wastewater*. A cor e a turbidez das amostras de água superficial foram determinadas por métodos colorimétricos e os sólidos totais em suspensão por métodos gravimétricos.

Determinação da Condutividade Hidráulica do Meio Não Saturado

As características de condutividade hidráulica do meio não saturado influem diretamente na capacidade de infiltração do solo. Infiltração é o processo pelo qual a água meteórica penetra através dos poros do solo, ficando armazenada em zonas aquíferas.

Para determinação da condutividade hidráulica do meio não saturado foi utilizado o permeômetro *Guelph* modelo 2800. Este equipamento foi desenvolvido por Reynolds & Elrick (1983) e aperfeiçoado, posteriormente por Reynolds *et al.* (1985). Consiste de um permeômetro de carga constante que trabalha sob o princípio do tubo de Mariotte, e permite determinar o potencial matricial de fluxo, sorção e condutividade hidráulica saturada, levando em consideração o efeito do fluxo não saturado (Figura 14).

Os resultados são interpretados de acordo com o modelo teórico desenvolvido por Reynolds & *et al.*

(1985), baseado na equação de Richards (1931), para fluxo permanente em furo cilíndrico. O fluxo permanente é expresso por uma equação, em que a vazão (Q) é composta por duas parcelas, sendo a primeira correspondente ao fluxo saturado e a segunda ao fluxo não saturado:

$$Q = \left(\frac{2\pi H^2}{C} + \pi a^2 \right) K_{fs} + \left(\frac{2\pi H}{C} \right) \phi_{Gm}$$

onde: Q (L³/T) é a vazão em regime permanente; K_{fs} (L/T), a condutividade hidráulica saturada de campo; ϕ_{Gm} (L²/T), o potencial matricial de fluxo; H (L), a altura de carga hidráulica; a (L), o raio do furo no solo; e C, o parâmetro fator de forma, que depende da relação H/a e do tipo de solo. Graficamente, a *Soilmoisture Equipment Corp* (1986) fornece o fator C para três classes de solos (macroporosidade e textura), mostrados no Figura 15.

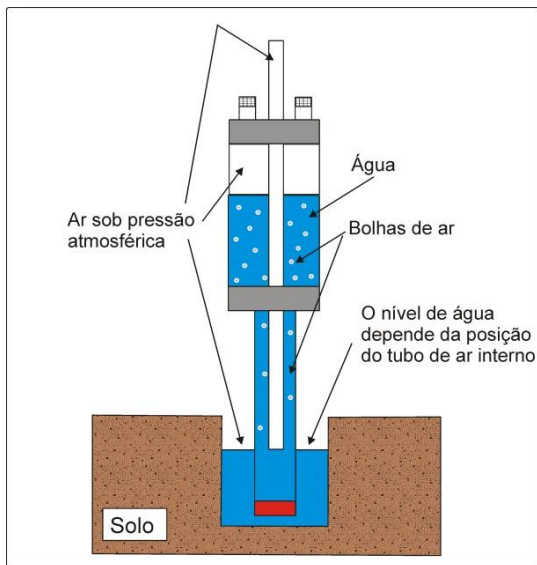


Figura 14 – Esquema de funcionamento do permeômetro *Guelph*.

O procedimento do ensaio requer, após análise e seleção dos locais, a realização de furos a trado com fundo plano. Quando se estabelece um nível da água (carga hidráulica) constante no interior do furo de trado, origina-se um “bulbo” de saturação da água a partir de sua base.

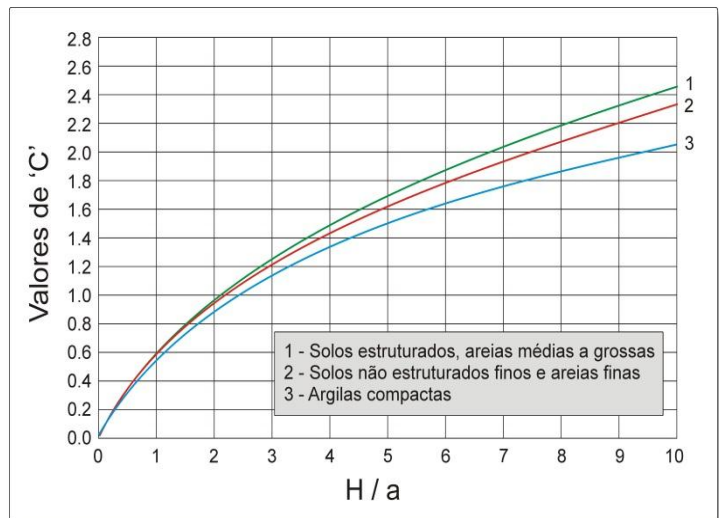


Figura 15 - Valores “C” (Soilmoisture, 1986).

O volume da água que infiltra no solo por unidade de tempo (taxa de infiltração) torna-se constante após determinado tempo de estabilização. As características e dimensões deste “bulbo” de saturação da água, uma vez atingida a condição de estabilidade, variam com as características do solo ensaiado.

O valor da taxa de infiltração, associado às dimensões do furo e à altura da coluna da água no seu interior, permitem o cálculo da

$$K = [(0,0041.X.R_2) - (0,0054.X.R_1)] \text{ ou } K = [(0,0041.Y.R_2) - (0,0054.Y.R_1)]$$

Onde: K é condutividade hidráulica em cm/s; R₁ e R₂ são taxas de infiltração estabilizadas correspondentes a H₁ e H₂, respectivamente, em cm/s; X e Y são constantes correspondentes à

condutividade hidráulica *in situ*, através da seguinte expressão (Soil Moisture Corp., 1991):

área do tubo (reservatório da água) utilizado, em cm². Os valores adimensionais 0,0041 e 0,0054 podem ser obtidos da fórmula:

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi((2H_1 H_2 (H_2 - H_1)) + \alpha^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1))}$$

Onde: H₁ e H₂ é a altura d'água no furo para a primeira e a segunda medidas, respectivamente;

C é fator que depende da relação H/a; a= raio do furo (cm).

Determinação da Condutividade Hidráulica do Meio Saturado

Para a determinação da condutividade hidráulica do meio saturado foram realizados testes de *slug* nos poços de monitoramento. A determinação da condutividade hidráulica permite estimar a velocidade de fluxo da água subterrânea e as taxas de transporte de contaminantes. Essas informações são relevantes para análise de risco de áreas impactadas e na seleção dos métodos de remediação.

O teste consiste em introduzir ou retirar um sólido (*slug*) do poço, de forma que o nível de água seja, respectivamente, elevado ou rebaixado instantaneamente. O volume deslocado pelo sólido equivale à adição ou à retirada instantânea de água do aquífero. Monitorando o posicionamento do nível de água obtém-se uma curva de variação deste nível em função do tempo. Desta curva são extraídos os parâmetros que, juntamente com as características geométricas do poço, fornecem o valor de condutividade hidráulica do meio ensaiado.

Os métodos utilizados para interpretar os dados de testes de *slug* foram o de Hvorslev (1951) e o de Bouwer & Rice (1976). A determinação da condutividade hidráulica pelo método de Hvorslev (Figura 16) é efetuada através da seguinte fórmula:

$$K = \frac{r^2 \ln(L_e / R)}{2L_e T_0}$$

onde K é condutividade hidráulica (L/T); r é o raio do revestimento (L); R é o raio do poço (L); L_e é comprimento do filtro (L) e T₀ é o tempo (T) que leva para o nível de água cair 37 % da variação inicial.

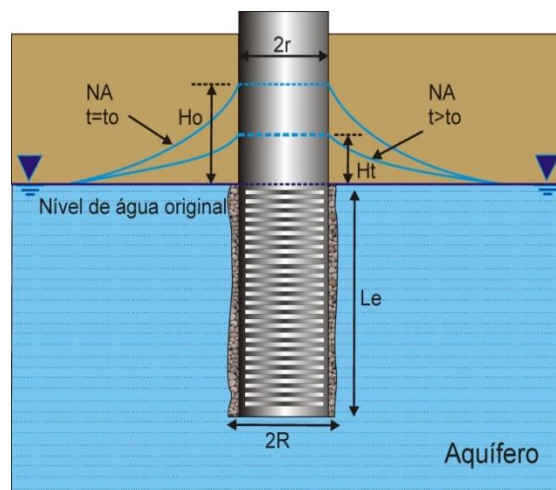


Figura 16 - Parâmetros geométricos para cálculo da condutividade hidráulica pelo método de Hvorslev (1951).

O método de análise de testes de *slug* elaborado por Bouwer & Rice (Figura 17) é utilizado no estudo de aquíferos rasos livres, onde os poços de monitoramento ou piezômetros penetram

parcial ou totalmente a porção saturada. A condutividade hidráulica pelo método de Bouwer & Rice é determinada pela seguinte fórmula:

$$Kr = \frac{r_c^2 \ln(R_e / R_w)}{2Le} \frac{1}{t} \ln\left(\frac{H_0}{H_t}\right)$$

Para $L_w < h$:

$$\ln \frac{R_e}{R_w} = \left[\frac{1.1}{\ln(L_w / R_w)} + \frac{A + B \ln[(h - L_w) / R_w]}{L_e / R_w} \right]^{-1}$$

Para $L_w = h$:

$$\ln \frac{R_e}{R_w} = \left[\frac{1.1}{\ln(L_w / R_w)} + \frac{C}{L_e / R_w} \right]^{-1}$$

Onde: Kr é componente radial da condutividade hidráulica (L/T); r_c é raio efetivo do revestimento (L); R_w é raio do poço (L); R_e é distancia radial efetiva onde a carga é dissipada (L); L_e é comprimento do filtro (L); t é o tempo desde $H=H_0$ (T); H_0 é a coluna de água no tempo $t=0$ (L); H_t é coluna de água no tempo $t=t$ (L); L_w é comprimento do poço (L); h é a espessura do aquífero (L); A , B e C são coeficientes empíricos (adimensionais).

O *slug* utilizado foi um cilindro de *nylon* de 1^{3/8} polegada de diâmetro e 1 metro de comprimento.

O volume do cilindro é igual a 983 cm³ (1 litro aproximadamente), correspondendo a um deslocamento do nível de água de 48 cm em um tubo liso de 2 polegadas de diâmetro interno.

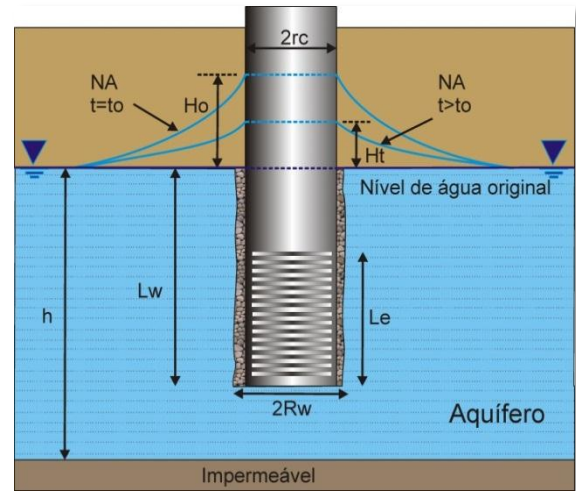


Figura 17 - Parâmetros geométricos para calcular a condutividade hidráulica pelo método de Bouwer & Rice (1976).

O monitoramento do deslocamento da água durante os ensaios foi efetuado por meio de um transdutor de marca DRUCK, modelo PTX 1830, com correção de barométrica automática, acoplado a um *notebook*. A leitura, o armazenamento e análise dos ensaios foram efetuados com auxílio do *software WinSlug®*.

Determinação da Granulometria de Amostras de Solo

Foram realizadas análises granulométricas em nove amostras de solo coletadas em locais próximos aos pontos onde foram feitos os ensaios de *Guelph*, segundo procedimentos sugeridos pela norma ABNT – NBR-7181/84, descritos abaixo.

O método de análise consiste na separação de uma porção de solo de umidade e massa conhecidas utilizando peneira de abertura 4,8 mm (# 4). O material retido na peneira é lavado com água destilada e secado na estufa até a constância do peso. O material passante é utilizado no ensaio de granulometria e deve ter massa de 70 g, aproximadamente.

A esse material são adicionados 125 cm³ de solução defloculadora de hexametáfosfato de sódio e deixado em repouso durante, no mínimo, 12 horas. Após esse período, o material é transferido para o dispersor, onde permanece por tempo não inferior a 10 minutos e depois é transferido para uma proveta. Na proveta é adicionada água destilada até completar 1000 cm³. Com auxílio de uma haste (contendo uma hélice no extremo), o material é agitado durante um minuto. Em seguida, com emprego de um densímetro, são realizadas leituras após 30, 60 e 120 segundos, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240 e 480 minutos.



Instrumentos utilizados para análises granulométricas (<http://www.test-lic.com>).

Em outra proveta contendo água destilada é medida simultaneamente a temperatura, admitindo-se ser igual à da amostra ensaiada.

Após a última leitura de densidade, é realizada a lavagem da suspensão na peneira de 0,075 mm. A porção retida é levada à estufa até secagem completa, sendo posteriormente peneirada e pesada (peneiras # 4, 10, 16, 30, 50, 100, 200) para obtenção das massas das respectivas partículas retidas em cada peneira e no prato. Os procedimentos de cálculo do ensaio podem ser encontrados em Nogueira (1998).

Determinação da Porosidade Total e Efetiva de Amostras de Solo

A quantidade de água armazenada no solo que pode ser liberada por drenagem gravitacional é função da porosidade efetiva, definida como a fração da porosidade total em que a água se movimenta livremente. É expressa por:

$$n_e = \frac{V_e}{V}$$

onde n_e representa a porosidade efetiva (%); V_e , o volume de água que pode ser liberado por drenagem gravitacional (L^3); V , o volume total considerado (L^3).

Na prática, costuma-se expressar este parâmetro em termos de umidade volumétrica utilizando a equação:

$$n_e = \theta_s - \theta_{cc}$$

Onde: θ_s representa a umidade volumétrica de saturação e θ_{cc} , a umidade volumétrica correspondente à capacidade de campo.

Fisicamente, a capacidade de campo equivale à retenção específica, que corresponde ao volume de água retido pelas forças moleculares e pela tensão superficial quando a água da zona saturada é drenada.

A capacidade de campo é um parâmetro que foi introduzido por Veihmeyer & Hendrickson (1931). Este parâmetro corresponde à quantidade de

água retida pelo solo após drenagem natural do excesso que, geralmente, ocorre de dois a três dias após a chuva ou irrigação em solos permeáveis, de estrutura e textura uniformes. Segundo Reichardt (1988), a capacidade de campo não se refere a uma característica intrínseca do solo, mas sim a um processo dinâmico da distribuição de água no perfil do solo.

Diversos métodos são disponíveis para sua determinação, no entanto, Reichardt (1996) considera que os métodos de campo são os mais recomendados. Todavia, estas técnicas demandam muito tempo e são laboriosas.

Já as técnicas de laboratório, ainda que limitadas pela assunção de valores de potencial ou sucção matricial (6, 10 ou 33 kPa) no cálculo da capacidade de campo, oferecem vantagens pela praticidade de sua determinação. Porém, as medidas de sucção, tanto em laboratório como em campo, esbarram numa série de dificuldades experimentais; em geral, deve-se recorrer a diferentes técnicas de ensaio para conhecer-se o potencial de sucção na capacidade de campo ou dentro de uma faixa ampla, suficiente para utilização prática. Entre as técnicas utilizadas na medição da sucção dos solos podem ser citadas: translação de eixos, osmótica, de controle de sucção por imposição da umidade relativa, do

papel filtro e de tensiômetros de alta capacidade, entre outros. Uma revisão mais detalhada dos diversos ensaios utilizados para este objetivo pode ser encontrada nos trabalhos de Hillel

Mesa de Tensão

A Mesa de Tensão é um equipamento utilizado para impor sucções matriciais de baixa ordem de grandeza e restringidas pela pressão de entrada de ar da interface entre a amostra de solo e a água (Figura 18).



Figura 18 – Mesa de tensão

Papel Filtro

O uso de papel filtro foi inicialmente proposto por Gardner (1937, *in* Marinho, 1994). O método consiste em colocar um papel filtro com características de retenção conhecidas numa vasilha hermética, juntamente com uma amostra de solo. Quando se atinge equilíbrio de umidade, torna-se possível determinar a sucção do solo usando-se uma curva de calibração prévia do papel. Os tipos de papéis mais usados são o Schleicher & Shuell nº 589 e o Whatman nº 42.

(1971), Aitchison (1965) e Soto (2004). Neste estudo, a porosidade efetiva foi determinada com auxílio de ensaios de mesa de tensão e de papel filtro.

É composta por duas câmaras, uma de ar e outra de água, separadas por um papel filtro. O papel filtro possui características de alta pressão de entrada de ar, isto é, permite apenas a passagem da água, sendo que a passagem do ar somente ocorre em função da capacidade do material que é estabelecido pelo fabricante. Uma vez que a pressão no ar é igual à pressão atmosférica, quando se aplica sucção matricial a uma amostra de solo, solicitada por uma coluna de água, a sucção matricial é dada por:

$$S_m = h$$

No procedimento de ensaio, amostras indeformadas (5 cm de diâmetro e 3 cm de altura) foram previamente saturadas e parte delas foi destinada à determinação do teor de umidade volumétrica de saturação (Θ_s) pelo método da estufa (Vilar & Bueno, 1995). As amostras restantes foram assentadas sobre papel filtro para imposição de sucções matriciais de 1, 2 e 4 kPa, com o intuito de determinar a capacidade de retenção nessas faixas de sucção.

O papel filtro pode ser usado para determinar a sucção matricial através do fluxo capilar, com contato direto através das partículas do solo e do papel filtro, sem que a água perca continuidade, implicando em interação entre o papel filtro e a água do poro.

Quando é medido através do fluxo de vapor, sem contato direto com o solo, as forças osmóticas e capilares que retêm a molécula de água são incorporadas e a medição feita é a sucção total.

No presente estudo, a curva de retenção foi realizada pelo processo de secagem e segundo procedimentos sugeridos por Marinho (1994). Os ensaios foram conduzidos com contato direto entre o papel e o solo para medição da sucção matricial, em toda a faixa a partir dos 10 kPa, uma vez que, para sucções menores, este método

Propriedades de retenção de água no solo

A relação entre teor de umidade e sucção do solo é uma característica do solo não saturado. Esta relação pode ser representada graficamente e descreve uma trajetória diferente, em função do acréscimo ou decréscimo (processos de secagem e umedecimento, respectivamente) de qualquer dos seus componentes.

Segundo Fredlund *et al.* (1994), a curva de retenção da água no solo pode ser definida como a variação da sucção com a capacidade de retenção da água nos macro e microporos do solo.

As relações de sucção (total, matricial ou osmótica) *versus* umidade (grau de saturação, teor de umidade volumétrica ou gravimétrica) são fundamentais na caracterização dos solos não saturados. A representação gráfica dessa relação é denominada “curva de retenção da água no solo” (Croney & Coleman, 1960).

A caracterização das curvas de retenção é feita a partir das trajetórias típicas obtidas em procedimentos de secagem e umedecimento. A Figura 19 mostra as características das curvas de retenção, tanto obtidas por umedecimento quanto por secagem, podendo-se verificar a histerese associada às duas formas de obtenção.

Na Figura 19, Θ_s corresponde ao teor de umidade volumétrica de saturação para a curva obtida pelo processo de secagem; Θ'_s , ao teor de umidade volumétrica de saturação para a curva obtida pelo

pode apresentar limitações de medição. O papel empregado foi o Whatman nº 42 e as umidades de equilíbrio do solo foram relacionadas com suas respectivas sucções, a partir do teor de umidade do papel, utilizando as curvas de calibração provenientes de Chandler *et al.* (1992).

processo de umedecimento; $\Theta_s - \Theta'_s$ é o conteúdo de ar residual; “Pressão de entrada de ar” é a sucção correspondente ao início de entrada de ar; e Θ_r corresponde ao teor de umidade volumétrica residual.

Várias relações empíricas são utilizadas para estimar a curva de retenção de água, podendo-se citar as propostas por Brooks & Corey (1964), Van Genuchten (1980) e Fredlund *et al.* (1994).

A determinação da relação sucção *versus* teor de umidade (curva de retenção de água no solo) pode ser obtida em amostras de laboratório, assim como em campo. Sua realização consiste em medir ou impor uma determinada sucção ao solo e relacioná-la com sua respectiva umidade. Isto é realizado para diferentes estágios de sucção.

No presente estudo, após obtenção dos dados experimentais, a curva de retenção foi ajustada por regressão não linear a partir do modelo de van Genuchten (1980), dado pela equação abaixo, fornecendo os elementos necessários para determinação da porosidade efetiva.

$$W_r = W_s + \frac{W_s - W_r}{[1 + (\alpha\Psi)^n]^m}$$

onde W_r representa a umidade gravimétrica residual; W_s , a umidade gravimétrica de saturação; α , n e m , os parâmetros de ajuste; Ψ , a sucção matricial.

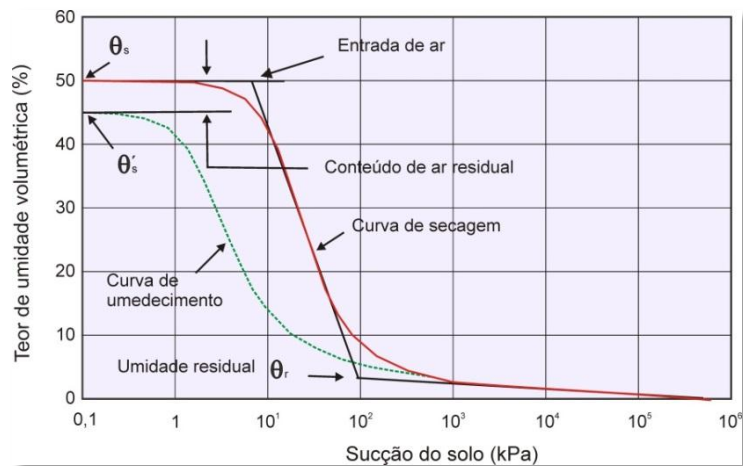


Figura 19 – Elementos da curva de retenção (Fredlund et al., 1994).

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados logrados com os estudos hidrológicos e hidrogeológicos realizados no Polo Ceramista de Santa Gertrudes.

Pluviometria

No período compreendido entre 16 de dezembro de 2004 e 20 de dezembro de 2005, o pluviógrafo instalado na bacia pesquisada (Plv-13, Figura 4) registrou eventos diários de chuva que, organizados em gráficos de período mensal (Figuras 20 e 21), refletem a aleatoriedade da frequência e intensidade das precipitações (o mês de dezembro de 2004 não foi representado). A precipitação total do ciclo anual compreendido por este período atingiu 1275 mm.

No período de 4 de janeiro a 24 de dezembro de 2005, também foram registrados dados de precipitação nos pluviômetros (Plm-2, Plm-5, Plm-9, Plm-21 e Ponte de Madeira), distribuídos pela área (Figura 4).

Para preencher lacunas, em razão de haver dias sem observação e corrigir registros tomados em intervalos de tempo diferentes, a metodologia utilizada baseou-se na proporcionalidade das precipitações de estações vizinhas, num mesmo período.

O coeficiente de proporcionalidade utilizado foi a relação entre as médias mensais, obtidas nos pluviômetros, e a média mensal registrada pelo pluviógrafo, ajustando a distribuição das precipitações em intervalos diários de 24 horas.

Os dados corrigidos de precipitação diária dos pluviômetros (Figura 22) mostram variações relativas com tendências concordantes, porém com valores absolutos distintos. Estes dados atestam a distribuição aleatória, em área, dos eventos de chuva, notoriamente discutida em compêndios básicos de hidrologia.

Pode haver diferenças entre as quantidades de chuva acumuladas nos pluviômetros e nos pluviógrafos, por várias razões. A ação dos ventos é a causa principal de erro nas medições dos pluviômetros, em consequência do desvio da trajetória das partículas de chuva. Também a obstrução ocasionada por folhas e insetos pode causar leituras errôneas nos pluviógrafos (Pinto et al., 1976).

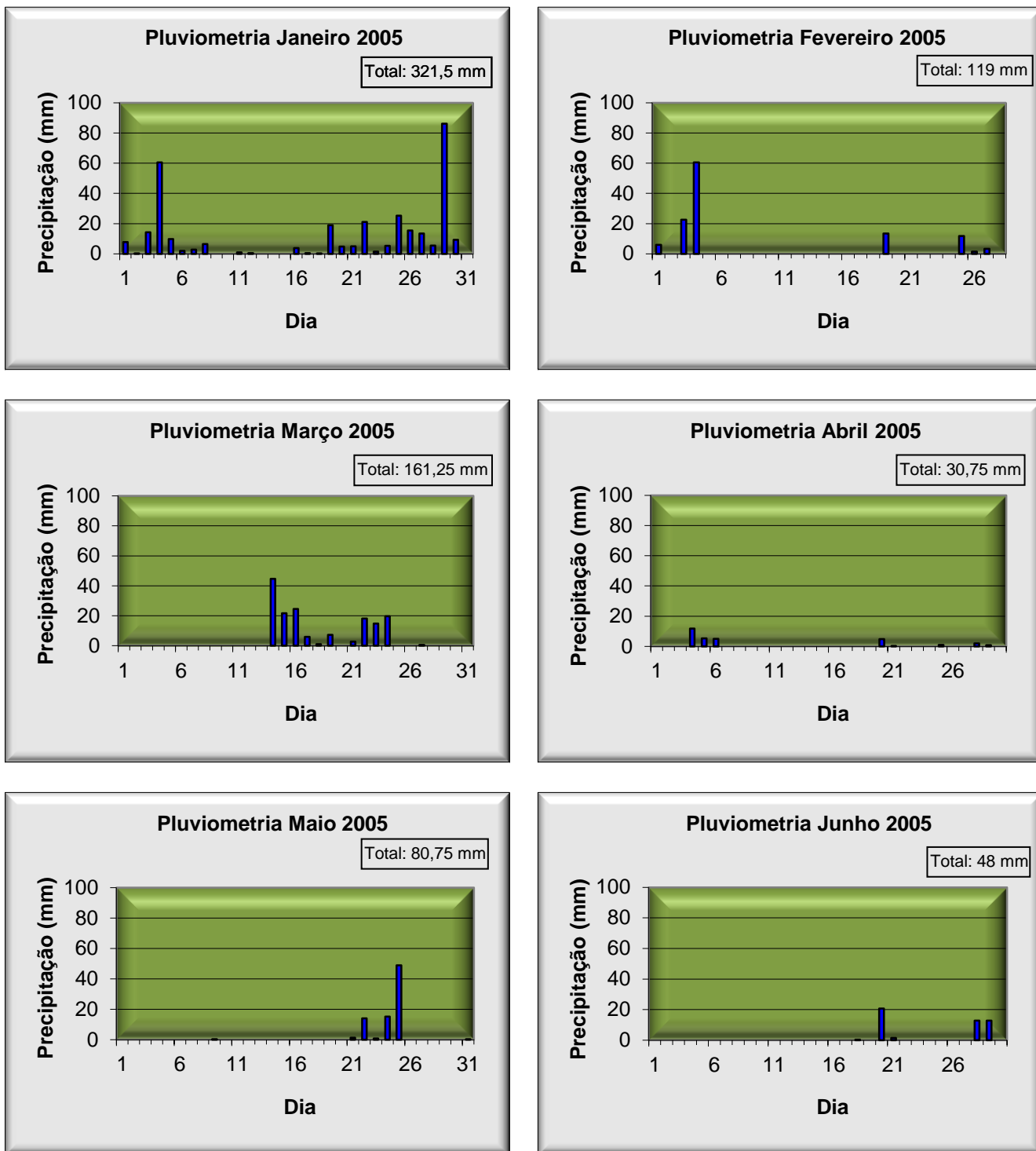


Figura 20 - Pluviometria diária registrada pelo pluviógrafo Pluv-13, nos meses de janeiro a junho de 2005.

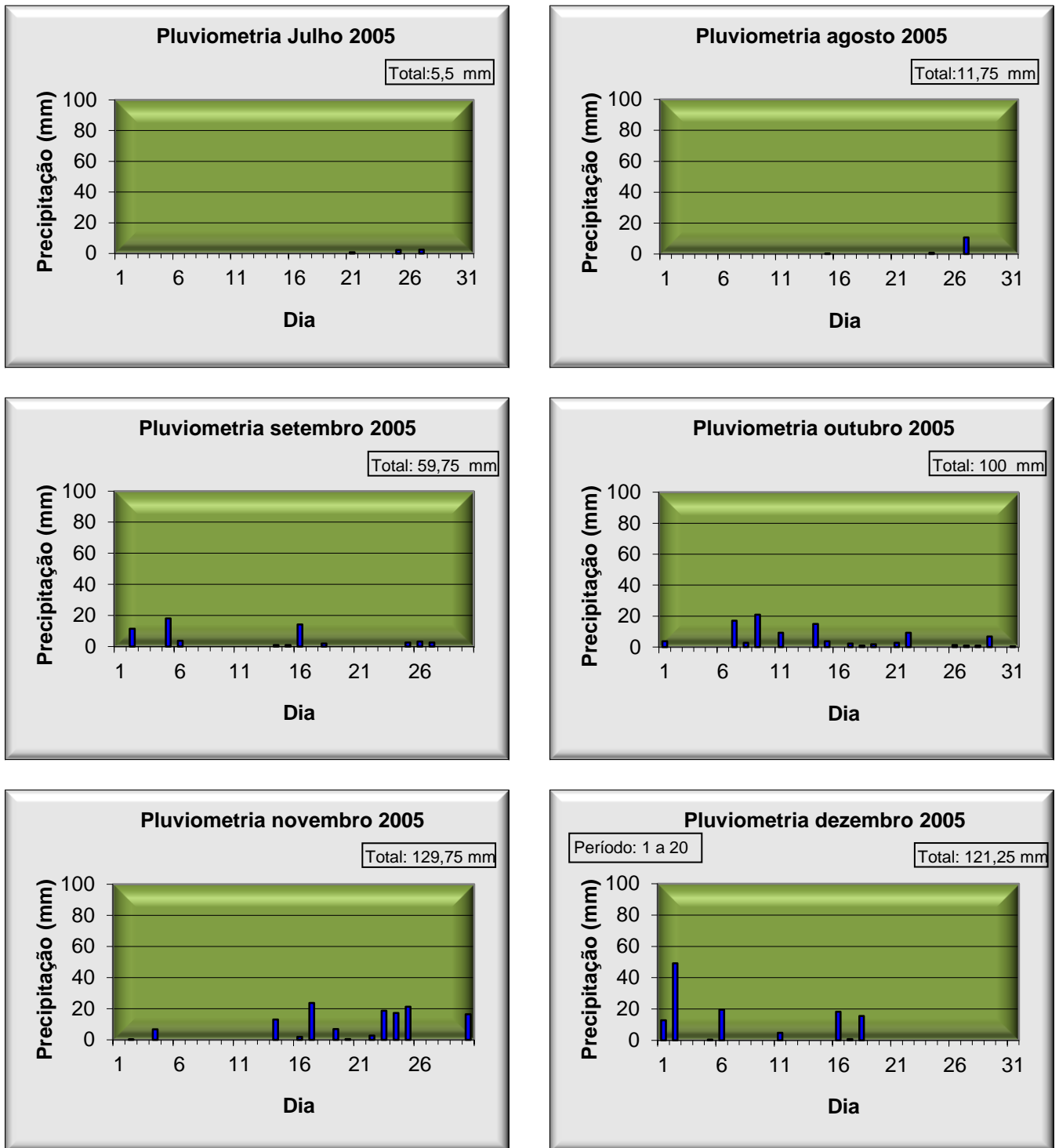


Figura 21 - Pluviometria diária registrada pelo pluviógrafo Pluv-13, nos meses de julho a dezembro de 2005.

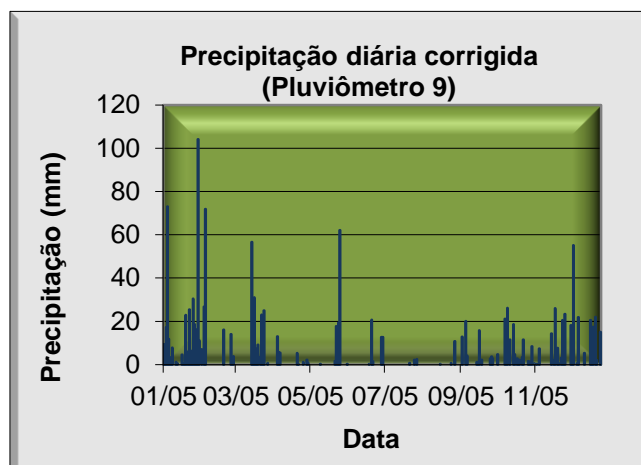
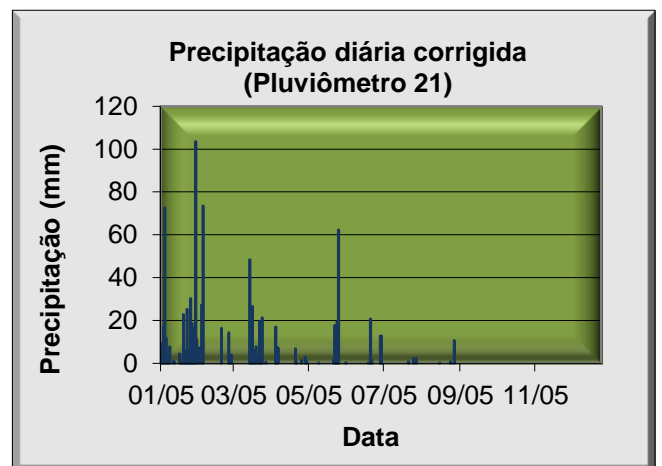
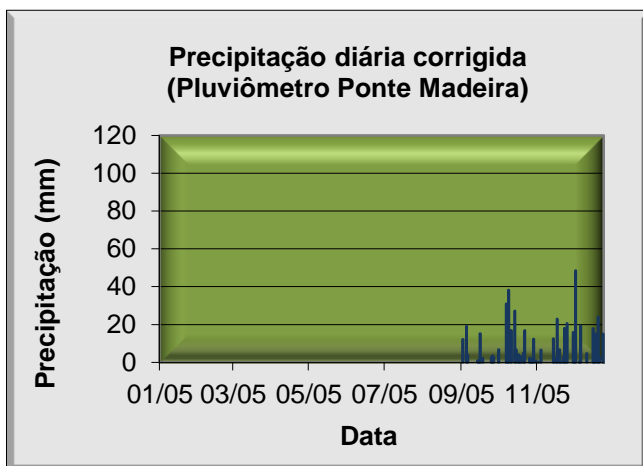
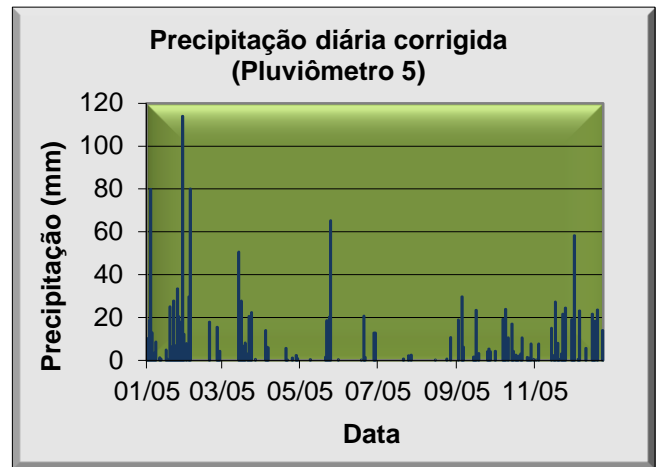
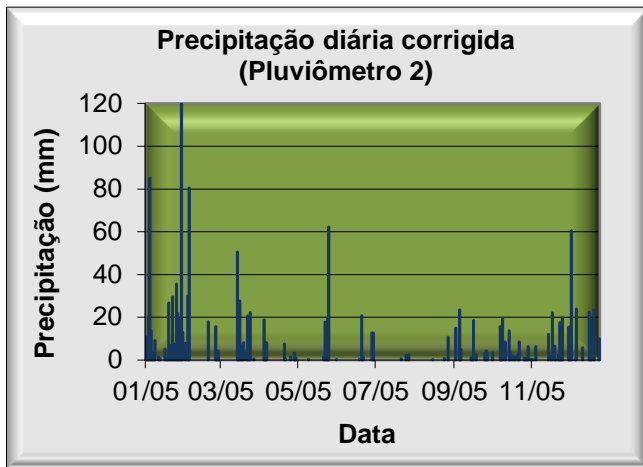


Figura 22 – Precipitações diárias corrigidas dos pluviômetros Plm-2, Plm- 5, Plm-9, Plm-21 e Ponte de Madeira.

A análise do conjunto de dados pluviométricos da bacia estudada acusou diferenças de leitura entre 21% e 28%, a mais, nos valores de precipitação anual registrados pelos pluviômetros, comparativamente ao valor registrado pelo pluviógrafo (Figura 23). Assim, nos pluviômetros

que registraram quantidade de dados muito próxima de um ciclo anual (Plm-2, Plm-5 e Plm-9), as variações de precipitação total situaram-se entre 1.189 mm e 1.517 mm (Quadro 3). A média da precipitação total ficou em 1.417 mm.

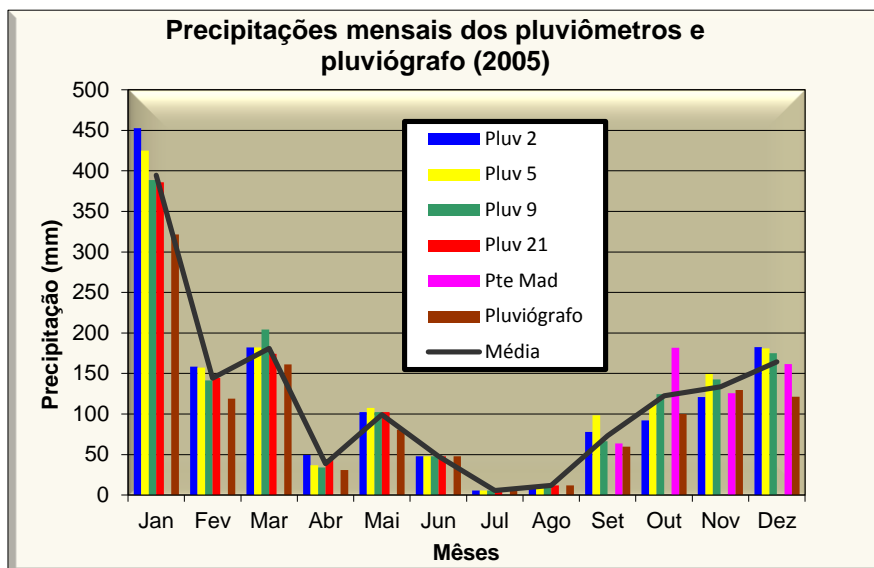


Figura 23 - Precipitações mensais e médias registradas nos pluviômetros e no pluviógrafo no ano de 2005. O mês de dezembro possui registros somente até o dia 20.

Quadro 3 - Precipitações mensais registradas na área estudada

Precipitações mensais registradas na área estudada							
Mês	Plm 2	Plm 5	Plm 9	Plm 21	Pte Mad	Plv	Média
Jan	452,8	424,9	388,5	385,9		321,50	394,7
Fev	158,3	157,4	141,6	144,6		119,00	144,2
Mar	182,35	182,35	204,28	174,43		161,25	180,9
Abr	49,3	36,7	33,9	44,3		30,75	39,0
Mai	102,5	107,5	102,5	102,5		80,75	99,2
Jun	48,0	48,0	48,0	48,0		48,00	48,0
Jul	5,50	5,50	5,50	5,50		5,50	5,5
Ago	11,8	11,8	11,8	11,8		11,75	11,8
Set	78,0	98,5	66,5		63,5	59,75	73,3
Out	92,0	113,5	124,5		181,8	100,00	122,4
Nov	121,00	149,50	142,50		125,50	129,75	133,7
Dez	182,5	181,0	175,0		161,5	121,25	164,3
Totais	1484,0	1516,5	1444,5			1189,3	1416,7

As médias mensais das precipitações registradas na bacia estudada (Figura 23) revelam que janeiro foi o mês mais chuvoso, atingindo 395 mm, mais de 50% superior à média da série histórica registrada pelo DAEE (2000), estimada em 255 mm, abrangendo o período de 1941 a 2000 (Figura 24). Ao contrário, a precipitação média do mês de fevereiro de 2005, de 144 mm, correspondeu apenas a 73% da média histórica, fixada em 196 mm. Já as chuvas de março, com índice de 181 mm, ficaram pouco acima da média histórica de 162 mm, enquanto o mês de abril,

com 39 mm, ficou muito abaixo da média histórica, de 64 mm. Em contrapartida, maio apresentou índice cerca de 70% maior e o trimestre junho, julho e agosto manteve as baixas precipitações históricas. De setembro a novembro, os índices pluviométricos registrados na bacia ficaram muito próximos da média histórica, e os vinte primeiros dias do mês de dezembro alcançaram 81% do índice histórico. Com relação à precipitação média total anual verificada na bacia, de 1417 mm, foi cerca de 2% maior do que a média histórica, de 1387 mm.

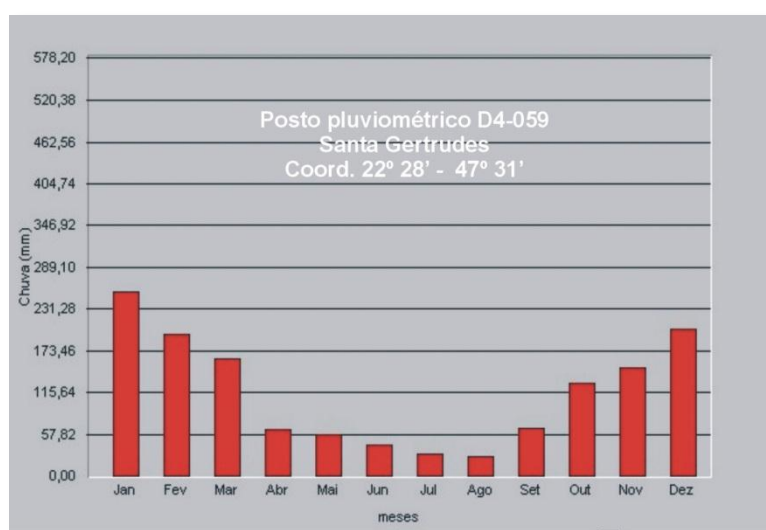


Figura 24 - Pluviograma médio mensal acumulado do período de 1941 a 2000, registrado pelo posto pluviométrico D4-059, Município de Santa Gertrudes (DAEE, 2000).

Monitoramento do Nível de Água Subterrânea

Foram instalados 20 poços de monitoramento (Figura 4) na área estudada. As perfurações constataram solo coluvionar e de alteração de rocha de espessura delgada, variando de 2 metros a 7 metros, composto por argila siltosa marrom clara no topo, silte areno-argiloso vermelho claro a amarelo claro na porção intermediária, passando a silte argiloso roxo laminado na base, no contato com a Formação Corumbataí. Os perfis construtivo e litológico dos poços encontram-se no Anexo 1.

Dentre os 20 poços perfurados, somente em 6 deles foi constatada a presença de água durante sua construção, em dezembro de 2004 (poços P-3, P-7, P-12, P-17, P-19 e P-20). Cerca de um mês após, em janeiro de 2005, havia subido para 15 o número de poços com água, e apenas os poços P-4, P-8, P-9, P-10 e P-14 ainda encontravam-se secos. Ao final do mês de janeiro de 2005, os poços P-2 e P-9 foram danificados por razões desconhecidas e não puderam mais ser monitorados.

Em fevereiro, os poços P-7 e P-16 secaram definitivamente. O monitoramento sistemático realizado, desde então, demonstrou alternâncias entre fases de subida e de descida de nível relacionadas aos períodos, respectivamente, de maior e de menor precipitação atmosférica, como pode ser visto nos hidrogramas das figuras 25 e 26.

Os períodos de maior precipitação produzem recarga do meio físico através da infiltração do excedente de águas meteóricas que, por sua vez, dá origem à elevação dos níveis do lençol freático. Cessadas as chuvas, as águas subterrâneas movem-se para os locais de descarga natural, provocando rebaixamento do nível freático ou recessão, que se mantém até o período seguinte de recarga.

As curvas de recessão ou depleção dos níveis de água subterrânea seguem lei exponencial decrescente, do tipo:

$$Qt = Q_0 e^{(-\alpha t)}$$

Onde Qt é a descarga no instante t ; Q_0 , a descarga inicial da recessão; α , a constante dependente das características da bacia; t , o tempo após início da recessão.

A recessão ocorre tanto mais rápida quanto maior for a condutividade hidráulica do terreno e menor a distância até o ponto de descarga. Segundo Custódio & Llamas (1996), em aquíferos freáticos constituídos de materiais argilosos, com nível de água pouco profundo, a lenta infiltração de águas superficiais deveria produzir efeito lento de recarga. Ressaltam que, todavia, em épocas úmidas, às vezes se observa ascensão muito rápida dos níveis, incompatível com as características de baixa condutividade hidráulica do terreno. Para Bonell (1972, *in* Custódio & Llamas, 1996), a explicação pode ser a infiltração

preferencial no solo através de discontinuidades originadas por raízes e/ou gretas.

O monitoramento sistemático com equipamentos eletrônicos (transdutores, *data loggers*, etc.) foi realizado nos poços P-5 e P-3. No poço P-5, o monitoramento compreendeu o período de final de fevereiro até meados de julho de 2005, quando a constatação de furto do transdutor impediu o prosseguimento dos trabalhos neste ponto (Figura 27).

Após este fato, novo aparato de medição foi instalado no poço P-3, localizado em ponto menos acessível a transeuntes. O poço P-3 foi monitorado no período de 24 de outubro a 20 de dezembro de 2005.

A Figura 28 mostra a variação do nível de água do solo, medido no poço P-5, em função da precipitação. De acordo com os registros, ocorreu intensa precipitação (51 mm) com início às 5h30 do dia 14 de março, ao passo que o nível freático começou a elevar-se às 3h50 do dia 15 de março, correspondendo a um tempo de retardo de cerca de 22 horas para que as águas infiltradas atingissem o lençol subterrâneo, evidenciando rápida resposta do nível freático local aos eventos pluviométricos intensos.

Após pico máximo de elevação, ocorrido 36 horas depois do início das chuvas, o nível freático começou a abaixar em função da drenagem do solo, dissipando em forma de escoamento de base o volume acumulado anteriormente.

Quando o nível de água do solo registrado no P-5 havia baixado de 99 cm, em pouco mais de 6 dias, novo evento de chuvas intensas atingiu a área, despejando 60 mm em 3 dias consecutivos (22 a 24 de março) e elevando novamente o nível freático em patamar ligeiramente acima do nível máximo anterior. Com a paralisação das chuvas, teve início novo período de recessão.

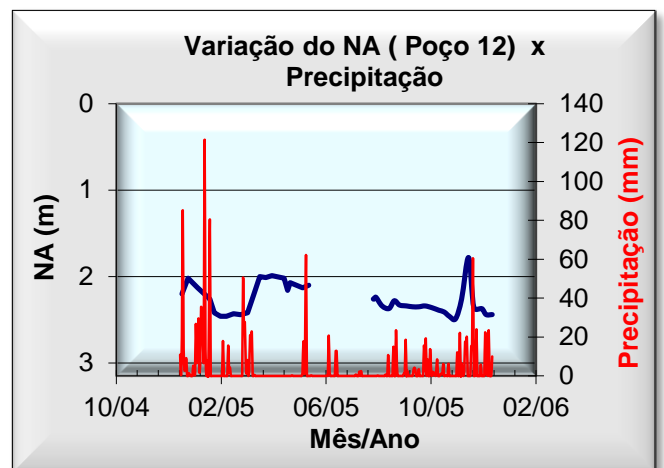
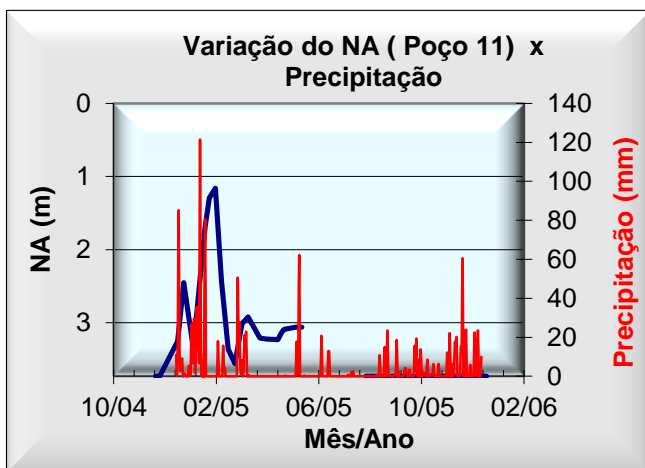
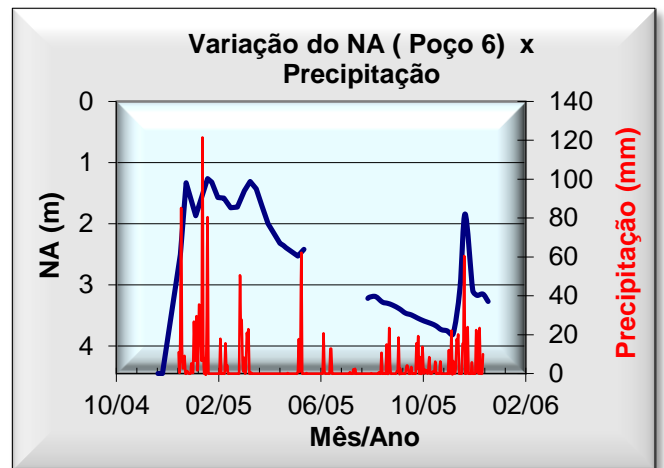
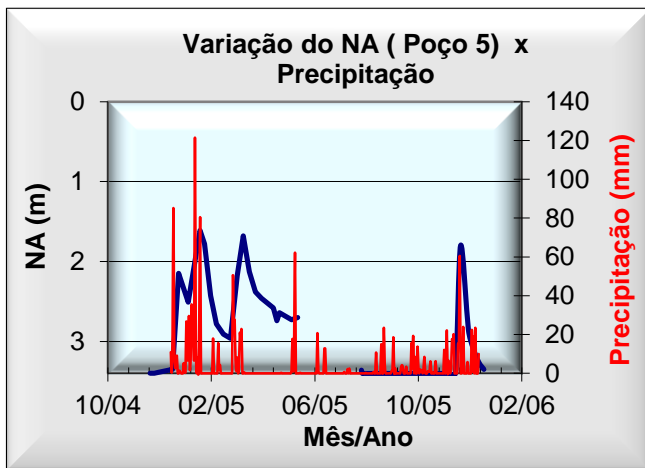
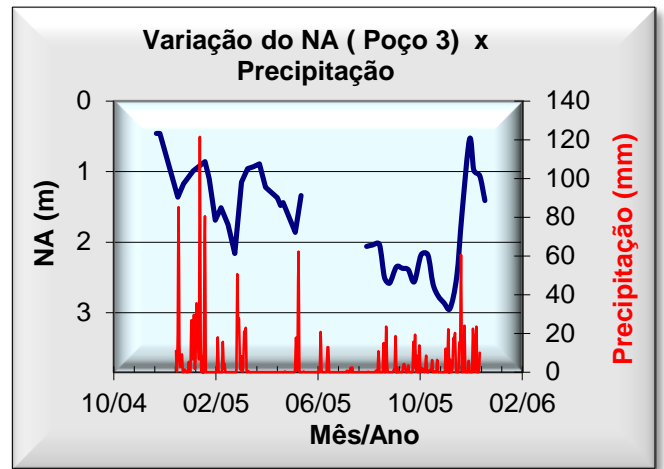
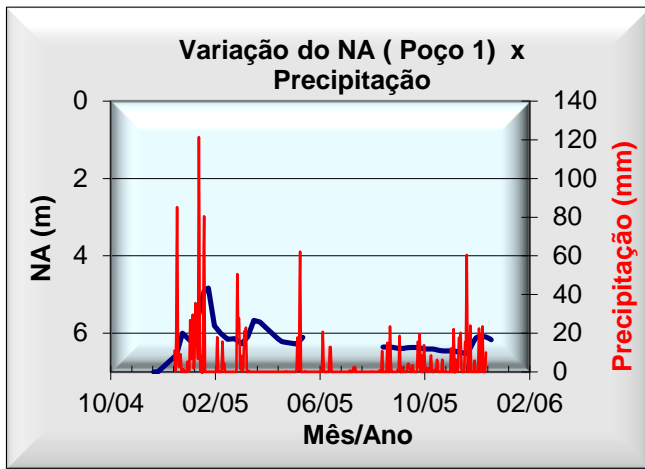


Figura 25 - Variação do nível de água dos poços P-1, P-3, P-5, P-6, P-11 e P-12 em função da precipitação. O valor máximo do eixo Y representa a profundidade total do poço. Linha azul: nível de água; Linha vermelha: precipitação.

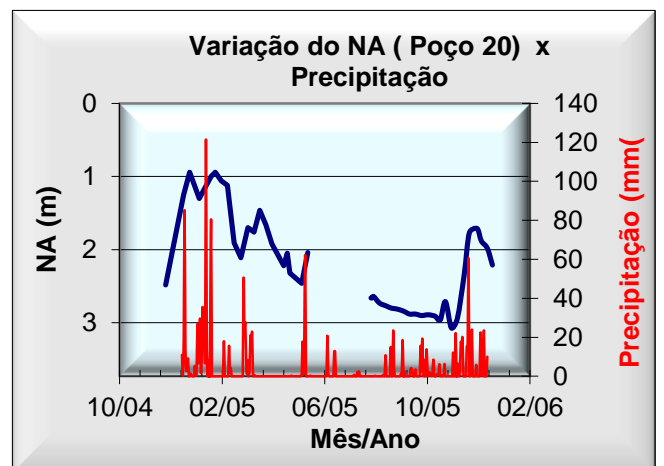
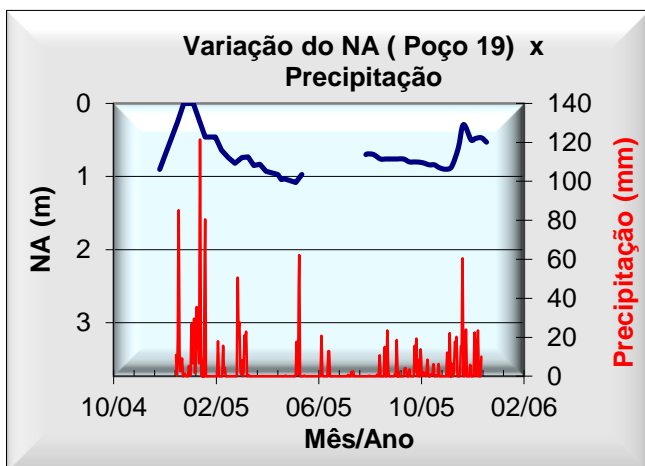
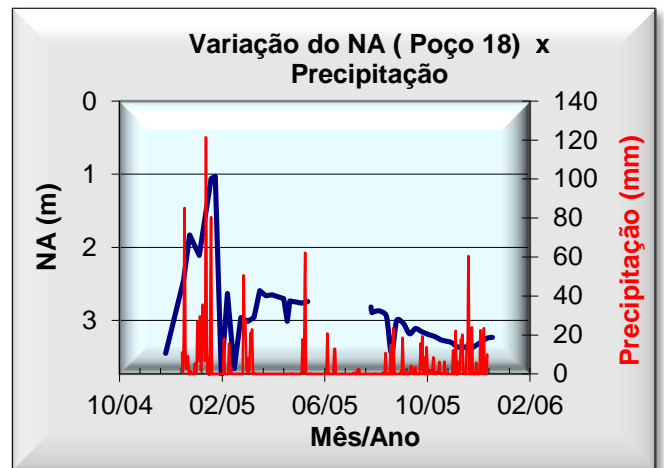
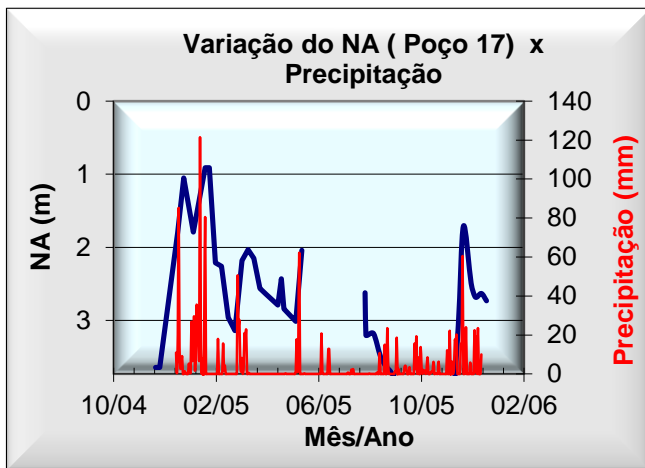
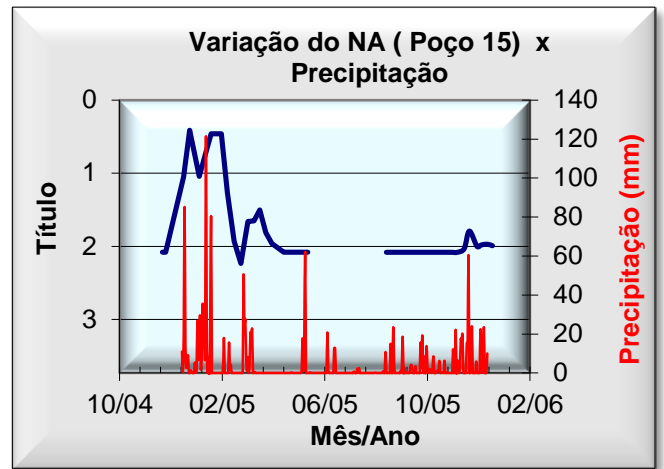
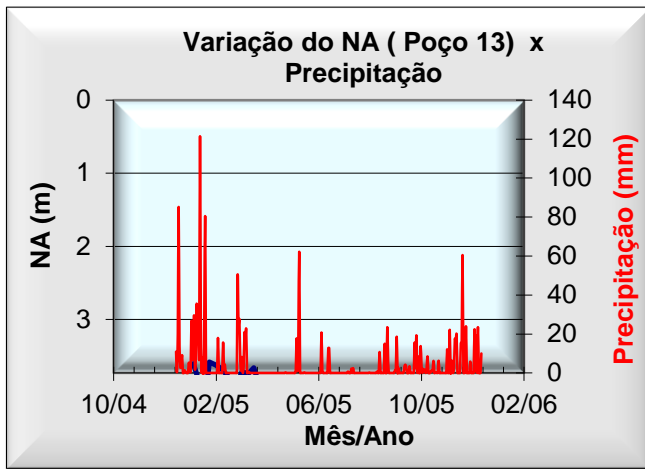


Figura 26 - Variação do nível de água dos poços P-13, P-15, P-17, P-18, P-19 e P-20 em função da precipitação. O valor máximo do eixo Y representa a profundidade total do poço. Linha azul: nível de água; Linha vermelha: precipitação.



Figura 27 - Furto dos equipamentos eletrônicos de monitoramento de nível do poço 5. A, B) situação geral encontrada após furto; C, D) detalhes da extremidade do cabo do transdutor cortado; E) detalhe da caixa metálica que armazenava o data logger.

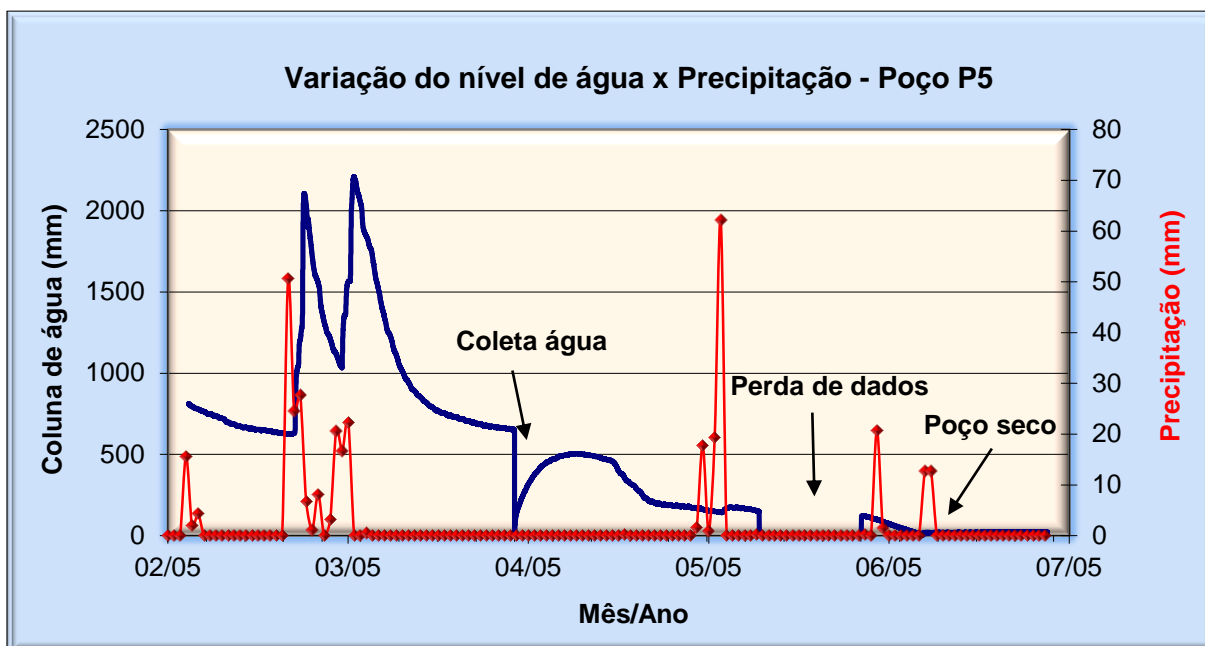


Figura 28 - Variação do nível de água do poço P-5 em função da precipitação. Linha azul: nível de água; Linha vermelha: precipitação.

A partir do final de março, o nível de água do solo decaiu progressivamente até completa exaustão ao final de junho. Neste período recessivo, mesmo eventos esporádicos de chuva, como os ocorridos em maio e junho, não foram suficientes para provocar uma elevação significativa do nível de água do solo. Já a retirada de água para realização de análises químicas, no mês de maio, provocou o esgotamento do poço que, aos poucos, foi se recuperando. O exame da Figura 25 mostra que o nível de água neste poço começou a ascender no início de dezembro, quando a frequência e intensidade das precipitações aumentaram.

A Figura 29 mostra a variação do nível de água do solo, medido no poço P-3, em função da precipitação. Observa-se que o nível de água manteve tendência de queda progressiva até meados de novembro, quando registrou seu nível mais baixo. Com o início das precipitações mais intensas, superando índices de 20 mm, o nível de água deslocou-se abruptamente até patamar superior, a partir do qual desceu suavemente até

sofrer influência de novo evento de chuva quando, também de modo relativamente abrupto, elevou-se até patamar superior. Esse fenômeno se repete sucessivamente, com elevação a novos patamares, em correspondência com os índices pluviométricos mais intensos, e rebaixando-se nos períodos de precipitação baixa ou nula.

De modo geral, a correlação entre nível de água e pluviometria indicou que a recarga dos poços ocorreu nos meses de novembro a fevereiro, e a depleção nos demais meses de 2005.

A quantidade de água acumulada na zona saturada de aquíferos freáticos e que pode ser liberada por drenagem gravitacional do solo é expressa pela capacidade específica (C_e), também conhecida como porosidade eficaz, definida como a relação entre a variação do volume de água passível de liberação e a variação do volume total do solo saturado. O rápido enchimento e esvaziamento do solo, como mostrado nos gráficos anteriores, sugerem reservatório limitado, com baixa porosidade eficaz.

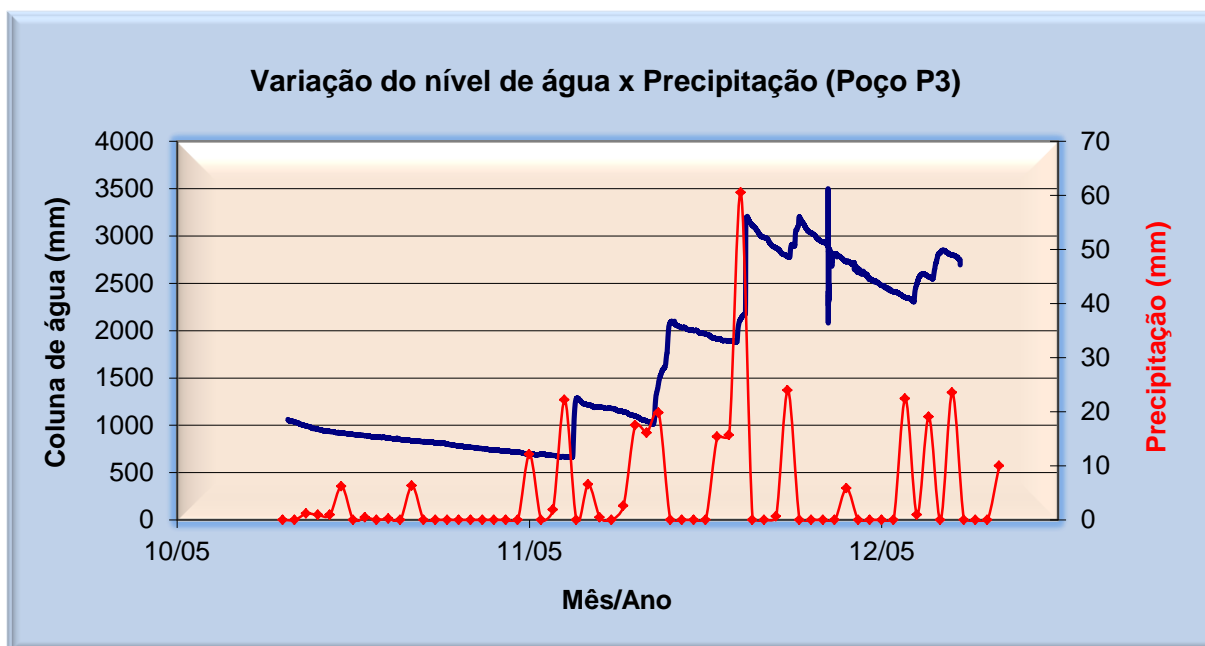


Figura 29 - Varição do nível de água do poço 3 em função da precipitação. Linha azul: nível de água; Linha vermelha: precipitação.

Hidroquímica das Águas Subterrâneas e Superficiais

Após obtenção dos resultados das análises físico-químicas de amostras de águas subterrâneas e superficiais, foi feita a conversão das concentrações dos elementos analisados de mg/L para meq/L e calculados os erros de balanço iônico a partir fórmula:

$$Erro(\%) = \left(\frac{\sum \hat{a}nions - \sum \hat{c}átions}{\sum \hat{a}nions + \sum \hat{c}átions} \right) * 100$$

Os erros máximos constatados alcançaram 27% (média de 10%) na primeira campanha e 35% (média de 12%) na segunda campanha, sendo considerados bastante razoáveis para este tipo de caracterização e dentro dos erros aceitáveis para as condutividades elétricas observadas nas amostras.

Águas Subterrâneas

Os valores de pH obtidos nas duas campanhas revelaram águas subterrâneas próximas da

neutralidade, sendo que os valores obtidos de análises feitas na segunda campanha foram, comparativamente, pouco menores do que os obtidos na primeira campanha (Figura 30).

As condutividades das amostras de águas subterrâneas apresentaram valores entre 50 μ S/cm e 500 μ S/cm, indicando baixas salinidades. A comparação entre as duas amostragens evidenciou ligeira diminuição nos valores deste parâmetro na segunda campanha (Figura 31).

Com relação à classificação das águas subterrâneas (Figura 32), os resultados da primeira campanha, realizada em fevereiro de 2005, apontaram três grandes grupos: águas bicarbonatadas cálcicas (P-1, P-19 e P-20), águas cloretadas bicarbonatadas cálcio-sódicas, ditas mistas (P-3, P-6, P-17 e P-18), e águas cloretadas sódicas (P-5 e P-11).

Na segunda campanha, realizada em abril de 2005, os resultados apontaram características de águas mistas, ou seja, sem cátion ou ânion

prevalentes, exceção às águas bicarbonatadas cálcicas dos poços P-12 e P-18, e cloretada sódica do poço P-11.

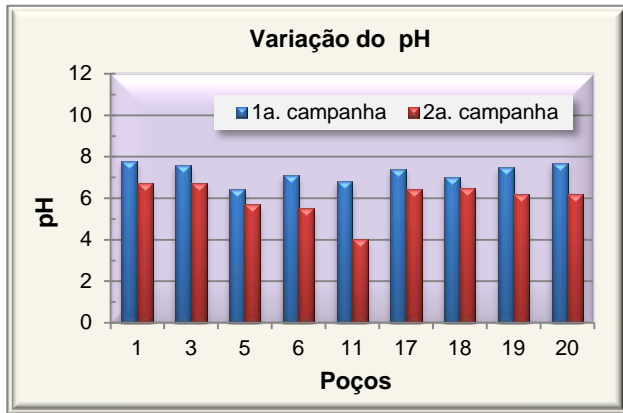


Figura 30 - Gráfico comparativo entre o pH das águas subterrâneas, nas duas campanhas de amostragem.

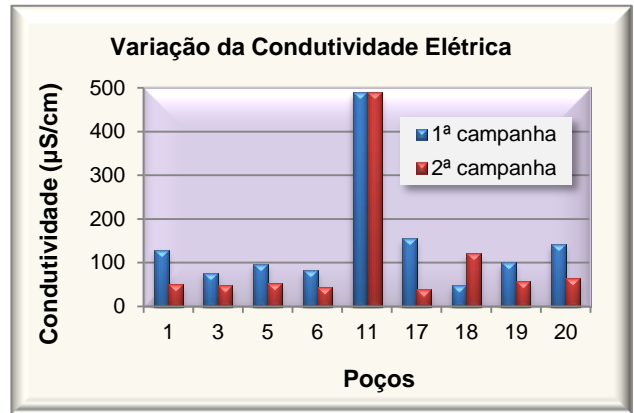
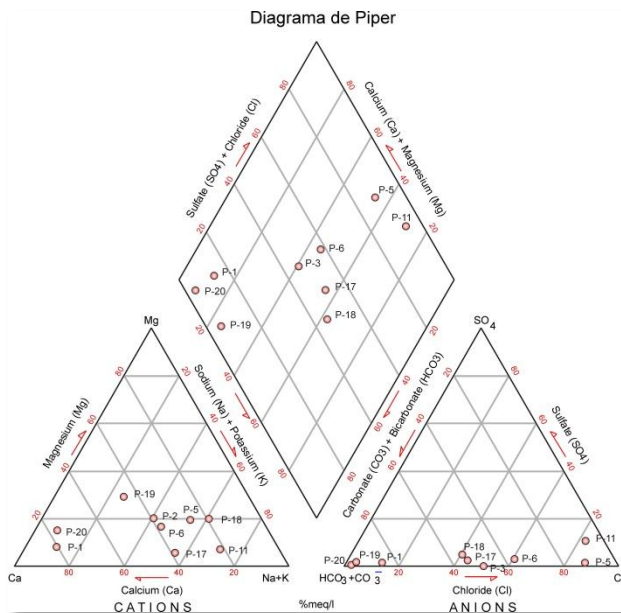
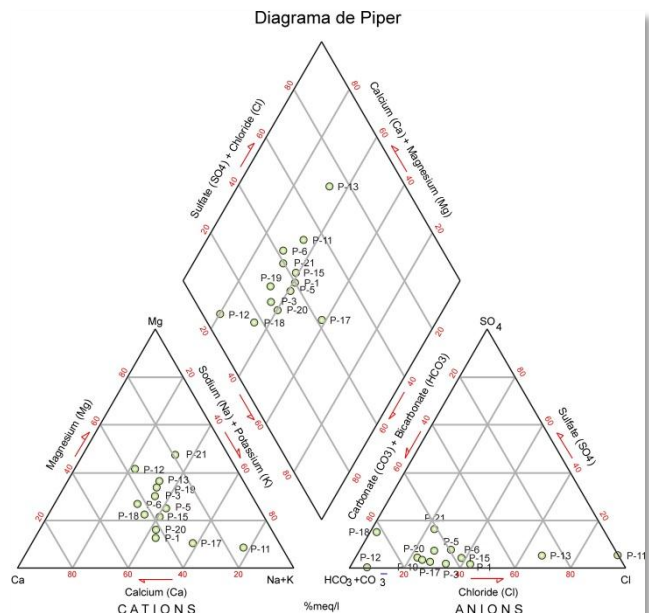


Figura 31 - Gráfico comparativo entre a condutividade elétrica das águas subterrâneas, nas duas campanhas de amostragem.



A



B

Figura 32 - Diagrama de Piper das amostras de água subterrânea. A) 1ª campanha; B) 2ª campanha.

A representação gráfica das amostras de águas subterrâneas pelo diagrama de *Stiff* apresentou resultados semelhantes aos observados na classificação pelo diagrama de *Piper*.

Os mapas da Figura 33 apresentam a distribuição espacial dos tipos hidroquímicos encontrados na

área estudada, nas duas campanhas de amostragem realizadas. Em ambos, observa-se claramente a manutenção das características cloretadas das águas encontradas no P-11, enquanto no restante dos poços as características são eminentemente

bicarbonatadas, com contribuição variável de cloretos como ânion secundário. A realização da segunda campanha de amostragem teve como objetivo a verificação da consistência dos dados

da primeira campanha e comparação do comportamento hidroquímico das águas subterrâneas após período de recarga.

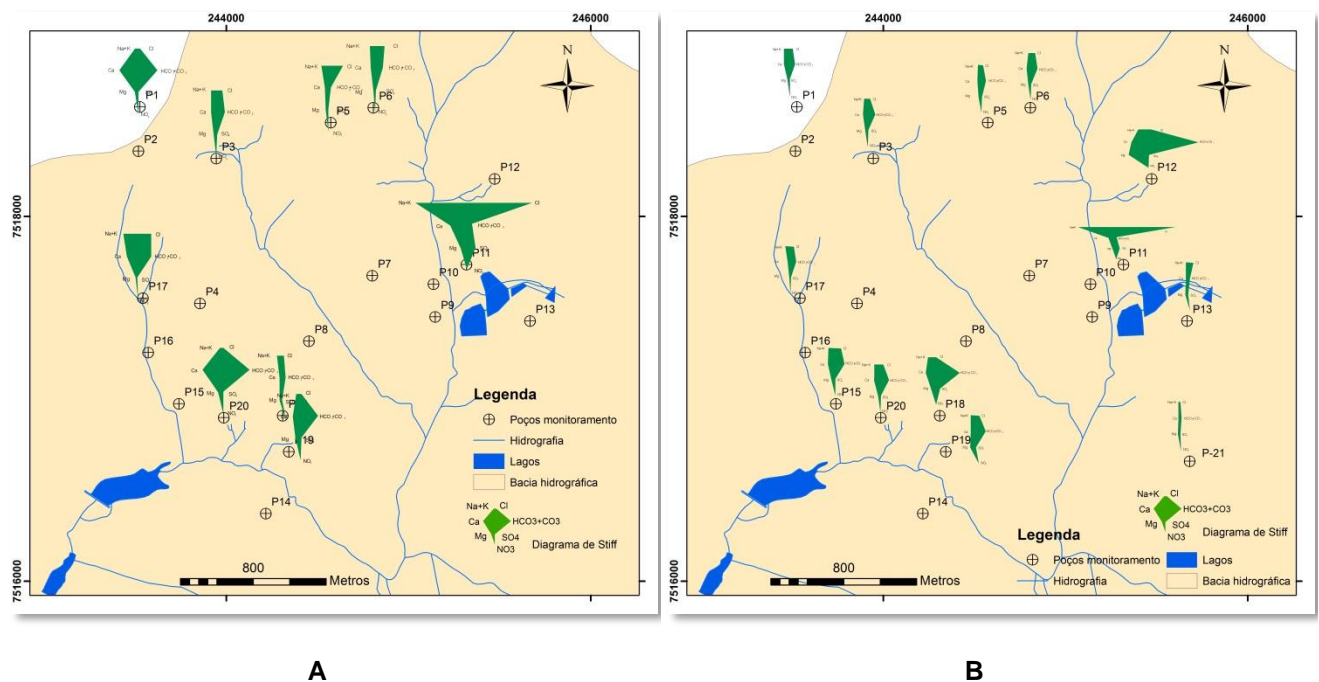


Figura 33 - Mapa de distribuição das águas subterrâneas representadas pelo diagrama de Stiff. A) 1ª campanha; B) 2ª campanha.

Os gráficos das figuras 34 e 35 apresentam os resultados dos parâmetros químicos analisados na primeira e segunda campanhas de amostragem, podendo-se observar que:

- A alcalinidade apresentou diminuição generalizada na segunda campanha, com exceção dos poços P-18 e P-5, localizados na porção central da área, fato que pode estar relacionado à aplicação de calcário como corretivo do solo;
- As concentrações de cloreto apresentaram diminuição em quase todos os poços na segunda campanha, exceção do P-1, P-11, P-19 e P-20;
- As concentrações de fluoreto apresentaram diminuição em quase todos os poços na segunda campanha, menos no P-11 e P-18;
- As concentrações de sulfato ficaram, em geral, abaixo dos limites de detecção do método utilizado para quantificação, com exceção dos poços P-11 e P-18;
- O nitrato apresentou grande variação, desaparecendo em alguns poços onde haviam sido detectadas grandes concentrações na primeira campanha (P-17 e P-18) e tendo a concentração aumentada nos poços P-19 e P-20, na segunda campanha;
- Para os principais cátions, a água subterrânea apresentou diminuição das concentrações de cálcio, sódio, potássio e magnésio na segunda campanha, com algumas exceções;

- Os resultados mostraram que as águas dos poços P-11, P-17, P-18, P-19 e P-20 tiveram

suas características químicas naturais alteradas pela atividade antrópica na área.

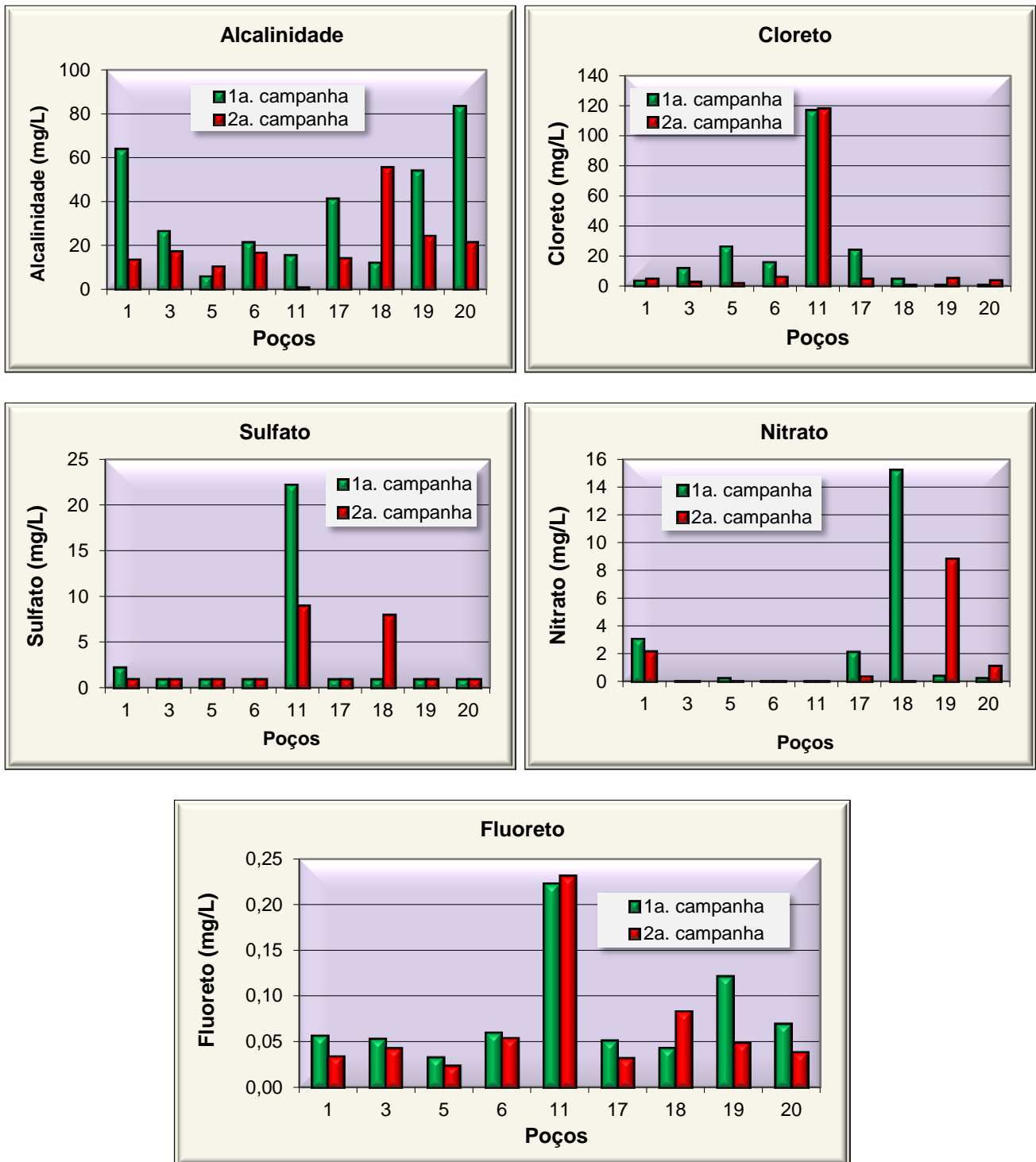


Figura 34 – Alcalinidade e ânions principais das águas subterrâneas, nas duas campanhas de amostragem.

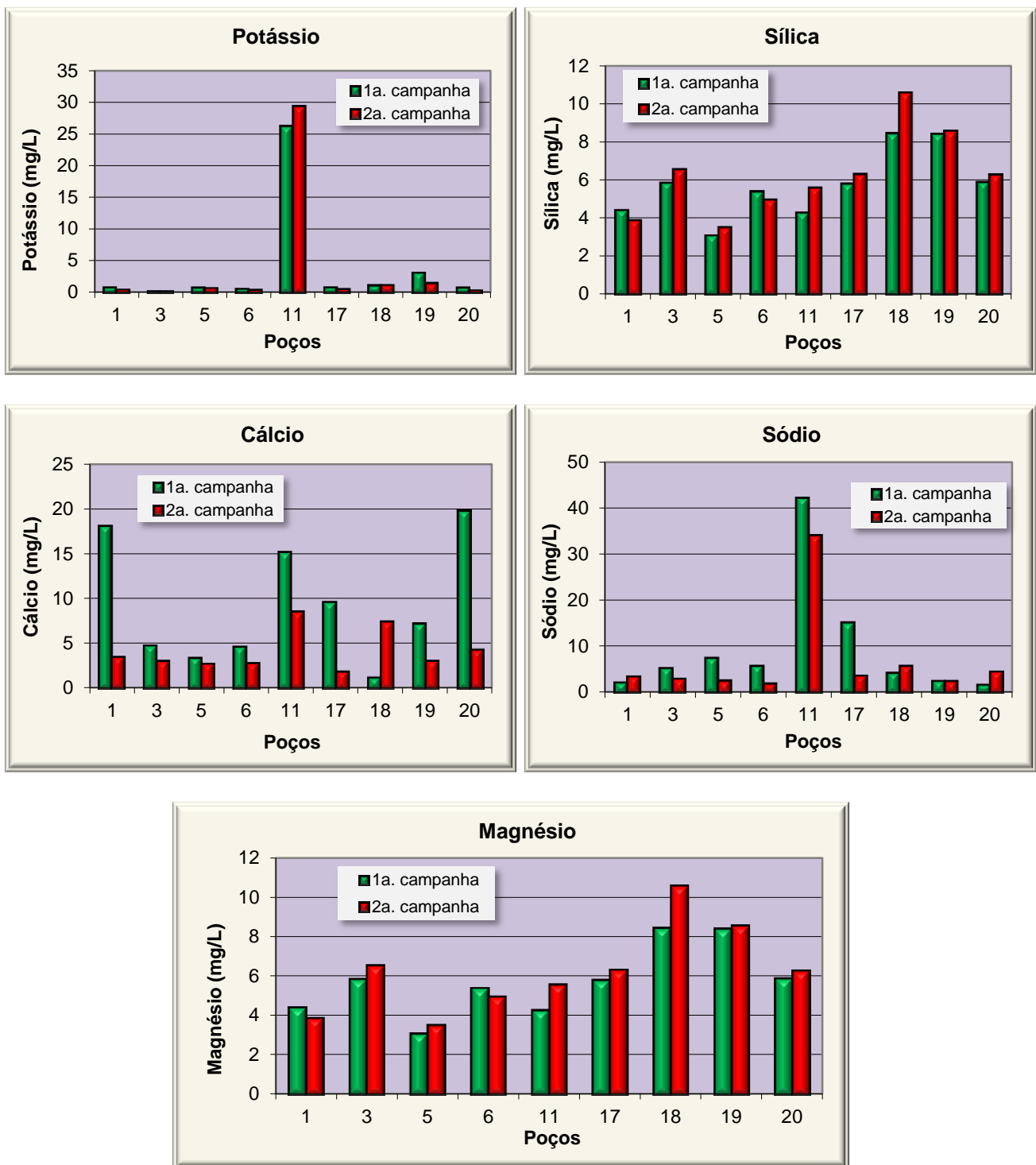


Figura 35 - Principais cátions das águas subterrâneas nas duas campanhas de amostragem.

Águas Superficiais

As águas superficiais, coletadas em quatro estações localizadas no Ribeirão Santa Gertrudes e afluentes, apresentaram teores de sólidos totais dissolvidos (STD) entre 50 mg/L e 60 mg/L. Estas

concentrações constituem, grosso modo, metade das encontradas nos poços de monitoramento. Hidroquimicamente, essas águas são semelhantes às subterrâneas e enquadram-se

entre os tipos bicarbonatada cloretada cálcico-sódica e bicarbonatada cálcica (Figura 36).

As águas superficiais coletadas no dia 28 de janeiro (índice a) foram classificadas dentro do campo das águas bicarbonatadas cloretadas cálcico-sódicas, enquanto as coletadas no dia 24 de fevereiro (índice b) foram classificadas como

bicarbonatadas cálcicas. Essa diferenciação pode estar associada à maior lixiviação provocada pelas chuvas de janeiro, em contraposição à pequena precipitação ocorrida em fevereiro, uma vez que o cloreto é acumulado em períodos de evaporação intensa.

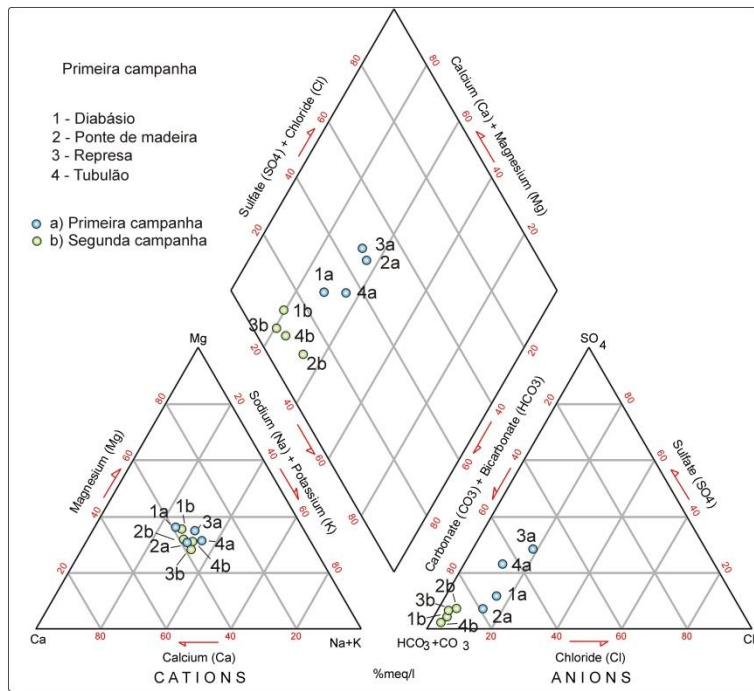


Figura 36 - Diagrama de Piper das amostras de águas superficiais.

Com relação ao ferro solúvel, a amostra coletada na estação Diabásio no dia 28 de janeiro de 2005, e as amostras coletadas nas estações Diabásio, Ponte de Madeira e Represa, no dia 24 de fevereiro de 2005, apresentaram valores acima dos limites estabelecidos (Figura 37). Análise de cátions realizada em 11 de março de 2005 também acusou a presença de ferro solúvel acima dos limites recomendados, na estação Diabásio.

Os elevados teores de Al e Fe refletem a composição mineralógica do solo, rico em aluminossilicatos e óxidos de ferro, este último derivado de alteração de minerais ferromagnesianos.

Esta situação está bem ilustrada na Figura 37, onde se observa que os teores mais elevados de ferro são encontrados na estação Diabásio, cujo

Os resultados das análises físico-químicas das águas superficiais foram comparados aos valores máximos de referência permitidos (Resolução CONAMA 20) para águas enquadradas nas classes I e II.

Com relação aos parâmetros pH, cloreto, fluoreto, sulfato, nitrato, cobalto, manganês, cobre, fósforo, zinco, chumbo, bário, cádmio, níquel e cromo, os valores medidos posicionaram-se dentro dos limites aceitáveis.

Com relação ao alumínio, todas as amostras coletadas no dia 28 de janeiro de 2005 e a amostra coletada na estação Ponte de Madeira, no dia 24 de fevereiro, mostraram valores acima dos limites aceitáveis.

substrato rochoso é constituído pelas rochas básicas que deram o nome à estação.

Com relação aos sólidos totais em suspensão (STS), os teores medidos variaram de 3 mg/L (Estação Diabásio) a 1048 mg/L (Estação Tubulão) ao longo do período monitorado, observando-se tendência normal de aumento de sólidos nos meses mais chuvosos (Figura 38).

O STS, na estação Tubulão, quase sempre se manteve maior do que nas demais estações, ao contrário da estação Diabásio, onde os sólidos normalmente apresentaram os valores mais baixos.

A explicação para esta constatação deve-se à localização dos pontos de amostragem, o da estação Diabásio situando-se à montante e o da estação Tubulão à jusante da área minerada, e à

maior capacidade de escoamento superficial no posto Diabásio, propiciando maior dispersão de

sólidos, em comparação com o posto Tubulão.

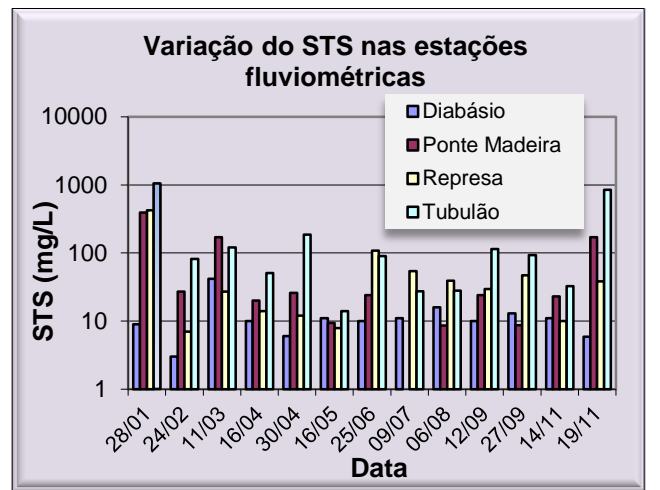
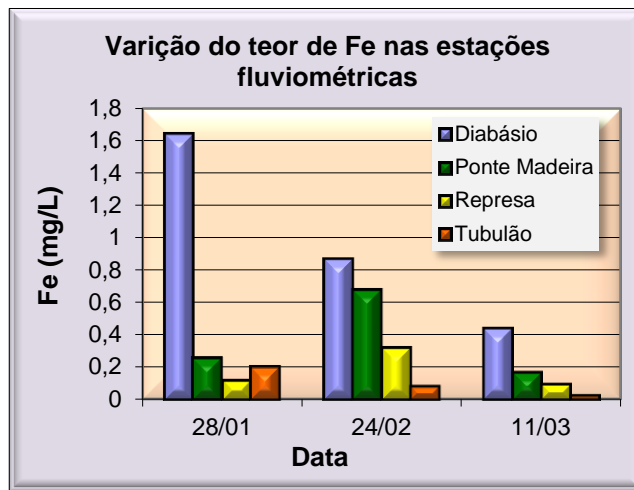


Figura 37 - Variação do teor de ferro solúvel nas estações fluviométricas.

Figura 38 - Variação do STS (sólidos totais em suspensão) nas estações fluviométricas.

Dados de monitoramento da qualidade da água em dois pontos do Ribeirão Santa Gertrudes, obtidos pela CETESB, um deles situado na Fazenda Boa vista, à montante, e o outro na

ponte de acesso à Fazenda Goiapá, à jusante da área minerada, relativos ao período de janeiro de 2003 a julho de 2005, são apresentados na Figura 39.

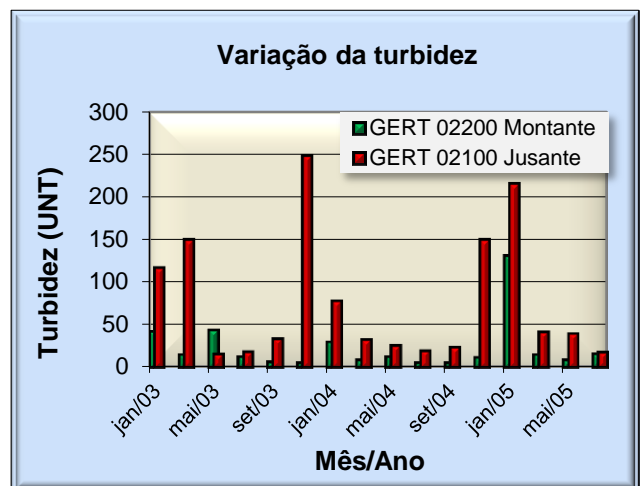
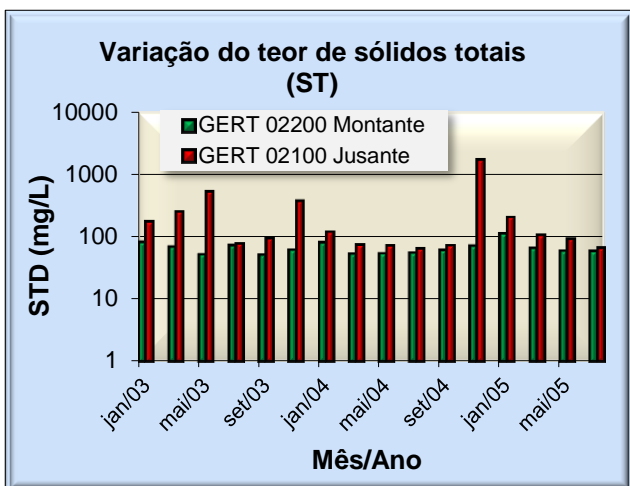


Figura 39 - Variação do teor de sólidos totais e de turbidez de amostras de água superficial do Ribeirão Santa Gertrudes, com base em dados da CETESB.

Com base nos dados coletados pela CETESB nesse período (Figura 39), o teor de sólidos totais foi normalmente inferior a 100 mg/L no ponto de montante, ao passo que, no ponto de jusante, os teores superaram este limite em metade das amostragens realizadas, indicando, ainda, tendência de aumento em consonância com os meses historicamente mais chuvosos.

Com relação à turbidez (Figura 39), o ponto de amostragem à montante acusou valores inferiores a 40 UNT (Classe I – Resolução CONAMA 20) e apenas uma única vez superior a 100 UNT (Classe II – Resolução CONAMA 20). O ponto à jusante, por sua vez, permaneceu na maior parte com valores até 40 UNT, excedendo 100 UNT em apenas 30% dos casos, em meses considerados chuvosos.

Para complementar a análise relativa à qualidade da água para abastecimento público, foi solicitada à Prefeitura Municipal de Santa Gertrudes a cessão dos exames de turbidez realizados pelo setor responsável, a partir de agosto de 2005. Lamentavelmente, o turbidímetro utilizado para essas medições esteve em manutenção do final de agosto até quase o final de novembro, e os dados desse período não puderam ser coletados. Os dados disponíveis de turbidez foram, então, arranjados graficamente e comparados com os dados pluviométricos do mesmo período (Figura 40 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

O gráfico da Figura 40 mostra que, na estação seca, a turbidez permaneceu em torno de 20 UNT, abaixo do valor de referência para águas enquadradas na classe I (40 UNT). Já na estação chuvosa, os valores mostraram tendência de crescimento em razão do aumento dos índices de precipitação, superando na maior parte dos casos os valores de referência de enquadramento de águas na classe II (100 UNT), contudo, sem apresentar correlação harmoniosa.

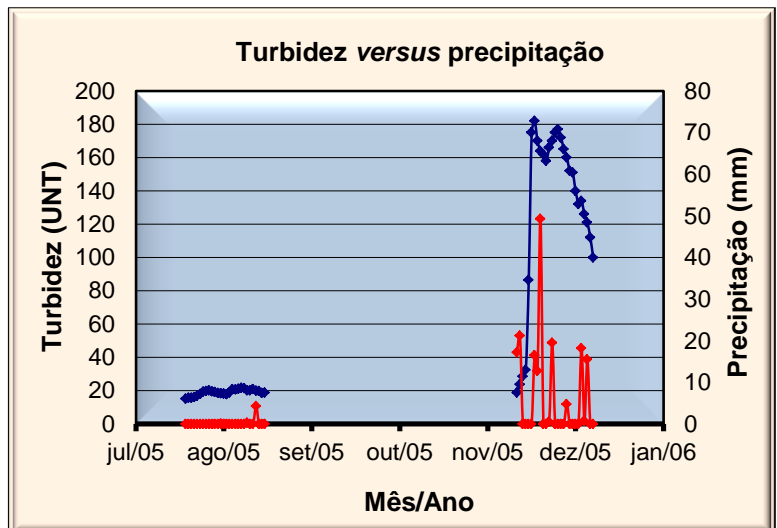


Figura 40 - Turbidez diária medida na estação de tratamento de água de Santa Gertrudes, comparada com a precipitação ocorrida no mesmo período.

Visita de campo realizada em agosto de 2005 ao trecho do Ribeirão Santa Gertrudes, onde está instalada a estação fluviométrica Diabásio, mostrou grande acúmulo de material argiloso floculado no fundo do canal que não se movia juntamente com o escoamento superficial (Figura 41). Remexendo-se ligeiramente o fundo do canal, o material argiloso entrava em suspensão e, desse modo, passava a ser transportado pela corrente.

Este fato revelou que grande quantidade de material argiloso decanta no fundo do canal durante o período seco, sendo remobilizado apenas durante precipitações mais intensas, quando o volume de escoamento superficial é amplificado, ou seja, precipitações intensas ocorridas após períodos prolongados de seca são responsáveis pelos maiores índices de turbidez registrados.

Informações oficiais do sistema de abastecimento de água de Santa Gertrudes do período de janeiro de 2004 a dezembro de 2005, fornecidas pela Seção de Tratamento, apontam os dias em que a turbidez no local da captação de água do Ribeirão Santa Gertrudes apresentou condições extremamente difíceis para tratamento, em decorrência das fortes precipitações atmosféricas ocorridas (Quadro 4), corroborando as afirmações acima.

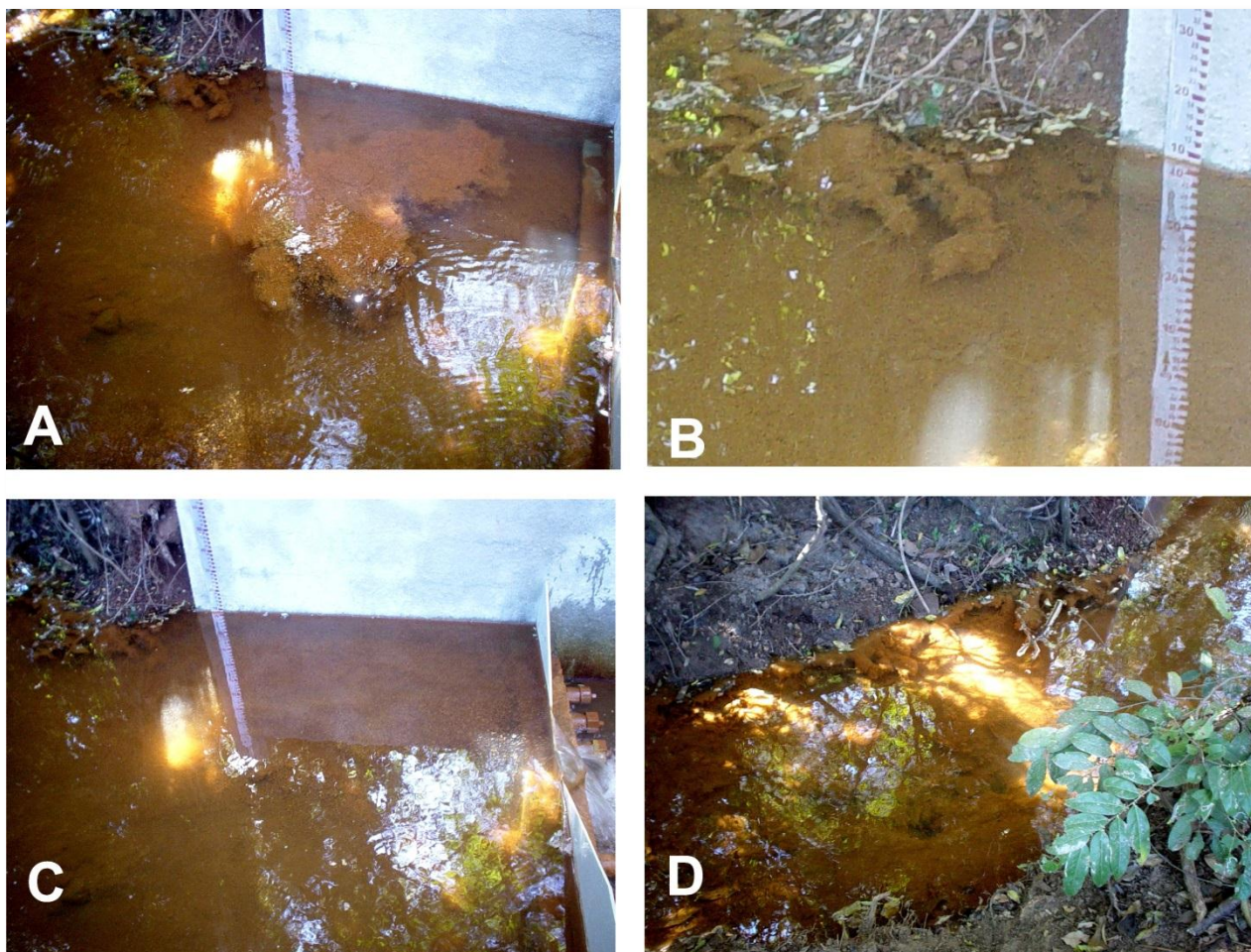


Figura 41 - Série de fotos tiradas na estação Diabásio, em agosto de 2005, no vertedor e trecho do Ribeirão Santa Gertrudes, mostrando material argiloso floculado, depositado no fundo do canal.

Quadro 4 - Períodos em que a qualidade água da captação municipal de Santa Gertrudes ficou prejudicada (Informações da Seção de Tratamento de Água, período de janeiro de 2004 a dezembro de 2005)

Períodos em que a qualidade da água para abastecimento de Santa Gertrudes ficou prejudicada									
Data	Prec. (mm)	Data	Prec. (mm)	Data	Prec. (mm)	Data	Prec. (mm)	Data	Prec. (mm)
7-jan-2004	26	21-fev-2004	25,4	26-dez-2004	95,54	28-jan-2005	55,3	14-mar-2005	54,1
8-jan-2004	40,6	22-fev-2004	117	27-dez-2004	0	29-jan-2005	115,7	15-mar-2005	41,4
9-jan-2004	16,2	23-fev-2004	25,4	28-dez-2004	12,7	x	x	16-mar-2005	32,4
10-jan-2004	0	24-fev-2004	31,8	x	x	x	x	17-mar-2005	0
11-jan-2004	28	25-fev-2004	12,1	x	x	x	x	x	x
Total	110,8	Total	211,7	Total	108,24	Total	171	Total	127,9

Condutividade Hidráulica do Meio Não Saturado

Para atingir o lençol freático, a água de precipitação atmosférica deve infiltrar-se e circular pelo solo. O fluxo através de terrenos não saturados constitui etapa importante do ciclo hidrológico. Entre os fatores que governam este processo estão aqueles que dizem respeito às características de condutividade hidráulica do meio físico. A condutividade hidráulica é um parâmetro hidrodinâmico que representa a vazão que passa por seção de área unitária, sob gradiente hidráulico unitário.

A condutividade hidráulica é influenciada pela compactação natural dos terrenos, cobertura vegetal, propriedades texturais (granulometria,

argilosidade etc.), presença de descontinuidades, uso e ocupação do solo etc. A velocidade de infiltração da água meteórica no solo depende, fundamentalmente, da condutividade hidráulica do terreno.

Foram realizados 10 ensaios para determinação da condutividade hidráulica vertical do terreno com a utilização de permeâmetro *Guelph*, cujos resultados estão listados na Quadro 5.

Os valores obtidos variaram de $1,8 \times E^{-5}$ cm/s a $3,3 \times E^{-3}$ cm/s, com média geométrica de $2,48 \times E^{-4}$ cm/s. Estes valores classificam o terreno ensaiado na categoria de aquíferos pobres (Quadro 6).

Quadro 5 - Valores de condutividade hidráulica vertical (K) obtidos de ensaios com permeâmetro Guelph em meio não saturado

ENSAIOS DE PERMEABILIDADE VERTICAL - PERMEÂMETRO GUELPH							
Ensaio	Data	ID	Coordenadas UTM		Descrição	Prof. (cm)	K (cm/s)
			x	y			
1	2-mar-04	SG-01	243511	7518530	Ao lado do P1	60	1,2E-04
2	2-mar-04	SG-02	243508	7518286	Ao lado do P2	50	3,0E-04
3	2-mar-04	SG-03	244447	7517213	Próximo ao P8	45	1,4E-03
4	24-mai-05	SG-04	244571	7518465	Ao lado do P5	60	9,70E-04
5	25-mai-05	SG-05	245151	7517588	Ao lado do P10	41	3,30E-03
6	26-mai-05	SG-05a	245151	7517588	Ao lado do P10	30	1,80E-05
7	27-mai-05	SG-06	243766	7516496	-	43	9,10E-05
8	28-mai-05	SG-07	243866	7517449	Ao lado do P4	35	4,70E-04
9	7-jun-05	SG-08	243321	7516592	-	47	4,00E-05
10	7-jun-05	SG-09	245478	7518178	Ao lado do P9	45	1,80E-04
Média geométrica							4,70E-04

Quadro 6 – Classificação dos terrenos em função da permeabilidade (Benitez, 1963, in Custódio & Llamas, 1996)

CLASSIFICAÇÃO DOS TERRENOS EM FUNÇÃO DA PERMEABILIDADE												
Permeabilidade (m/d)	10 ⁴	10 ³	10 ²	10 ¹	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	
Tipo de terreno	Cascalho limpo		Areia limpa, mistura de cascalho e areia			Areia fina, areia argilosa, argila estratificada			Argilas não alteradas			
Classificação	Aquíferos bons					Aquíferos pobres			Aquitardos / Aquicludes			
Capacidade de drenagem	Drenam bem					Drenam mal			Não drenam			

Condutividade Hidráulica do Meio Saturado

A velocidade de fluxo subterrâneo é governada, diretamente, pela condutividade hidráulica horizontal do terreno e pelo gradiente hidráulico. O sentido de fluxo dá-se dos pontos de maior carga hidráulica para os de menor carga.

Para determinação da condutividade hidráulica do solo foram programados testes de *slug*, os quais apresentam vantagens como facilidade e rapidez de execução e fornecem valores mais representativos do que aqueles obtidos em ensaios realizados em corpos de prova. Os

testes foram executados nos poços P-1, P-3, P-6, P-11, P-12, P-13, P-17, P-18, P-19 e P-20, no período de 01 a 30 de abril de 2005.

As condutividades hidráulicas foram calculadas aplicando-se os métodos de Hvorslev (1951) e de Bouwer & Rice (1976), tanto para inserção (rebaixamento) quanto para a retirada do cilindro (recuperação), sempre que possível (Figura 42). O Quadro 7 resume os valores de condutividade hidráulica obtidos nos testes de *slug*.

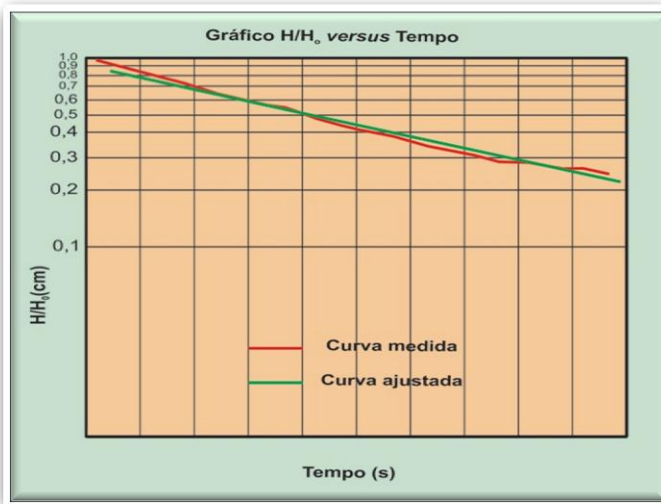


Figura 42 – Gráfico de interpretação de testes de *slug* (exemplo do poço P-13, curva de rebaixamento).

Quadro 7 – Condutividades hidráulicas horizontais do terreno saturado, obtidas em testes de *slug*

Poço	Condutividade hidráulica do terreno saturado (cm/s)			
	Rebaixamento		Recuperação	
	Hvorslev	Bouwer & Rice	Hvorslev	Bouwer & Rice
P-1	7,92E-06	1,58E-05	5,04E-05	8,26E-05
P-3	6,20E-05	9,29E-05	2,39E-04	4,02E-04
P-6	4,28E-05	1,85E-04		
P-11	1,72E-05	2,25E-05	2,61E-05	7,39E-05
P-12			5,08E-05	7,51E-05
P-13	1,38E-04	1,77E-04	9,02E-05	1,04E-04
P-17	2,07E-05	3,72E-05	2,97E-05	5,25E-05
P-18	2,39E-05	3,20E-05	8,86E-05	1,21E-04
P-19			1,38E-03	2,18E-03
P-20	1,14E-04	1,59E-04	2,26E-04	3,21E-04
Média	5,33E-05	9,02E-05	2,42E-04	3,79E-04
Média Geom.	3,60E-05	6,15E-05	1,02E-04	1,64E-04

As médias geométricas das condutividades hidráulicas calculadas pelo método de Hvorslev (1951) variaram de $3,60 \text{ E}^{-5} \text{ cm/s}$ a $1,02 \text{ E}^{-4} \text{ cm/s}$, respectivamente, em estágios de rebaixamento e de recuperação dos poços. Pelo método de Bouwer & Rice (1976), as médias geométricas das condutividades calculadas foram de $6,15 \text{ E}^{-5} \text{ cm/s}$, e $1,64 \text{ E}^{-4} \text{ cm/s}$, respectivamente para etapas de rebaixamento e de recuperação dos

poços (Quadro 7). Estes valores enquadram o terreno ensaiado na categoria de aquífero pobre (Quadro 6), segundo Benitez (1963).

Os valores obtidos estão consistentes com as características litológicas encontradas nos poços durante sua construção, descritas como silte argilo-arenoso gradando a silte argiloso, laminado, e estão compatíveis com os valores obtidos nos ensaios com permeâmetro *Guelph*.

Análises Granulométricas

Foram realizadas análises granulométricas em 9 amostras de solo coletadas nos mesmos locais onde foram efetuados os testes com permeâmetro *Guelph* (Figura 4). Os resultados encontram-se no Quadro 8.

De acordo com a classificação da ABNT, o tipo litológico argila é o predominante entre as

amostras de solo ensaiadas, com variações para siltosa e silto-arenosa, e secundariamente areias, com variações para silto-argilosa e argilo-siltosa, comprovando sua origem derivada da alteração de sedimentos da Formação Corumbataí. Em termos granulométricos, o solo mostra amplo predomínio das frações argila e silte (Figura 43).

Quadro 8 - Resultados das análises granulométricas

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA									
Classificação	Pedregulho Grosso (%)	Pedregulho Fino (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	Massa específica dos sólidos	Classificação ABNT
Peneira (mm)	> 4,8	4,8 - 2	2 - 0,6	0,6 - 0,2	0,2 - 0,06	0,06 - 0,002	< 0,002	(g/cm ³)	
Amostra									
SG-01	0,0	0,1	1,3	7,6	10,0	19,0	62,0	2,735	Argila silto-arenosa
SG-02	0,0	8,2	12,2	10,7	14,0	33,0	22,0	2,705	Areia silto-argilosa
SG-03	0,0	0,4	0,9	0,6	3,0	22,0	73,0	2,697	Argila siltosa
SG-04	0,0	0,2	1,0	0,3	6,5	16,0	76,0	2,712	Argila siltosa
SG-05	10,3	4,5	4,6	3,6	7,0	31,0	39,0	2,727	Argila silto-arenosa
SG-06	0,0	0,1	1,0	8,9	8,0	27,0	55,0	2,680	Argila silto-arenosa
SG-07	1,5	1,7	2,1	2,7	2,0	21,0	69,0	2,742	Argila siltosa
SG-08	0,4	1,0	2,3	23,3	14,0	27,0	32,0	2,700	Areia argilo-siltosa
SG-09	0,1	0,7	0,7	0,5	7,0	44,0	47,0	2,708	Argila siltosa
Média	1,4	1,9	2,9	6,5	7,9	26,7	52,8	2,712	

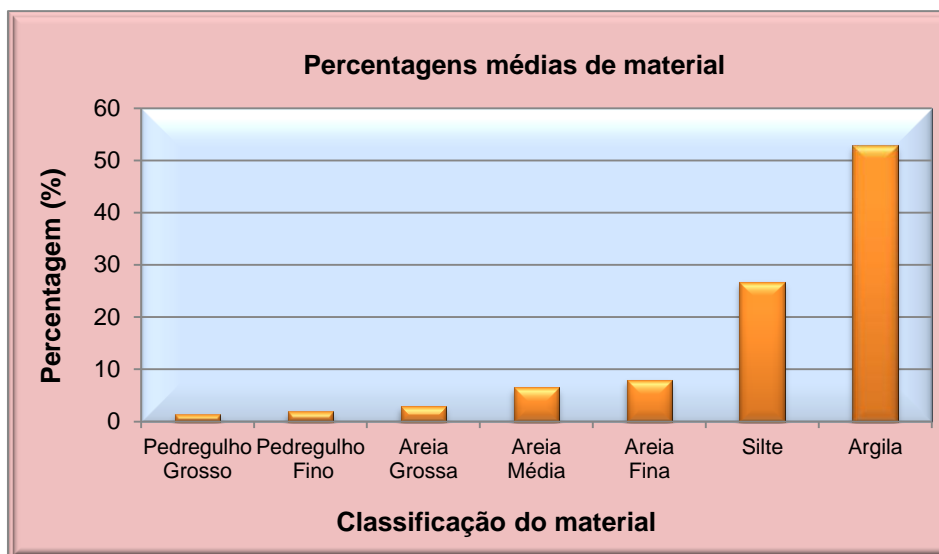


Figura 43 - Percentagens médias de material analisado em ensaios granulométricos.

Porosidade Total e Efetiva

Foram realizados dois ensaios para medição da porosidade total e efetiva em amostras de solo presentes na área minerada, respectivamente nos pontos SG-04 e SG-07 (Figura 4).

A Figura 44 mostra os gráficos obtidos pelos métodos de mesa de tensão e do papel filtro para os pontos SG-04 e SG-07.

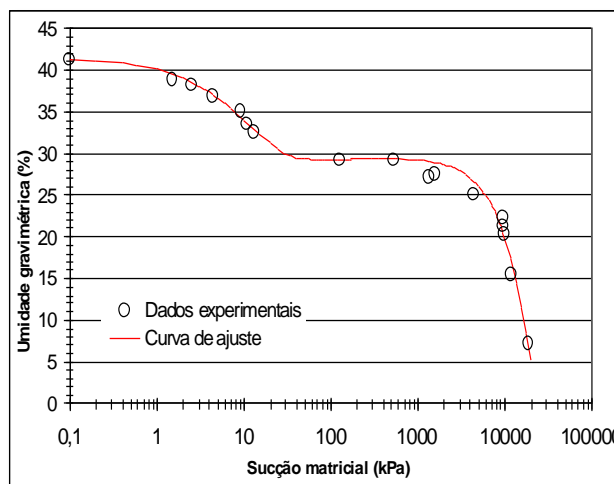
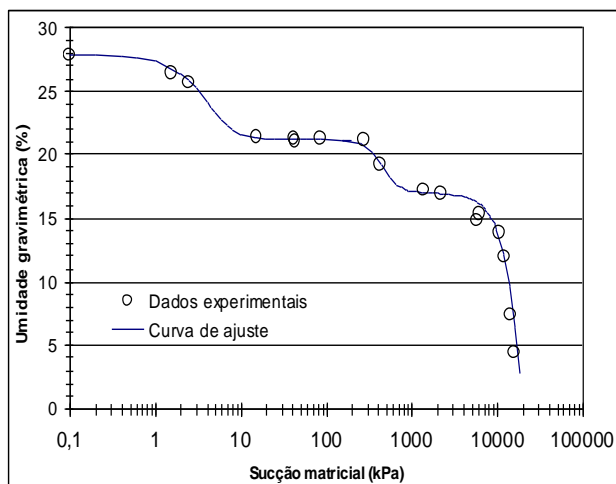


Figura 44 - Curvas de retenção obtidas para os pontos SG-04 e SG-07.

Para cada método ajustou-se, por regressão, a curva de van Genuchten (1980) aos dados experimentais. Os parâmetros das regressões encontram-se na Quadro 9, onde pode se observar que para o método do papel filtro

existem dados referentes ao ajuste de até três curvas de retenção, fato necessário devido à peculiaridade das curvas obtidas para esses solos.

Quadro 9 – Parâmetros de regressão pelo método de van Genuchten (1980)

Parâmetros de regressão pelo método de van Genuchten (1980)							
Amostra	Ajuste	Ws (%)	Wr (%)	a (kPa-1)	n	m	r ²
SG-04	1	27,8	21,2	0,1802	2,0005	1,9412	0,999
	2	21,2	17	0,0021	4,1948	1,1789	0,991
	3	16,9	-7,7	3,20E-05	2,9042	0,9214	0,96
SG-P07	1	41,3	29,1	0,0053	0,9641	16,2236	0,994
	2	29,4	-6,94	2,90E-05	1,6523	0,8471	0,966

Um fato a ser observado nos parâmetros de ajuste são os valores negativos da umidade gravimétrica residual, produzidos pela extrapolação dos dados experimentais. Apesar desses valores não possuírem significado físico, eles foram utilizados para se obter o ajuste apenas nas faixas da curva que contêm dados experimentais.

Os gráficos da Figura 44 mostram que, para baixas sucções (entre 1 kPa e 30 kPa), a amostra SG-04 revela uma curva de retenção típica de solos de textura fina (coerente com sua granulometria), com pequena variação de umidade para essa faixa de sucção; no entanto, a curva de retenção da amostra SG-07 revela maior capacidade de retenção em relação ao solo SG-04.

Nesses solos, sucções acima de 30 kPa forneceram umidades praticamente iguais, em torno de 21% (SG-04) e 29% (SG-07), e ambas as curvas mostraram esse comportamento até aproximadamente 300 kPa. Posteriormente, o solo SG-07 mostrou redução gradual da umidade até próxima de zero, para sucção de 20.000 kPa, aproximadamente. O solo SG-04 mostrou redução escalonada de umidade até a sucção máxima 20.000 kPa, no entanto, com pouca variação de umidade entre 1.000 kPa e 4.000 kPa, provavelmente associada a poros de tamanhos relativamente uniformes nessa faixa de sucção.

Dadas as características peculiares das curvas de retenção de ambas as amostras, procedeu-se à determinação da distribuição dos poros no solo. Isto é possível a partir da equação empregada para descrever a curva de retenção de água no solo:

$$f(\psi) = \frac{mn\alpha(a\psi)^{n-1}}{(1 + (\alpha\psi)^n)^{m+1}}$$

Onde: $f(\psi)$ é a função da probabilidade que determina a distribuição do poro para uma determinada sucção. A Figura 45 mostra os resultados das distribuições obtidas para os solos SG-04 e SG-07.

Observa-se que o solo SG-04 apresenta distribuição multimodal, ou seja, possui aproximadamente três famílias de poros, sendo que os tamanhos predominantes são aqueles que produzem sucções de aproximadamente 4 kPa e 400 kPa, respectivamente.

Essas sucções podem ser transformadas em raios de poros mediante a lei capilar, que é dada pela expressão:

$$(u_a - u_w) = \frac{2.Ts}{r}$$

Onde: $(u_a - u_w)$ corresponde à sucção matricial; Ts , à tensão superficial da água, igual a 0,07275 N/m a 20 °C; e r , ao raio do poro.

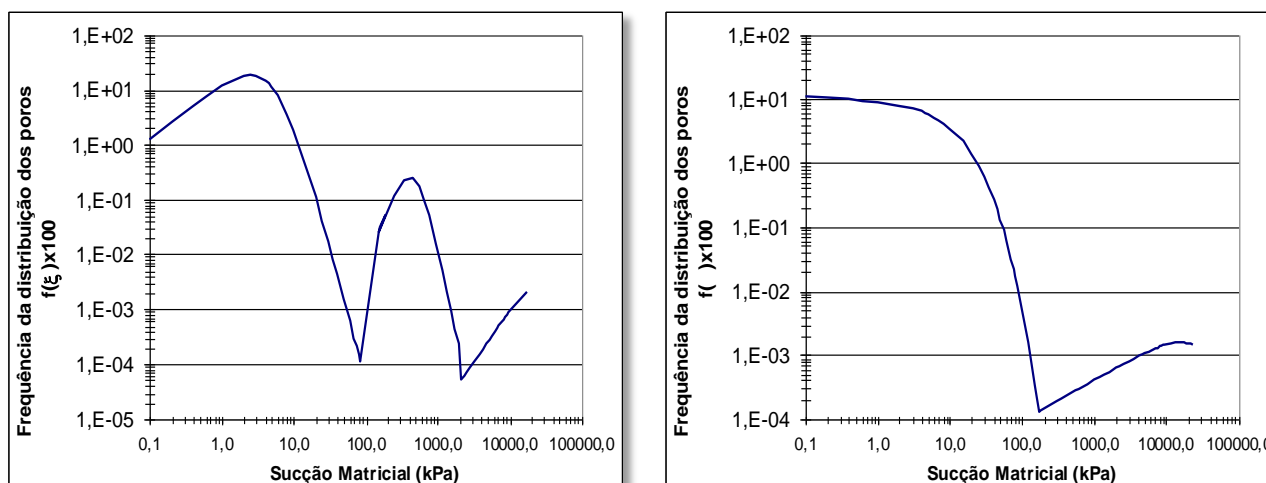


Figura 45 - Distribuição dos tamanhos dos poros para as amostras SG-04 e SG-07.

Desta forma, os tamanhos predominantes nas duas famílias de poros são de 36 μm e 0,4 μm . Esses poros podem ser considerados macroporos, segundo a classificação de Web & Orr (1997), assim definidos para tamanhos acima de 0,05 μm .

O gráfico do solo SG-07 (Figura 45), apesar de mostrar distribuições não muito bem definidas, apresenta duas famílias de poros em que os tamanhos predominantes são aqueles que produzem sucções de 1 kPa e 15.600 kPa que, traduzidas para raios de poros, resultam em 145 μm e 0,09 μm . Estes tamanhos predominantes também podem ser classificados como macroporos, de acordo com Web & Orr (1997).

Outro fator refere-se à primeira família de poros de ambas as amostras. Nessas distribuições, observa-se que o início da redução acentuada dos tamanhos dos poros ocorre, aproximadamente, com a pressão de entrada de ar na curva de retenção (início da dessaturação do solo) e que pode ser interpretada como a capacidade de campo.

Isto ocorre aproximadamente entre 4 kPa e 10 kPa de sucção, respectivamente nos solos SG-04 e SG-07 (Figura 45), corroborando afirmações de diversos autores (p.ex., Ferreira & Marcos, 1983; Andrade *et al.*, 1991) sobre a utilização da umidade volumétrica correspondente à capacidade de campo quando a sucção é igual a 6 kPa ou 10 kPa.

No Quadro 10 são mostrados os resultados das umidades de saturação (Θ_s), de capacidade de campo (Θ_{cc}), relativos aos 6 kPa de sucção, e porosidade efetiva (n_e) para os solos estudados.

A porosidade total e a capacidade de campo das amostras analisadas apresentaram valores relativamente altos, enquanto as porosidades efetivas obtidas indicam baixa capacidade de armazenamento de água subterrânea que efetivamente pode ser liberada por processos gravitacionais, condizentes com a textura argilosa dos solos da área do Polo Cerâmico de Santa Gertrudes.

Quadro 10 - Porosidades total, efetiva e de capacidade de campo

Porosidades total e efetiva, e capacidade de campo			
Descrição	Unidade	SG-04	SG-07
Porosidade total	%	0,43	0,5
Porosidade efetiva	%	0,08	0,06
Porosidade na capacidade de campo	%	0,35	0,44

Monitoramento Fluviométrico

Integrantes do ciclo hidrológico básico, as águas superficiais mostram relações de interdependência com as águas subterrâneas, em que ações perpetradas num dos componentes do ciclo pode interferir no outro.

Durante o período monitorado, de outubro de 2004 a dezembro de 2005, as medições fluviométricas permitiram estabelecer relações matemáticas entre vazão e nível de água (cota) para as cinco estações instaladas em microbacias do Ribeirão Santa Gertrudes, sob influência da atividade minerária. Definidas com consistência, as relações denominadas de curvas-chave permitem a transformação das leituras de nível de nível de água em vazão instantânea,

possibilitando a elaboração de gráficos de escoamento superficial *versus* tempo (fluviogramas). Inicialmente, as medições foram feitas com emprego de molinete e, posteriormente, com vertedores de parede delgada, especialmente dimensionados, em três das estações (Diabásio, Tubulão e Cana).

O Quadro 11 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta as equações obtidas para cálculo das vazões nos postos fluviométricos e o período de validade das mesmas, em função do tipo do aparato empregado. Os dados de nível de água obtidos de leituras em réguas, utilizados nos cálculos fluviométricos, estão dispostos graficamente na Figura 46.

Quadro 11 - Equipamentos de medição e equações de vazão dos postos fluviométricos instalados na área estudada

EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO E EQUAÇÕES DE VAZÃO DOS POSTOS FLUVIOMÉTRICOS			
Posto	Equipamento	Equação de vazão	Validade
Barragem	Molinete hidrométrico	$Q=2,144*(h-0,23)^{1,97}$	desde 08/10/04
Ponte de Madeira	Molinete hidrométrico	$Q= 8,26*(h-0,4)^{1,72}$	08/10/04 a 04/02/05
		$Q= 4,68*[(h-0,42)^{2,5} - (h-0,92)^{2,5}]$	desde 04/02/05
Tubulão	Molinete hidrométrico	$Q = 0,944*(h-0,055)^{1,44}$	30/11/04 a 16/07/05
	Vertedor composto de parede delgada triangular - retangular	$Q2 = 0,678*[h^{2,5} - (h-0,200)^{2,5}] + 1,39*(h-0,200)^{1,50} + 3,06*(h-0,500)^{1,50}$	08/08/2005
Diabásio	Molinete hidrométrico	$Q = 4,54*(h-0,020)^{2,831}$	30/11/04 a 16/07/05
	Vertedor composto de parede delgada triangular - retangular	$Q2= 1,38*(h-0,303)^{1,50} + 3,25*[h^{2,5} - (h-0,303)^{2,5}]$	desde de 08/08/05
Cana	Vertedor composto de parede delgada triangular - retangular	$Q= 1,39*(h-0,196)^{1,50} + 0,709*[h^{2,5} - (h-0,196)^{2,5}] + 3,15*(h-0,496)^{1,50}$	desde 08/11/05

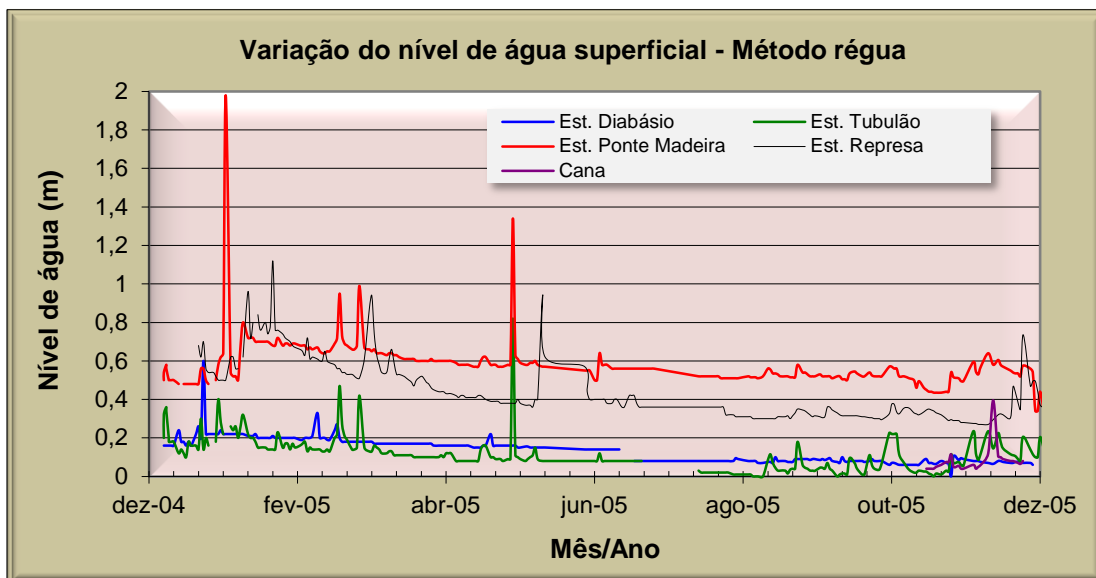


Figura 46 - Monitoramento de nível de águas superficiais pelo método da régua.

O monitoramento contínuo de níveis de água superficial, realizado com transdutor nas estações Diabásio e Ponte de Madeira, mostrou curvas com oscilações concordantes com as variações de precipitação atmosférica registradas na área,

indicando acréscimos proporcionais de vazão em decorrência dos efeitos, quase imediatos, da chuva na microbacia (Figuras 47 e 48).

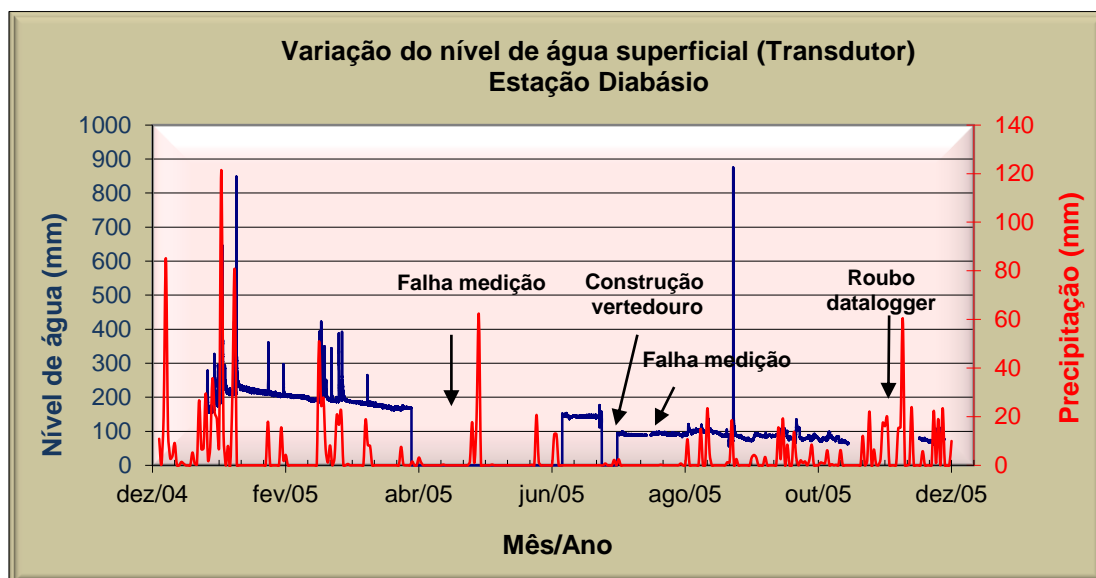


Figura 47 - Variação do nível de água superficial na Estação Diabásio em função da pluvimetria.

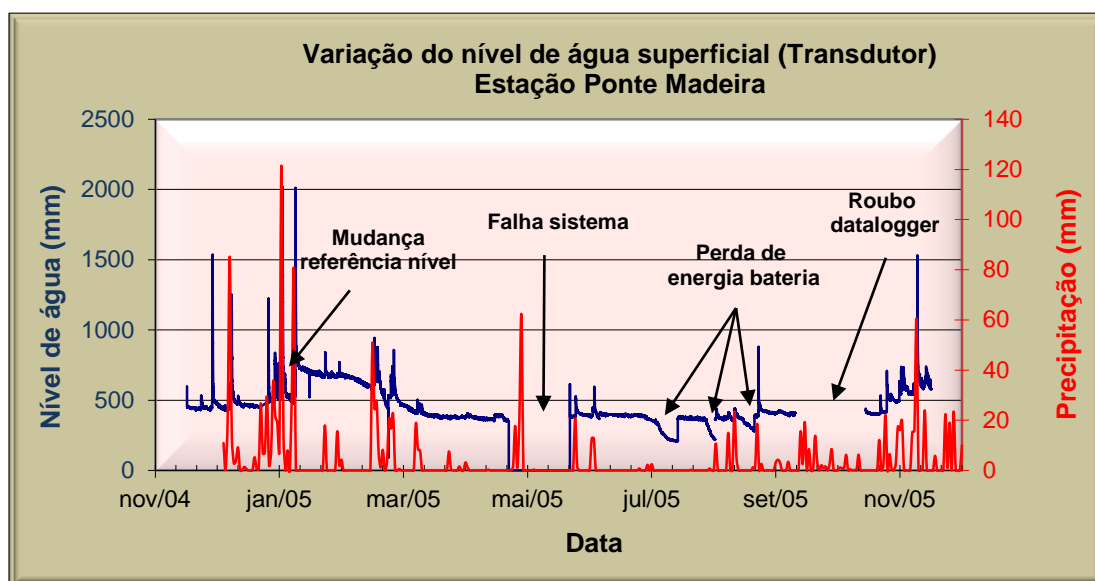


Figura 48 - Variação do nível de água superficial na Estação Ponte de Madeira em função da pluviometria, no período estudado.

Interrupções na aquisição de dados, causadas por roubo e por falhas operacionais relacionadas a problemas eletrônicos dos equipamentos de medição (conjunto transdutor e *data logger*), foram os problemas mais comuns verificados durante o monitoramento das águas superficiais (Figuras 47 e 48). A Figura 48 mostra, ainda, mudança repentina de referência de níveis em virtude de modificação no sistema de medição de vazão, de molinete hidrométrico para vertedor, na estação Ponte de Madeira.

A análise dos gráficos apresentados mostra que a parcela da precipitação transformada em escoamento superficial direto é rapidamente descarregada, e que a parcela proveniente da água subterrânea, acumulada no solo por infiltração e descarregada em forma de escoamento básico, aparenta contribuição pouco expressiva em função do limitado armazenamento subterrâneo da área.

O comportamento hidrológico das microbacias hidrográficas da área estudada foi analisado para o período de janeiro a dezembro de 2005. Este período foi escolhido em razão de haver um equilíbrio entre meses chuvosos e de estiagem, e

com leituras de nível de água diárias em todos os postos fluviométricos. Neste período, o escoamento de base contribuiu com parcela proporcionalmente menor em relação ao escoamento total da bacia. Os resultados são apresentados no Quadro 12.

Os postos fluviométricos Diabásio, Ponte de Madeira e Represa apresentaram valores de contribuição específica similares, variando de 4,17 L/s/km² a 4,5 L/s/km². Somente o posto Tubulão apresentou valor discrepante, que pode estar relacionado tanto a erros de medição como a eventuais danos ambientais, com reflexo nos recursos hídricos. No primeiro caso, os erros devem-se à quantidade insuficiente de registros (apenas uma medida diária), que pode não incluir picos de vazão e fornecer estimativa imprecisa do escoamento total.

Para análise da fase recessiva, foi selecionado o conjunto de dados relativos ao período de março a setembro de 2005, dos postos fluviométricos Diabásio, Tubulão e Ponte de Madeira, que representa praticamente o escoamento de base das microbacias monitoradas (Quadro 13).

Quadro 12 - Dados hidrológicos medidos nas microbacias estudadas, no período de janeiro a dezembro de 2005

Dados hidrológicos medidos na área estudada (06/01/05 a 17/12/05)					
Parâmetros	Un	Estações fluviométricas			
		Diabásio	Tubulão	Pte Madeira	Represa
Área drenada	Km ²	1,15	1,75	5,60	9,00
Período	dias	346	346	346	346
Vazão diária cumulativa	m ³ /s	4,80	5,60	25,40	38,20
Contribuição específica (CE)	L/s/km ²	4,17	3,20	4,50	4,20
Contribuição específica (CE)	m ³ /h/km ²	15,026	11,520	16,200	15,120
Volume acumulado	m ³	414.720	483.840	2.194.560	3.300.480
Volume acumulado específico	m ³ /km ²	360.626	276.480	391.886	366.720
Precipitação	mm	1.305	1.305	1.305	1.305
Volume equivalente	mm	361	276	392	367
Relação volume total / precipitação		0,28	0,21	0,30	0,28

Quadro 13 - Dados hidrológicos medidos nas microbacias estudadas, no período de março a setembro de 2005

Dados hidrológicos medidos na área estudada (26/03/05 a 16/09/05)				
Parâmetros	Un	Estações fluviométricas		
		Diabásio	Tubulão	Pte Madeira
Área drenada	Km ²	1,15	1,75	5,6
Período	dias	174	174	174
Vazão diária cumulativa	m ³ /s	1,77	1,64	8,93
Contribuição específica (CE)	L/s/km ²	1,54	0,94	1,59
Contribuição específica (CE)	m ³ /h/km ²	5,541	3,374	5,741
Volume acumulado	m ³	152.928	141.696	771.552
Volume acumulado específico	m ³ /km ²	132.981	80.969	137.777
Precipitação	mm	213	213	213
Volume equivalente	mm	133	81	138
Relação volume total / precipitação		0,62	0,38	0,65

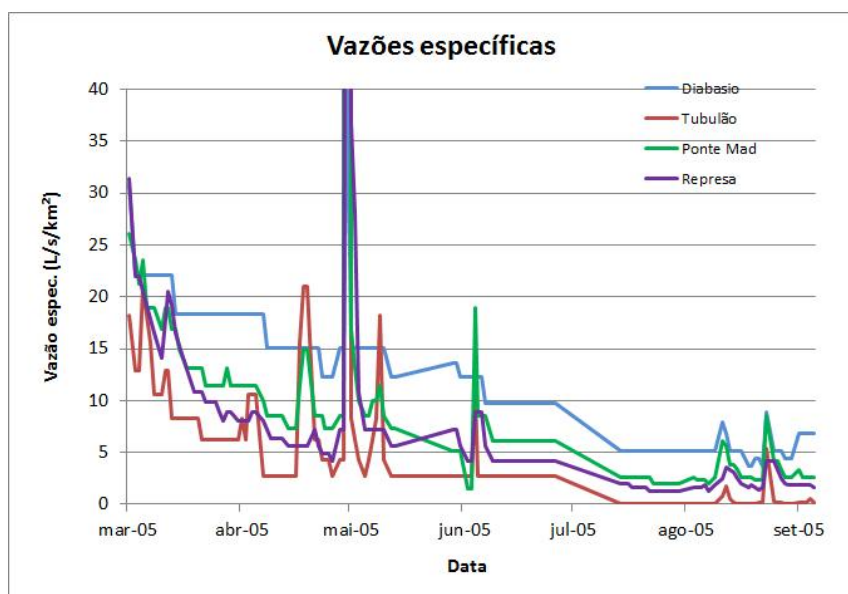


Figura 49 - Variação das contribuições específicas do período recessivo nas microbacias estudadas.

Neste segundo período analisado (Quadro 13 e Figura 49), observa-se que a contribuição específica das estações Diabásio e Ponte de Madeira também são similares, variando de 1,54 L/s/km² a 1,59 L/s/km², enquanto no posto

Tubulão este parâmetro foi calculado em 0,94 L/s/km², ou seja, 40% menor do que o calculado para as outras estações. Como o escoamento analisado neste período pode ser atribuído quase que exclusivamente ao escoamento de base, a diferença na contribuição específica entre a estação Tubulão e as demais, desconsiderando os eventuais erros de medição comentados anteriormente, fornece uma ordem de grandeza das perdas hídricas causadas pela atividade minerária até aquele momento.

A análise da Figura 49 mostra que as contribuições específicas calculadas da estação Tubulão, ao longo do período analisado, decrescem progressivamente até se tornarem nulas no período mais intenso de estiagem.

Estimativa das Perdas Hídricas Anuais

Com base nos dados hidrogeológicos e hidrológicos adquiridos nesta pesquisa, as estimativas de perdas hídricas anuais puderam ser avaliadas por três métodos diferentes, considerando dados obtidos em dois períodos distintos: o primeiro compreendendo um ciclo hidrológico anual (06/01/2005 a 17/12/2005), e o segundo um período recessivo semestral (26/03/2005 a 16/09/2005).

O método 1 apresenta estimativa que computa somente as perdas hídricas diretas causadas pela retirada da cobertura do solo regulador. O método 2 é um exercício teórico que considera perda de 100% da água de precipitação direta retida nas cavas. O método 3 emprega medições fluviométricas adquiridas no presente estudo e estima a perda hídrica na microbacia afetada pela atividade minerária, com base na contribuição específica do período recessivo.

Método 1 - Perda por Remoção do Solo

Com base no arcabouço geológico e nas características hidrogeológicas, o armazenamento de água subterrânea da região investigada ocorre somente nas camadas mais superficiais, representadas pelo material siltico-argiloso resultante da alteração das rochas pelíticas da Formação Corumbataí, subjacente, cujo comportamento hidrodinâmico regional é de um aquífero.

Durante os períodos pluviosos mais intensos, esta capa delgada (2 metros a 7 metros de espessura) absorve parte da precipitação atmosférica de modo rápido (período de retardo pequeno), fazendo os níveis de água também se elevarem rapidamente. Cessadas as chuvas, os níveis decrescem de modo mais lento, até que novo evento de chuva produza nova elevação.

Essas alternâncias apresentam tendências generalizadas que seguem ciclos sazonais bem definidos na área estudada: um ciclo relativo ao período de recessão ou depleção do reservatório, que compreende março a novembro (nove meses) e outro, de recarga, que vai de dezembro a fevereiro (3 meses). No ciclo depleitivo, a descarga subterrânea é maior do que o reabastecimento provocado pelas precipitações do período; no ciclo de reabastecimento, a recarga promovida pelas chuvas é maior do que a descarga subterrânea natural.

A estimativa de perdas hídricas por remoção do solo implica no conhecimento e distribuição dos parâmetros hidrodinâmicos das zonas portadoras de água subterrânea na microbacia, como porosidade efetiva, condutividade hidráulica horizontal e transmissividade. Conhecidos estes parâmetros e mais a variação da superfície potenciométrica ao longo do ciclo anual, é

possível estimar valores de escoamento de base com boa precisão, desenvolvendo-se um modelo matemático de fluxo. Na prática, a elaboração de um modelo matemático para um meio heterogêneo, complexo e com uma superfície potenciométrica que reage rapidamente às variações pluviométricas exige uma quantidade maior de informações do que aquelas adquiridas ao longo da pesquisa.

Por esta razão, a estimativa da perda hídrica por remoção de solo foi feita com base na variação do volume de água contido na zona saturada, em toda extensão da área requerida para mineração, compreendido pelas superfícies de nível de água máximo (período de recarga) e mínimo (período recessivo), de acordo com as medições sistemáticas do nível de água dos poços de monitoramento (Figura 50).

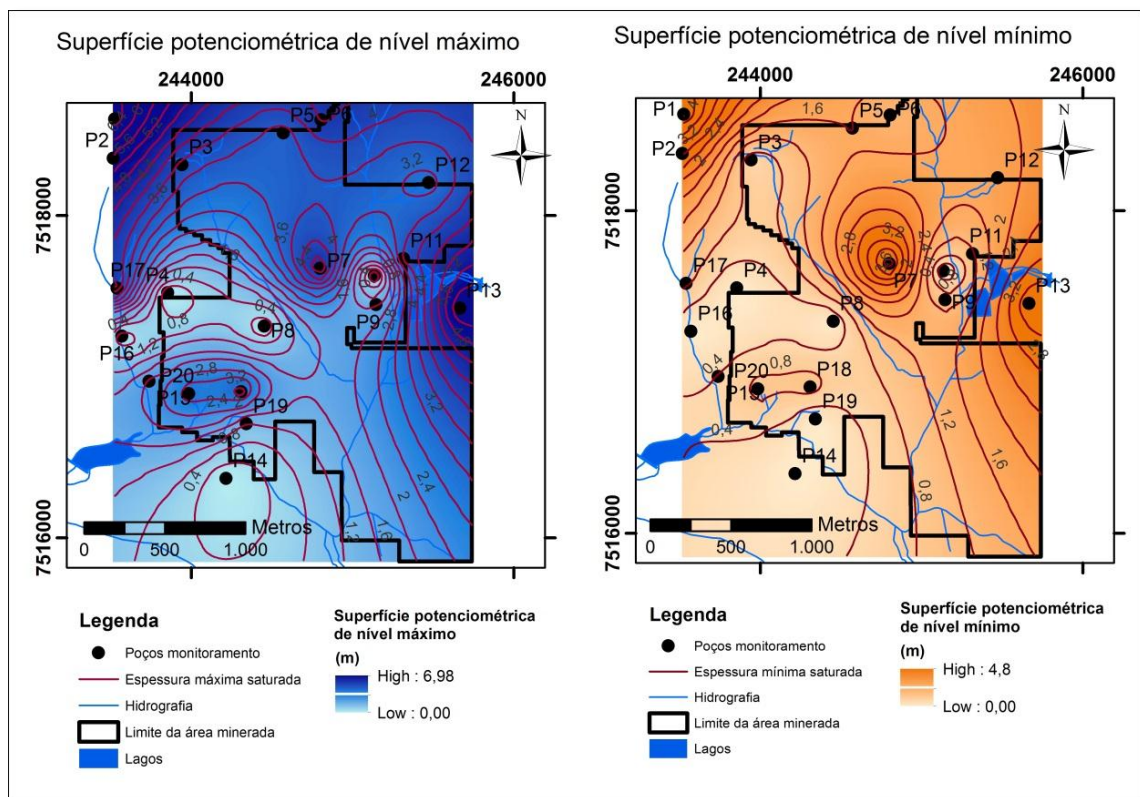


Figura 50 - Mapas de contorno das superfícies de nível potenciométrico máximo e mínimo.

Para o cálculo volumétrico da zona saturada foi utilizado o método de *krigagem* do software *Surfer 8.0*, que computou 4.249.000 m³ de volume de solo compreendido entre as superfícies de níveis de água máximo e mínimo, no âmbito da área total requerida para pesquisa, correspondente a 3,6 km².

O volume efetivo de água armazenado neste intervalo, em regime transitório, que foi descarregado nos corpos de água superficiais, foi estimado aplicando-se um valor de porosidade específica de 6%, com base em ensaios em

amostras indeformadas obtidas na área. Como a variação de níveis máximo e mínimo ocorreu num período de 9 meses, o volume efetivo descarregado pelo solo foi extrapolado para o período anual, obtendo-se valor de 340.000 m³. Considerando-se o cenário de 1 km² de área degradada em 2005, o volume total perdido pela remoção do solo foi de 94.000 m³, equivalente à vazão de 11 m³/h. Para um cenário futuro que abrangesse o total da área requerida para pesquisa (3,6 km²), o impacto seria correspondente a 39 m³/h (Quadro 14).

Quadro 14 - Estimativa de perdas hídricas pelo método de remoção do solo

Método 1 - Perda por remoção do solo		
Volume total de solo com perda hídrica	m ³	4.248.807
Área requerida de pesquisa	km ²	3,6
Área degradada atual	km ²	1
Área degradada no cenário futuro	km ²	3,6
Porosidade efetiva do solo	%	6
Volume total anual de água removido por perda hídrica	m ³	339.904
Volume de água anual removido da área degradada atual	m ³	94.418
Vazão equivalente atual	m ³ /h	10,8
Volume anual de água removido no cenário futuro	m ³	339.904
Vazão equivalente futura	m ³ /h	38,8

Método 2 - Perda por Evaporação nas Cavas

Este método consistiu em estimar o volume de água resultante da precipitação atmosférica direta sobre a área das cavas, que permaneceria aprisionado em nível abaixo da área de proteção permanente (APP) dos cursos de água superficiais. O método considera que a água aprisionada nas cavas não retorna ao curso superficial e as perdas hídricas seriam todas devidas à evaporação. A cubagem do volume retido considera a precipitação total anual sobre a

área das cavas, descontada a parcela correspondente à evapotranspiração na microbacia, a qual foi calculada em 72%, com base na relação entre precipitação total e escoamento total (0,28), obtidos na estação Diabásio (Quadro 12).

De acordo com este método, o volume de perdas hídricas nas áreas das cavas (1 km²), correspondente ao cenário de 2005, atingiria valor

de 360.000 m³, equivalente à vazão de 43 m³/h. Supondo-se a ampliação da escavação para toda a área requerida (cenário improvável), o volume

de perdas hídricas alcançaria cerca de 1.300.000 m³, equivalente à vazão de 156 m³/h (Quadro 15).

Quadro 15 - Estimativa das perdas hídricas por evaporação nas cavas

Método 2 - Perdas por evaporação nas cavas		
Área da cava atual	Km ²	1,0
Área da cava futura	Km ²	3,6
Volume total de chuva nas cavas atuais	m ³	1.305.000
Volume retido nas cavas atuais	m ³	360.626
Vazão equivalente atual	m ³ /h	43
Volume retido nas cavas futuras	m ³	4.698.000
Volume total perdido nas cavas futura	m ³	1.298.254
Vazão equivalente futura	m ³ /h	156

Método 3 - Perda por Déficit de Escoamento Total

Este método consiste no cálculo das diferenças entre as contribuições específicas das microbacias presentes na área pesquisada, no período recessivo, quando a contribuição do escoamento de base é preponderante sobre o escoamento superficial. As diferenças refletem as perdas hídricas permanentes, decorrentes da retirada da cobertura de solo que armazena e libera água para manutenção do fluxo de base das bacias.

Para cálculo das perdas volumétricas no cenário de 2005 considerou-se a microbacia da estação Diabásio como área de referência não degradada; por sua vez, a microbacia da estação Tubulão foi considerada como área em processo de degradação. A diferença dos valores de contribuição específica entre estas duas microbacias foi de 0,6 L/s/km² no período recessivo de 6 meses, resultando em perda

volumétrica anual de cerca de 33.000 m³ ou 3,8 m³/h. Neste cálculo, admite-se que essas perdas são exclusivas da microbacia Tubulão, cuja área comprometida pela degradação é da ordem de 0,65 km², ou seja, 37% do total.

Considerando a área degradada de 1 km² em todo o polo estudado, com base no ano de 2005, e admitindo-se contribuição específica média de 1,55 L/s/km², obtida nas microbacias não comprometidas pela atividade minerária, as perdas hídricas foram estimadas em 50.900 m³ anuais, ou 5,8 m³/h.

Para o cenário futuro, considerando toda a área requerida (3,6 km²), a estimativa com base nas proporções das áreas degradadas alcançou perda hídrica anual da ordem de 183.000 m³, ou 21 m³/h (Quadro 16).

Quadro 16 - Estimativa das perdas por déficit de escoamento total

Método 3 - Estimativa das perdas hídricas por déficit de escoamento total					
Cenários	Local	Área (km ²)	CE (L/s/km ²)	Perdas Anuais (m ³)	Perdas (m ³ /h)
2005	Microbacia Tubulão	1,75	0,6	33.113	3,8
2005	Área minerada atual	1,00	1,55	50.918	5,8
Final da exploração	Área total de pesquisa	3,60	1,55	183.303	20,9

Avaliação das Perdas Hídricas

O Quadro 17 apresenta um resumo das estimativas das perdas hídricas na bacia do Ribeirão Santa Gertrudes provocadas pelas atividades mineiras, calculadas pelos métodos descritos anteriormente. As estimativas foram efetuadas para o cenário existente em 2005 e para o cenário projetado para o final da lavra, correspondente à situação de maior degradação da bacia.

O valor obtido pelo método 1, de 11 m³/h para 2005, estima somente a contribuição do

escoamento subterrâneo com base na variação volumétrica da zona saturada, desconsiderando o fluxo natural governado pelo gradiente e pela condutividade hidráulica do solo, uma vez que existe escoamento de base mesmo sem haver variação de nível (recarga é igual à descarga).

Portanto, o valor calculado por este método deve ser considerado um valor mínimo.

Quadro 17 - Resumo das estimativas de perdas hídricas

Resumo das perdas hídricas			
Cenário	Método 1	Método 2	Método 3
2005	11 m ³ /h	43 m ³ /h	4 m ³ /h
Final da exploração	39 m ³ /h	156 m ³ /h	21 m ³ /h

O método 2 apresenta um valor da ordem de 43 m³/h para 2005, que retrata uma situação extrema em que as cavas abertas abaixo da APP aprisionam a água proveniente das precipitações diretas, cujo volume é proporcional à área escavada e ao escoamento total (superficial e de base) anual da microbacia. Esta condição

somente ocorreria no caso de cavas abandonadas, com piso abaixo do nível da APP e sem ponto de descarga.

O método 3, baseado em dados fluviométricos obtidos em campo, forneceu valor de 22 m³/h para 2005.

Tendo em consideração as dificuldades operacionais relatadas para a aquisição de dados de campo e o período curto de monitoramento, correspondente a apenas um ano hidrológico, as estimativas apresentadas representam uma ordem de grandeza das perdas hídricas da microbacia. Estimativas por este método podem ser refinadas com a continuidade do monitoramento fluviométrico e consequente aquisição de número maior de dados hidrológicos.

Analisando as limitações inerentes a cada método e os valores correspondentes de perda hídrica,

conclui-se que a estimativa feita com base no déficit de escoamento total, da ordem de 4 m³/h, é a que melhor traduz as vazões perdidas na bacia do Ribeirão Santa Gertrudes, em decorrência das atividades de mineração desenvolvidas até 2005.

Considerando que as exigências atuais dos órgãos fiscalizadores impõem critérios rígidos de lavra com o intuito de minimizar impactos ambientais, as perdas hídricas estimadas de 21 m³/h para o que se definiu como cenário final de lavra (ou seja, toda a área requerida) não devem se concretizar.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

É notório o fato de que a atividade extrativa de minério de argila, de incontestável importância econômica para o Município de Santa Gertrudes (SP), produz grandes transformações ambientais na medida em que os processos exploratórios se intensificam para atender às demandas do mercado consumidor. Os impactos ambientais podem se fazer notar no ar, no solo, nos recursos hídricos e na paisagem. A poluição do ar é ocasionada pela emissão de partículas de poeira na atmosfera. Os danos ao solo podem ser causados pela retirada da cobertura vegetal, expondo-o aos processos erosivos. Os recursos hídricos podem ser afetados em decorrência da diminuição da taxa de infiltração, decréscimo do armazenamento subterrâneo e diminuição da vazão dos cursos de água superficiais. A alteração do meio físico pode provocar a destruição de nichos ecológicos e afetar a fauna e a flora. Neste ponto, não se pode desconsiderar a influência das áreas agricultáveis nos impactos ambientais, de menor intensidade, porém, de abrangência areal maior. O modo e o grau como cada uma dessas atividades vão intervir no meio ambiente vai depender das formas de manejo e do uso do solo.

Foto aérea da área minerada, datada de junho de 1995, mostra que a paisagem era dominada por canaviais e que a cobertura vegetal nativa restringia-se às matas que circundavam os córregos e nascentes (Figura 51 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Neste caso, danos ambientais já haviam sido conferidos à área em razão da intensa atividade agrícola de plantio de cana-de-açúcar. A atividade mineral, sem dúvida, aprofundou os impactos, ainda que em áreas mais restritas.

As transformações ambientais, decorrentes das atividades extrativistas realizadas no Polo Ceramista de Santa Gertrudes (SP), constituem fase transitória, cuja duração depende do volume de minério existente e das quantidades anuais extraídas. Ao término da exploração deverá estar implementado, integralmente, o plano de recomposição das áreas degradadas. A elaboração e execução de um bom projeto de recuperação, transformando um problema ambiental, por exemplo, em uma área de proteção (APA), com recomposição da vegetação nativa, formação de habitats para abrigo de fauna endêmica e aproveitamento racional dos recursos hídricos disponíveis, poderá proporcionar grande benefício para a população da região.

Segundo os estudos realizados, os recursos hídricos disponíveis do Ribeirão Santa Gertrudes, em especial aqueles provenientes da microbacia aqui denominada Diabásio, poderiam ser aproveitados nos planos de recuperação das áreas degradadas para a formação de lagos.



Figura 51 - Foto aérea da área em junho de 1995 e a área autorizada para lavra, em 2005.

Esses lagos cumpririam várias funções, desde ecológicas, biológicas, até hidráulicas. Neste último caso, serviriam como reservatórios para amortecimento de cheias e de regulação de vazão. De acordo com dados fluviométricos levantados neste estudo, as vazões do período de chuva da microbacia Diabásio (dezembro a fevereiro) alcançaram média de 106 m³/h, contra média anual 47 m³/h. Os cálculos fornecem superávit médio mínimo de 58 m³/h, para os três primeiros meses do ano. Esta vazão seria suficiente para manter reservatórios de água, de 4 metros de profundidade, distribuído em área de 31.000 m². Estes valores são apenas ilustrativos, pois a magnitude dos lagos em termos de volume hídrico e extensão areal dependerá da disponibilidade hídrica real e das características geotécnicas das cavas, devidamente consideradas em projeto de recuperação ambiental específico.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os estudos hidrogeológicos e hidrológicos, realizados na área do Polo Ceramista de Santa Gertrudes, permitiram estimar os danos aos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, decorrentes da atividade de extração de argila para suprimento da demanda industrial regional de revestimento cerâmico.

Os danos hídricos foram avaliados, em seus aspectos de quantidade e de qualidade, por meio de monitoramento de dados pluviométricos, fluviométricos, de poços de observação e de análises físico-químicas de amostras de águas

superficiais e subterrâneas. Dados complementares, necessários para a caracterização do arcabouço hidrogeológico da área, compreendendo levantamento geológico, caracterização de parâmetros hidrodinâmicos e análises granulométricas de amostras de solo, também foram obtidos durante as atividades de pesquisa.

O dano da quantidade, ou perda hídrica, pode representar um prejuízo permanente, se não for controlado ou mitigado, em decorrência da eliminação do solo que regula o volume transiente

de água, responsável pela sustentação do escoamento de base das microbacias. As perdas hídricas estimadas em 2005, relativas às áreas mineradas, podem ser consideradas pequenas, tanto em valores absolutos (4 m³/h), como em relação ao valor conservador de 187 m³/h, correspondente ao Q_{7,10} (FUNDUNESP, 2004), aplicado a toda a Bacia do Ribeirão Santa Gertrudes. Danos futuros podem e devem ser minimizados com o desenvolvimento de plano de lavra adequado, que combine extração em determinadas áreas e recomposição simultânea em outras.

O dano de qualidade das águas superficiais, caracterizado pela turbidez e excesso de sólidos em suspensão, representa um prejuízo temporário que se manifesta ocasionalmente e é fruto das intensas precipitações ocorridas na área, principalmente após períodos longos de estiagem. Este tipo de dano é o mais sentido pelo setor de tratamento e abastecimento de água da Prefeitura Municipal de Santa Gertrudes, pois pode causar grande inconveniente e mesmo comprometimento do fornecimento de água à população. As atividades de mineração produzem grande quantidade de material argiloso que, carregado pelas águas pluviais, degrada os córregos das microbacias locais. Não se pode descartar, porém, a forte contribuição das áreas agricultáveis na degradação temporária das águas superficiais.

Para minimizar problemas de abastecimento de água de Santa Gertrudes foram sugeridos:

- Ampliação do sistema de reservação de água tratada para garantir período maior de abastecimento, em caso de excesso de turbidez no ponto de captação;
- Aproveitamento das cavas exauridas para regularização das vazões dos córregos e armazenamento do excedente hídrico;
- Perfuração de poços no Sistema Aquífero Tubarão para auxiliar o abastecimento público;

- Melhoramentos no sistema de captação de Santa Gertrudes;
- Captação alternativa direta no Córrego do Barreiro (afluente do Ribeirão Santa Gertrudes).

Para o controle da qualidade e da quantidade dos recursos hídricos, recomendou-se que a Associação Paulista das Cerâmicas de Revestimento (ASPACER) seja responsável pelo monitoramento da água superficial que drena as microbacias afetadas pelas atividades mineiras, fornecendo relatórios mensais à CETESB e auxiliando na fiscalização do cumprimento das exigências ambientais ao longo do período de lavra. A associação monitoraria, inclusive, a água retida nas cavas por precipitação atmosférica e devolvidas aos córregos após decantação do material fino. Desta forma, o prosseguimento do monitoramento melhoraria o nível de conhecimento hidrológico da área, refinaria as estimativas de perdas hídricas aqui apresentadas e contribuiria para o desenvolvimento de planos de lavra eficazes em preservação ambiental.

A transformação da área minerada em área de proteção ambiental (APA) seria uma boa opção para compensar os danos e prejuízos causados ao meio ambiente e à população de Santa Gertrudes. O desenvolvimento de projeto paisagístico de recuperação da área, considerando as possibilidades de aproveitamento das cavas exauridas para formação de lagos, restituiria os aspectos estéticos da paisagem e reduziria ao máximo eventuais danos permanentes. Os lagos formados pelo armazenamento do excedente hídrico superficial constituiriam importantes reservas de água para utilização no abastecimento público em períodos prolongados de estiagem, como vivenciados nos últimos anos no Estado de São Paulo. Ou mesmo em períodos de chuvas intensas, quando o tratamento de águas superficiais se torna muito oneroso ou mesmo impraticável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AITCHISON, G. D.** 1965. Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas. A. Symp. In Print, Aitchison, G. D., Ed. Austrália: Butterworths, pp. 78.
- ANDRADE, C.L.T.; FREITAS, J.A.D.; LUZ, L.R.Q.P.** 1991. Características físico-hídricas de solos arenosos de tabuleiro litorâneos. *In*: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 9, Natal. Anais..., ABID. v. 1, p. 1069-1095.
- BENÍTEZ, A.** 1963. Captación de aguas subterráneas: Nuevos métodos de prospección y de cálculo de caudales, Dossat, Madrid, p.157.
- BONELL, M.** 1972. An assessment of possible factors contributing to well level fluctuations in Holderness boulder clay, East Yorkshire. *Journal of Hydrology* 16 (4): 361-368.
- BOUWER, H. & RICE, R.C.** 1976. A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, *Water Resources Research*, vol. 12, no. 3, pp. 423-428.
- BROOKS, R.H. & COREY, A.T.** 1964. Hydraulic properties of porous media. *Colorado State Univ. Hydrol.*, no 3, p. 27.
- CABRAL JUNIOR, M.; GAMBAA, C.T.C.; TANNO, L.C.; ALMEIDA, A.S. & CRUZ, T.T.** 2013. Potencial das Reservas de Argila para o Suprimento do Polo Cerâmico de Santa Gertrudes – SP: Onde o Recurso Mineral faz a Diferença. *Cerâmica Industrial*, 18 (2) Março/Abril.
- CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL.** 1997. Uso das águas subterráneas para abastecimento público no Estado de São Paulo. São Paulo. 48 p.
- CHANDLER, R.J.; CRILLY, M.S. & MONTGOMERY-SMITH, G.** 1992. A low cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, 92, p.82-89.
- CRONEY, D. & COLEMAN, J.D.** 1960. Pore pressure and suction in soil. *Conference on Pore Pressure and Suction in Soils. London, Proceedings...*, p. 31-37.
- CUSTODIO, E. & LLAMAS, M.R.** 1996. *Hidrologia Subterránea*. Barcelona, Ediciones Omega S.A.
- DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA.** 1981. Estudo de águas subterráneas, região administrativa 5, Campinas. São Paulo. v. 1 e v. 2.
- DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA.** 2000. Sistema de informações para gerenciamento de recursos hídricos do Estado de São Paulo. São Paulo. CDROM.
- FERREIRA, M.M. & MARCOS, Z.Z.** 1983. Estimativa da capacidade de campo de latossolo roxo distrófico e regosolo através do ponto de inflexão da curva característica de umidade. *Ciência e prática*, Lavras, v. 7, no 1, p. 96-101.
- FREDLUND, D.G.; XING, A. & HUANG, S.** 1994. Predicting the permeability functions for insaturated soil using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 31, n° 4, pp. 533 – 546.
- FUNDUNESP.** 2004. Parecer técnico sobre interferência da atividade minerária argileira nos recursos hídricos da bacia do Rio Santa Gertrudes, Município de Santa Gertrudes (SP).
- FUNDUNESP.** 2005. Interferência da Atividade Minerária Argileira nos Recursos Hídricos da Bacia do Ribeirão Santa Gertrudes, Município de Santa Gertrudes (SP). Relatório.

- GAMA JR., E.** 1979. A sedimentação do Grupo Passa Dois (Exclusive Formação Irati): Um modelo geomórfico. Rev. Bras. Geoc. 9 (1): 1-16.
- GAMA JR., E.** 1979. A sedimentação do Grupo Passa Dois (Exclusive Formação Irati): Um modelo geomórfico. Rev. Bras. Geoc. 9 (1): 1-16.
- GARDNER, W.R.** 1937. A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range. Soil Science, v.4, n.4, p.277-283.
- HG – GEOLOGIA E MEIO AMBIENTE.** 2004. Avaliação da potencialidade hídrica na Bacia do Ribeirão Santa Gertrudes. Relatório.
- HILLEL, D.** 1971. Soil and water. *In*: Physical Principles and Processes. (Academic Press: New York).
- HVORSLEV, M.J.** 1951. Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations, Bull. No. 36, Waterways Exper. Sta. Corps of Engrs, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, pp. 1-50.
- IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO.** 1981. Mapa geológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000. São Paulo, IPT, v.1 e v.2.
- MARIANO, I. B. & HERRMANN, H.** 2004. Análise dos impactos da exploração do complexo argileiro na vazão do Ribeirão Santa Gertrudes – Parecer técnico, jurídico e institucional. Relatório.
- MARINHO, F.A.M.** 1994. Medição de sucção com o método do papel-filtro. Anais 10º COMBRANSEF, vol. 2, p. 515-522.
- NOGUEIRA, J.B.** 1998. Mecânica dos Solos: Ensaio de laboratório. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo – USP. Editora EESC-USP. 248 p.
- PINTO, N.L.S., HOLTZ, A.C.T., MARTINS, J.A. & GOMIDE, F.L.S.** 1976. Hidrologia básica. São Paulo, Edgard Blucher. 278 p.
- REICHARDT, K.** 1988. Capacidade de campo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 12, p. 211-216.
- REICHARDT, K.** 1996. Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas. Piracicaba. ESALQ, 505 p.
- REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E.; TOPP, G.C.** 1983. A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. Soil Science, v.136, p.250–268.
- REYNOLDS, W.D. & ELRICK, D.E.** 1985. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and α -parameter using the Guelph permeameter. Soil Sci., 140, pp. 292-302.
- RICHARDS, B.G.** 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. Physics, New York, 1. p. 318-333.
- SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP.** 1991. Guelph Permeameter: Operating Instructions. Santa Bárbara.
- SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP.** 1986. Guelph Permeameter. Operating - Instructions, Soilmoisture manual, Rev.8, p.1-25.
- SOTO M.A.** 2004. Comparação entre métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP, São Carlos, p.213.
- TIMELY ENGINEERING SOIL TESTS, LLC.** (<http://www.test-llc.com>). Acesso em 25 de agosto de 2016.

VAN GENUCHTEN, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc.Am.J., vol. 44, n^o 5, pp. 892 – 898.

VEIHMEYER, F.J. & HENDRICKSON, A.H. 1931. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. Soil Science, Baltimore, v. 68, no 2, p.75-94.

VILAR, O.M. & BUENO, B.S. 1995. Mecânica dos solos. São Carlos, Seção de Publicação da EESC - USP, Departamento de Geotecnia, v1, p.131.

WEBB, P.A. & ORR, C. 1997. Analytical Methods in Fine Particle Technology. Micromeritics Instrument Corporation, Norcross- GA, USA, 301p.