

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO EM ÁREA INDUSTRIAL IMPACTADA POR MERCÚRIO E  
DISCUSSÃO DE ALTERNATIVAS PARA REMEDIAÇÃO

Marcel Müller

Orientador: Prof. Dr. Joel Barbujani Sígolo  
Co-orientador: Geól. Andréia Yoshinari

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-12 / 30)

SÃO PAULO  
2012

CARACTERIZAÇÃO EM ÁREA INDUSTRIAL IMPACTADA POR MERCÚRIO  
E DISCUSSÃO DE ALTERNATIVAS PARA REMEDIAÇÃO

Marcel Müller

Orientador: Prof. Dr. Joel Barbujani Sígolo  
Co-orientador: Geól. Andreia Yoshinari

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-12 / 30)

*Aluno:* \_\_\_\_\_

*De acordo:* \_\_\_\_\_

SÃO PAULO  
2012

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à minha família, mãe, pai e irmã por acreditarem e confiarem em mim, sem vocês eu não teria alcançado as conquistas desses últimos seis anos.

Gostaria de agradecer à Geoklock Consultoria e Engenharia Ambiental e a geóloga Andréia Yoshinari pelos dados e materiais concedidos, sem essa parceria o projeto não seria concebido.

Agradeço ao professor Joel Barbujani Sígolo pela orientação e pela confiança dada a mim durante todo o desenvolvimento do trabalho.

Aos geólogos e amigos de trabalho da Geoklock, Danilo (Gonzo), Lucas (Sal) e Dayse pelo atendimento às minhas intermináveis dúvidas e discussões que sempre proporcionaram novas idéias, muito obrigado pela ajuda!

Ao amigo Diego (Diegão/Açafrão/Pirola/Pillow) pelas discussões inacabáveis sobre o universo e sua existência, e de suas manias intransmutáveis. Ao amigo Jullianno por inserir o município de Sabaúna em minha vida e por todas as tristezas e alegrias que dividimos junto ao timão, desde o rebaixamento em 2007 até conquista da libertadores em 2012, vai Corinthians! Muito obrigado a ambos pela convivência sempre serena no alojamento e por tudo que passamos juntos durante minha graduação.

Gostaria de agradecer toda a Turma-50 pela convivência e experiências vividas tanto nas viagens de campo quanto nas salas de aula, em especial ao companheirismo dos amigos André Polistchuck (Pau-M), Dhaniel Antunes (Zaca), Éldon Alves Marcelino Trindade Tobago (Intimus), Fernando Uchidobola (Bobo) e Lucas Blanes (Catu), que sempre estiveram presentes em todas as etapas da graduação. Também aos amigos Gustavo Saka (Mihang) nosso eterno *number one*, Leonardo Aguiar (Cotoco) consultor geológico particular, Adinan Jarouche (Placenta) pela nossa batalha final no instituto de física e ao Matheus Andrade (Perobo) pela semelhança na musicalidade dos tempos de meninice.

Também agradeço a todos amigos de Americana pela descontração aos finais de semana, em especial aos irmãos Bruno Gobbo e Nicholas Gobbo pelas inúmeras caronas, ao mano Goy por nunca deixar as coisas enfraquecerem, e ao meu irmão e chef Lucas Liberatore por sempre estar presente pra tudo que precisei, muito obrigado pela amizade de vocês. Agradeço também a Daniella Prado Camargo pelas conversas e conselhos nos momentos difíceis e pela alegria nos dias de descontração, tu tu tu tá.

E, finalmente, agradeço à minha namorada Janaina Ferreira pela pessoa maravilhosa que é, por todas as experiências, aprendizados e amor compartilhado durante todo o tempo em que estamos juntos. Obrigado pela confiança e apoio!

## ÍNDICE

<b>RESUMO .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>ii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos e Justificativas .....	1
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>2</b>
2.1. Localização e Caracterização do Local.....	2
<b>2.2. Aspectos Regionais do Meio Físico .....</b>	<b>2</b>
2.2.1. Relevo e Hidrografia .....	2
2.2.2. Geologia Regional .....	3
2.2.3. Geologia e Hidrogeologia Local .....	5
<b>2.3. Caracterização da Indústria Investigada.....</b>	<b>6</b>
2.3.1. Eletrólise e o Mercúrio .....	6
<b>2.4. Metais pesados .....</b>	<b>7</b>
2.4.1. Caracterização Geoquímica do Mercúrio (Hg).....	8
2.4.2. Histórico Ambiental do Mercúrio na Área.....	10
<b>2.5. Técnicas de Remediação .....</b>	<b>10</b>
2.5.1. Remediação e o Mercúrio .....	13
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>14</b>
3.1. Medição do Nível d'água dos Poços de Monitoramento .....	14
3.2. Execução de Ensaios de Permeabilidade.....	15
3.3. Coleta de Amostras de Água Subterrânea e Superficial .....	15
3.4. Controle de Qualidade das Análises Químicas .....	19
3.5. Padrões Ambientais de Referência .....	19
<b>4. RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>20</b>
4.1. Potenciometria .....	20
4.2. Ensaios de Permeabilidade e Fluxo da Água Subterrânea .....	21
4.3. Parâmetros Físico-Químicos <i>In Situ</i> .....	24
4.4. Resultados Analíticos de Água Subterrânea e Superficial.....	24
<b>5. INTERPRETAÇÕES E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS .....</b>	<b>26</b>
5.1. Hidrogeologia e Hidroquímica .....	26
5.2. Considerações .....	29
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>30</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>32</b>

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

**Figura 2.1.1.** – Vista Aérea e Caracterização da Área Investigada

**Figura 2.2.2.1.** – Mapa Geológico Regional

**Figura 2.4.1.1.** – Diagrama de Estabilidade das Principais Espécies de Mercúrio Inorgânico

**Figura 4.4.1.** – Avaliação da Mobilidade do Mercúrio

**Figura 5.1.1.** – Gráfico da Evolução das Concentrações de Mercúrio em cada Poço de Monitoramento

**Figura 5.1.2.** – Avaliação da Mobilidade e Ocorrência do Mercúrio através do Diagrama de Estabilidade das Principais Espécies de Mercúrio Inorgânico

## **ÍNDICE DE TABELAS**

**Tabela 2.5.1.** – Aptidão de Técnicas de Remediação para Metais Pesados

**Tabela 3.3.1.** - Critérios de Estabilização para Coleta de Amostras de Água Subterrânea

**Tabela 3.3.2.** – Identificação, Procedência e Parâmetros Analisados nas Amostras de Águas Subterrâneas e Superficiais.

**Tabela 4.2.1.** -- Coeficientes de Condutividade Hidráulica (k) Obtidos

**Tabela 4.2.2.** – Valores de Porosidade Efetiva ( $n_e$ ) de Materiais

**Tabela 4.2.3.** – Parâmetros Utilizados no Cálculo da Velocidade de Deslocamento das Águas Subterrâneas

## **APÊNDICES**

### **APÊNDICE A - DESENHOS**

**Desenho 01a** – Seção Hidrogeológica da Área Investigada (A – A')

**Desenho 01b** – Seção Hidrogeológica da Área Investigada (B – B')

**Desenho 02** – Planta da Área Industrial Investigada

**Desenho 03** – Mapa de Localização dos Pontos de Coleta de Amostras de Água  
Subterrânea e Superficial

**Desenho 04a** – Mapa Potenciométrico do Aquífero Raso - (Campanha – fev/12)

**Desenho 04b** – Mapa Potenciométrico do Aquífero Profundo - (Campanha – fev/12)

**Desenho 04c** – Mapa Potenciométrico do Aquífero Raso - (Campanha – ago/12)

**Desenho 04d** – Mapa Potenciométrico do Aquífero Profundo - (Campanha – ago/12)

**Desenho 05** – Mapa da Distribuição dos Principais Resultados Analíticos de Mercúrio

**Desenho 06** – Mapa das Plumas de Contaminação de Mercúrio

### **APÊNDICE B - PLANILHAS**

**Planilha 01** – Dados do Monitoramento do Nível D'Água e Cargas Hidráulicas

**Planilha 02** – Dados Obtidos em Campo pelos Ensaio de Permeabilidade

**Planilha 03** – Características Físico-Químicas das Amostras e Águas Subterrâneas e  
Superficiais

### **APÊNDICE C - ANEXOS**

**Anexo 01** – Gráficos dos Coeficientes de Condutividade Hidráulica (k)

**Anexo 02** – Resultados Analíticos

**Anexo 03** – Gráficos de Estabilidade Eh x pH do Mercúrio

## RESUMO

MÜLLER, M. **Caracterização de Área Industrial Impactada por Mercúrio e Discussão de Alternativas de Remediação**. 2012. 33 p. Monografia de Trabalho de Formatura – Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

Localizada no Estado de Pernambuco, a indústria investigada é caracterizada pela produção de soda cáustica líquida e em escama, cloro liquefeito, hipoclorito de sódio, ácido clorídrico e hidrogênio gasoso, utilizando como matérias-primas principais sal e barrilha. Em seus processos de produção, especificamente no prédio onde é realizada a eletrólise, há o uso de células de amálgama de mercúrio, e a ocorrência de frequentes vazamentos têm favorecido a percolação deste metal até o aquífero. O objetivo deste trabalho é caracterizar a contaminação de mercúrio e o atual cenário encontrado na área, para assim discutir e ajudar no direcionamento das possíveis técnicas de remediação aplicáveis na área. Para tanto, foram realizadas duas campanhas de monitoramento que contemplaram as medições dos níveis d'água e dos parâmetros físico-químicos *in situ* em todos os poços de monitoramento, a realização de cinquenta ensaios de permeabilidade, e a coleta de oitenta e nove amostras de água para análises químicas. Os resultados desses ensaios e análises foram tratados com *softwares* como o AquiferTest e o Excel. Para os ensaios de permeabilidade foram utilizadas as técnicas de *bail test* e *slug test*. Para a caracterização da geologia e hidrogeologia local, utilizou-se a compilação de dados prévios adicionados aos novos dados obtidos nas campanhas realizadas. Os resultados obtidos mostraram que o prédio da eletrólise é a fonte primária da contaminação de mercúrio, estando esse metal dissolvido no aquífero e em concentrações muito acima dos valores de referência ambientais. É evidente a necessidade de eliminar as fontes de contaminação de mercúrio, através de obras de adequação das instalações onde ocorrem o processo de produção e manuseios de produtos, visando a cessar vazamentos que venham a favorecer a percolação deste composto para o aquífero. Ao final dos trabalhos, concluiu-se que a possível técnica de remediação aplicável para o local envolverá processos químicos realizados *in situ*, podendo essas técnicas ainda serem implantadas associadas a outras, para conseguir alcançar os resultados esperados de forma mais eficaz.

Palavras-chave: mercúrio, remediação, eletrólise.

## **ABSTRACT**

**MULLER, M. Characterization of a Mercury Impacted Industrial Area and Discussion of Alternative Remediation.** 2012. 33 p. Graduation Work – Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

Located in the State of Pernambuco, the investigated industry is characterized by the production of liquid caustic soda and scale, chlorine gas, sodium hypochlorite, hydrochloric acid and hydrogen gas, using as main raw materials salt and soda. In their production processes, specifically in the building where the electrolysis is performed, there is the use of mercury amalgam cells, a place where the common leaks have favored the percolation of this metal to the aquifer. The objective of this graduation work is characterizing mercury contamination and the current scenario found in the area, in order to discuss and assist in guiding possible applicable techniques in the area. For this purpose, two monitoring campaigns were performed, covering measurements of water levels and in situ physico-chemical parameters in all monitoring wells, the of performing fifty permeability tests, and collection of eighty-nine water samples for chemical analysis. The results of these tests and analyses were treated with softwares such as AquiferTest and Excel. The permeability tests were based on bail and slug tests techniques. The compilation of previous data added to the new data obtained in campaigns was used to characterize the geology and hydrogeology site. The results proved that the electrolysis building is the primary source of mercury contamination, the metal being dissolved in the aquifer in concentrations far above the environmental benchmarks. It is clearly needed to eliminate sources of mercury contamination, repairing the facilities where the production process and handling of products occur in order to stop leaks that may favor the percolation of this compound to the aquifer. At the end of this study, it was concluded that the possible remediation technique applicable to the location involve chemical processes carried out in situ. These techniques may also be associated with others to achieve the desired results more efficiently.

Keywords: mercury, remediation, electrolysis.



# 1. INTRODUÇÃO

O uso de metais pesados tornou-se imprescindível em muitos ramos e aplicações industriais, gerando grave problema ambiental, uma vez que concentrações desses metais podem atingir os solos e a água subterrânea.

A área industrial objeto desse estudo encontra-se em município do Estado de Pernambuco. Essa indústria em seus processos de produção faz o uso da eletrólise com célula de amálgama de mercúrio e tal técnica comumente favorece vazamentos permitindo a percolação deste metal até o aquífero subterrâneo. A remoção desse mercúrio através de técnicas de remediação é necessária, uma vez que esse composto apresenta risco à saúde humana, devido a elevado nível de toxicidade que ele apresenta.

Desse modo, dentre as diversas técnicas de remediação existentes, selecionar a mais apropriada para cada caso é de fundamental importância, já que essa decisão dará rumo a atividades subseqüentes que irão envolver gasto de tempo e dinheiro. Para isso, um bom detalhamento geológico e hidrogeológico da área, através da execução de todas as etapas propostas no gerenciamento de áreas contaminadas, irá subsidiar a escolha da técnica de remediação mais eficiente.

## 1.1. Objetivos e Justificativas

Este trabalho possui dois objetivos principais:

- Apresentar a caracterização da contaminação de uma área industrial impactada por mercúrio e o cenário atual encontrado nesse local;
- Discutir alternativas de remediação adequadas ao tipo de contaminação presente na área.

Para cumprir esses objetivos, o presente trabalho de formatura foi realizado simultaneamente a um projeto de monitoramento ambiental executado pela empresa GEOKLOCK Consultoria e Engenharia Ambiental, que tornou possível a realização deste trabalho de formatura sob a co-orientação da geóloga Andreia Yoshinari. Esse monitoramento auxiliou na aquisição de dados que serviram para a caracterização da contaminação, e assim tornar possível uma avaliação crítica da área e ao direcionamento para propostas de sistemas de remediações adequados, através dos tratamentos e comparação dos dados obtidos.

Nesse âmbito, os resultados encontrados pelo trabalho possuem notável interesse tanto para a empresa contratada quanto para a contratante, sendo uma do ponto de vista sócio-econômico e outra em relação ao quadro ambiental de sua área, justificando sua realização.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Localização e Caracterização do Local

A área industrial pesquisada dista aproximadamente 30 km de Recife. A localização exata do local será omitida visando preservar as relações comerciais existentes, bem como questões éticas e acordos de confidencialidade estabelecidos.

A área em estudo está inserida em uma região agroindustrial principalmente tomada pelo cultivo de cana de açúcar, sendo que a leste encontra-se um açude envolto por vegetação (mata atlântica) e a norte há um lixão desativado, um rio, e a rodovia que liga a capital ao interior do Estado. A **Figura 2.1.1.** exibe uma visão aérea do local.



**Figura 2.1.1.** – Vista Aérea e Caracterização da Área Investigada

### 2.2. Aspectos Regionais do Meio Físico

#### 2.2.1. Relevo e Hidrografia

O relevo da região possui altitudes em torno de 50 a 100 metros, compreendido por platôs de origem sedimentar que apresentam grau de entalhamento variável, ora com vales estreitos e encostas abruptas, ora abertos com encostas suaves e fundos com amplas várzeas. De modo geral, os solos são profundos e de baixa fertilidade (CPRM, 2005).

Toda água superficial do município, que são escoadas por quinze rios e pouco mais de cinco riachos, possuem regime de escoamento perene e padrão de drenagem dentrítico

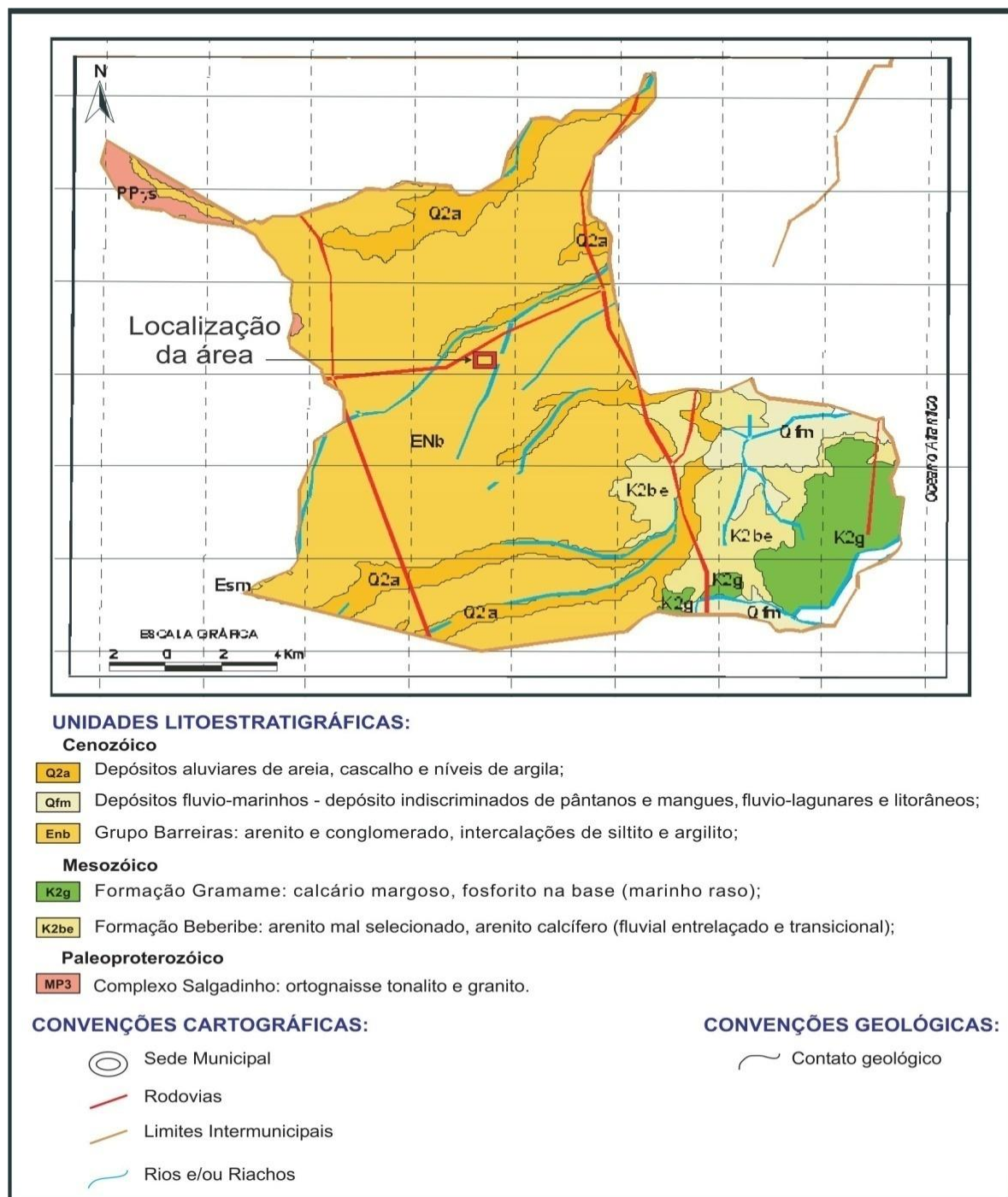
(CPRM, 2005). Há também vários açudes distribuídos no município, dentre eles o mais importante possui volume de aproximadamente 29.000.000 m<sup>3</sup>. O local em estudo apresenta o escoamento superficial em direção ao açude e a maior parte para o rio, localizado a pouco menos de 100 metros a norte da área.

### **2.2.2. Geologia Regional**

Através dos dados levantados pela CPRM (2005), no que diz respeito à geologia da região, no município em questão encontram-se quatro unidades geológicas distintas, listadas a seguir das mais antigas para as mais recentes:

- Província da Borborema: de idade pré-cambriana, é constituída por rochas do embasamento cristalino pertencentes ao Complexo Salgadinho, composto por ortognaisses tonalítico a granítico;
- Bacia Pernambuco-Paraíba: de idade cretácea, é dividida em duas Formações distintas. A formação mais basal, nomeada Formação Beberibe, é subdividida em uma porção inferior e outra superior, sendo estas compostas por arenitos com intercalações de siltes e argilas, e por arenito calcífero, respectivamente. Já a formação superior, nomeada Formação Gramame é composta por calcários, margas e argilas;
- Grupo Barreiras: de idade terciária (Mioceno e Plioceno), é composto por arenitos e conglomerados intercalados com siltes e argilas;
- Sedimentos Quaternários: formados por areias finas, médias e grossas e argilas.

A área em estudo está totalmente assentada sobre o Grupo Barreiras, conforme pode ser observado no mapa geológico regional apresentado na **Figura 2.2.2.1**.



**Figura 2.2.2.1.** – Mapa Geológico Regional da Área Investigada. Fonte: (Modificado de CPRM, 2005).

#### 2.2.2.1. Grupo Barreiras

O Grupo Barreiras constitui a unidade geológica de ocorrência mais expressiva da costa brasileira, aflorando desde o Estado do Rio de Janeiro até o Amapá.

Os depósitos desse grupo vêm sendo estudados por diversos pesquisadores nas últimas décadas, alguns dos quais, mais recentemente, chamaram atenção para a necessidade de caracterização das suas fácies, visando uma melhor interpretação dos sistemas deposicionais envolvidos e sua correlação regional (Araújo *et al.*, 2006).

Segundo Araújo *et al.* (2006), ainda não há um consenso quanto ao sistema deposicional formador do Grupo Barreiras. Há autores que descrevem como sendo um sistema deposicional de leques aluviais com influência marinha, outros consideram como sendo um sistema tipo fluvial meandrante, e ainda, outros que consideram um sistema deposicional do tipo fluvial entrelaçado associado à leques aluviais.

Entre os Estados de Pernambuco e Rio Grande do Norte, encontram-se predominantemente sedimentos areno-argilosos com níveis conglomeráticos, sendo porções predominantemente arenosas na base e argilosas no topo (CPRM, 2005).

### **2.2.3. Geologia e Hidrogeologia Local**

Os estudos realizados no local permitiram a identificação de duas unidades litológicas principais: solos de alteração residual (SAR) e intercalações entre solos arenosos e argilosos provenientes de rochas sedimentares do Grupo Barreiras, e sedimentos arenosos e argilosos aluvionares. As características de cada unidade são descritas a seguir.

#### **2.2.3.1. Grupo Barreiras**

É representado em sua porção mais superficial por solos areno-argilosos de alteração residual com bastante matéria orgânica e por vezes contendo concreções ferruginosas. Apresentando uma coloração marrom escura, e cinza quando há presença de concreções, sua espessura não ultrapassa 0,5 metros.

Em torno dos próximos 15 metros, ocorrem intercalações entre solos arenosos e argilosos. Os solos arenosos comumente apresentam porções argilosas assim como os solos argilosos possuem porções arenosas. A coloração é bastante variegada mostrando em geral tons em vermelho e marrom, e por vezes porções amareladas, esbranquiçadas e rosa. Em meio a esses solos ocorre um nível conglomerático composto por seixos e cascalhos em matriz areno-argilosa.

Na porção mais basal ocorre uma argila compacta de coloração avermelhada com espessura que pode variar de 10 a 20 metros, sobreposta a um arenito de granulometria fina a média com coloração variegada, que se estende a profundidades superiores a 40 metros.

#### **2.2.3.2. Aluvião**

Os depósitos aluvionares foram encontrados às margens do rio, formando uma várzea que se estende até aproximadamente 100 metros de seu leito. O sedimento nesse local é caracterizado por uma areia de granulometria fina a grossa com coloração amarela esbranquiçada e com espessura não maior que 10 metros, apresentando lentes de argila de cor preta, ricas em matéria orgânica.

Os estudos hidrogeológicos realizados na área mostraram a existência de dois aquíferos, um mais superficial (freático) e outro mais profundo (confinado), que estão separados por uma camada de argila confinante. Tal argila possui uma espessura que pode variar de 10 a 20 metros dependendo do local, estando situada abaixo dos poços de monitoramento rasos e acima da seção filtrante dos poços profundos. Os **Desenhos 01a e 01b (Apêndice A)** apresentam duas seções hidrogeológicas representativas da área.

### **2.3. Caracterização da Indústria Investigada**

A indústria em estudo é caracterizada pela produção de soda cáustica (NaOH) líquida e em escama, cloro liquefeito, hipoclorito de sódio, ácido clorídrico e hidrogênio gasoso, utilizando como matérias-primas principais o sal (NaCl) e barrilha (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). A principal área de produção é o prédio onde ocorrem as reações de eletrólise, que é o local que proporciona os maiores riscos ambientais devido às reações envolvidas no processo. Os efluentes líquidos gerados nesse processo de produção dos produtos são encaminhados através de canaletas a céu aberto para a estação de tratamento de efluentes (ETE), e depois de tratados são encaminhados novamente por canaletas até o rio localizado a norte da área.

Os resíduos sólidos juntamente com os resíduos do tratamento de efluentes são armazenados em tambores, e enviados a aterro industrial Classe I. Ambos os resíduos apresentam, respectivamente, concentrações de até 200 mg/kg e 8.000 mg/kg de mercúrio, metal utilizado durante a fase de eletrólise da produção.

Apesar de o mercúrio ser parte dos resíduos gerados pela indústria em seu processo de produção, no local onde é realizada a eletrólise é comum a ocorrência de vazamentos que favorecem a percolação desse metal no solo, e quando isso ocorre utiliza-se areia para conter esse processo. Posteriormente esta areia impregnada é encaminhada para queima no forno destilador de mercúrio, sendo o resíduo final com teores acima de 2.000 mg/Kg deste metal, também encaminhado para o aterro industrial Classe I.

Além de vazamentos recorrentes na área da eletrólise durante o processo industrial, tanto de mercúrio como dos próprios produtos produzidos, detectou-se haver no passado o rompimento de um tanque de armazenamento de cloro o qual contribuiu para uma intensa percolação deste composto no solo, atingindo também o aquífero.

#### **2.3.1. Eletrólise e o Mercúrio**

O primeiro método utilizado para produzir cloro em escala industrial foi o da eletrólise com célula de amálgama de mercúrio, obtendo-se como subproduto a soda cáustica. Neste processo ocorrem perdas significativas de mercúrio, que embora recentemente tenha sofrido

melhorias, tal processo gera 1,3 gramas de mercúrio para cada tonelada de cloro produzida. Devido aos problemas ambientais este processo vem sendo substituído pela eletrólise de célula de membrana, que até o momento é responsável por menos de 20% da produção mundial de cloro (Evonik, 2012).

No processo de eletrólise são empregados um cátodo de mercúrio e um ânodo de titânio recoberto por platina ou óxido de platina. O cátodo está no fundo da célula de eletrólise e o ânodo sobre este, a pouca distância. A célula é preenchida com cloreto de sódio (NaCl) e, com uma diferença de potencial adequada, se processa a eletrólise:



A seguir procede-se com a decomposição da amálgama (NaHg) formada para recuperar o mercúrio utilizado no processo. A base sobre a qual está essa amálgama é ligeiramente inclinada para esse composto escorrer, que ao passar por uma torre em presença de água provoca as seguintes reações de oxidação e redução:



Desta forma o mercúrio é recuperado, e como subproduto forma-se a soda cáustica (NaOH) pela combinação da hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) e do  $\text{Na}^+$  resultantes das equações.



Deste modo se consegue a soda cáustica muito concentrada (**Reação 2.3.1e**) e um cloro muito puro (**Reação 2.3.1a**).

## 2.4. Metais pesados

Os metais pesados, assim como a maior parte dos elementos químicos, possuem papel único sobre a saúde humana. Enquanto alguns são considerados essenciais, dentro de certos níveis de ingestão, outros são considerados tóxicos, em maior ou menor grau, dependendo do elemento e do nível em termos de concentração ingerido. Assim, enquanto zinco e cálcio são considerados essenciais, o chumbo, o cádmio e o mercúrio são tóxicos. Já o cromo (VI) e o arsênio são cancerígenos. São elementos químicos que frequentemente estão associados à toxicidade e a contaminação de organismos e ambiente. Quando em solução, os metais pesados podem sofrer diferentes processos de sorção/reacção em

partículas sólidas do solo que incluem adsorção, quimiosorção, adsorção e troca iônica, além da formação de complexos com matéria orgânica.

O uso de metais pesados tornou-se imprescindível em muitos ramos e aplicações industriais, podendo ser geradores de comprometimento ambiental uma vez que a concentração de metais em efluentes líquidos e gasosos são frequentemente elevados. Assim essas concentrações encontram-se sujeitas a valores-limite rígidos devido à sua elevada toxicidade. Para cumprir essas diretivas, os metais pesados são, por norma, precipitados e separados sob a forma de hidróxidos pouco solúveis, mediante a neutralização da água residuária com uma solução de soda cáustica ou cal. Porém, este método apresenta falhas com frequência devido à presença de agentes seqüestrantes que dificultam ou impossibilitam totalmente a precipitação de hidróxidos (Evonik, 2012).

#### **2.4.1. Caracterização Geoquímica do Mercúrio (Hg)**

O mercúrio ocorre naturalmente no meio ambiente e pode ser encontrado na forma metálica, inorgânica e orgânica. Suas formas mais comuns são o mercúrio metálico, sulfeto de mercúrio, cloreto de mercúrio e o metilmercúrio. Trata-se do único metal a se apresentar no estado líquido a temperatura ambiente, possui elevada tensão superficial e densidade, alta condutividade térmica e elétrica, além de ser muito solúvel em água e facilmente vaporizar-se no ar, propriedades que o tornam muito móvel no ambiente (EPA, 2012).

O  $\text{Hg}_2^{2+}$  e  $\text{Hg}^{2+}$  sob condições oxidantes são as formas mais estáveis do mercúrio metálico. Diante de condições moderadamente redutoras, essas espécies podem reduzir-se a  $\text{Hg}^0$  (mercúrio elementar) que, por sua vez converte-se rapidamente para metil ou etil-mercúrio, através de processos bióticos e abióticos, que são formas muito tóxicas. O  $\text{Hg}^{2+}$  também pode formar complexos com  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{S}^{2-}$  e  $\text{PO}_4^{3-}$  (Campos, 2001).

Os estados de valência mais comuns são o  $\text{Hg}^{+1}$  e o  $\text{Hg}^{+2}$ , e nessas condições podem formar uma grande variedade de sais inorgânicos, tais como o cloreto de mercúrio ( $\text{HgCl}_2$ ), o cloreto mercurioso ( $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ), o nitrato de mercúrio ( $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ ), o sulfeto de mercúrio (mineral cinábrio –  $\text{HgS}$ ), e o sulfato de mercúrio ( $\text{HgSO}_4$ ). A solubilidade desses compostos pode variar desde pouco solúvel ( $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  e  $\text{HgS}$ ) a muito solúvel ( $\text{HgCl}_2$  e  $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ ). Em 2007, foi sintetizado em condições criogênicas o mercúrio tetrafluoreto ( $\text{HgF}_4$ ), confirmando que o mercúrio também pode existir no estado  $\text{Hg}^{4+}$ .

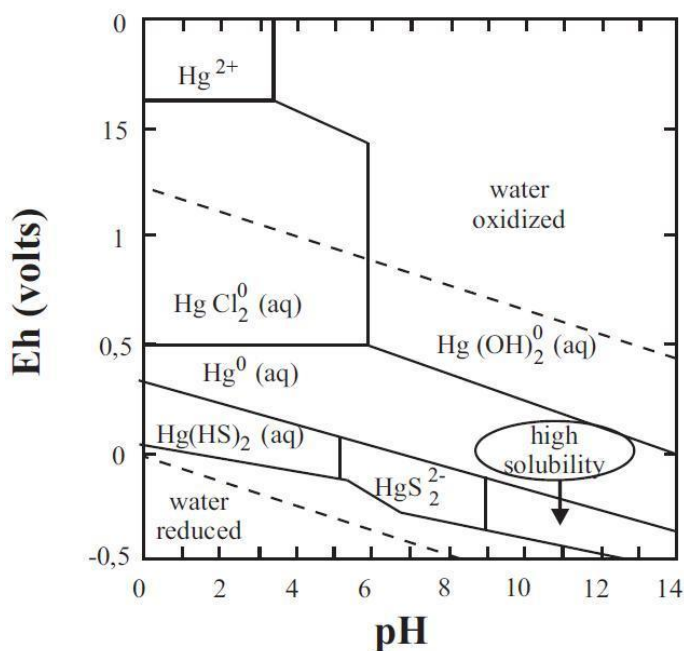
No solo, a acumulação de mercúrio é controlada principalmente pela formação de complexos orgânicos. Assim, a mobilidade do mercúrio requer processos de dissolução e degradação biológica. Na camada superficial do solo, o mercúrio também pode ser



volatilizado para o ar, reação mediada por bactérias existentes. Além de ser adsorvido facilmente por argilominerais em pH ácido (EPA, 2012).

Em meio aquático o mercúrio pode ocorrer na forma orgânica e inorgânica. Estando na forma inorgânica ele encontra-se sob três estados de oxidação: o mercúrio elementar ( $\text{Hg}^0$ ), principalmente na forma de gás; o mercúrio (I) ( $\text{Hg}_2^{2+}$ ), pouco estável em meio natural e o íon mercúrio (II) ( $\text{Hg}^{2+}$ ). Já na forma orgânica ocorre como metilmercúrio, dimetilmercúrio e fenilmercúrio, sendo o primeiro predominante em pH ácido, enquanto em condições alcalinas o principal composto é o dimetilmercúrio (Alloway, 1995).

A **Figura 2.4.1.1.** a seguir apresenta um diagrama de estabilidade teórica para as principais espécies de mercúrio inorgânico, através do potencial de redução (Eh) e do pH.



**Figura 2.4.1.1.** – Diagrama de Estabilidade das Principais Espécies de Mercúrio Inorgânico.  
Fonte: (Veiga 1994, adaptado).

No entanto, esse diagrama deve ser usado com certa restrição já que diz respeito a um modelo teórico em equilíbrio e, em condições naturais, é comum esse equilíbrio não existir. De modo geral, a análise termodinâmica do diagrama sugere que o mercúrio metálico em um ambiente aquático que apresenta um potencial de redução (Eh) abaixo de 0,4 volts deve ser estável, porém, a presença de orgânicos solúveis nos sedimentos muda essa conclusão. Por exemplo, quando há o composto orgânico metilmercúrio, que é

termodinamicamente menos estável que os complexos inorgânicos, o equilíbrio em um meio onde haja inorgânicos e orgânicos não é possível (Veiga, 1994).

#### **2.4.2. Histórico Ambiental do Mercúrio na Área**

Concentrações de mercúrio superiores aos padrões ambientais de referência foram detectadas durante investigações no local. No solo essa ocorrência apresentou-se de forma pontual, enquanto na água subterrânea mostrou-se disseminada por grande área do local. Já nas águas superficiais nunca foi encontrado qualquer vestígio do mesmo.

Através de modelamento matemático de fluxo e transporte de água subterrânea foi simulado um comportamento futuro para essa contaminação de mercúrio. Para um cenário futuro sem ações, previu-se uma pluma de mercúrio relativamente estável e com previsão desta atingir o rio em 40 anos. Já para um cenário com remoção das fontes primárias o modelo mostrou a redução das concentrações no centro de massa, porém o efeito demora a se manifestar.

A avaliação de risco indicou a existência de um potencial risco tóxico para os trabalhadores do local, recomendando-se a suspensão do uso da água subterrânea para consumo humano. Emergencialmente foi realizada a remoção de todo o solo contaminado por mercúrio (resíduos Classe I). Agregado a isso foi dado início ao monitoramento hidroquímico semestral da água subterrânea e superficial com o intuito de avaliar a evolução do quadro ambiental antes, durante e após a implantação de medidas de remediação. Além disso, a indústria passou por reformas e atualmente o local onde era realizado o processo de eletrólise é nomeado como “antiga eletrólise”, e esse passou a ser feito no novo prédio da eletrólise.

Caracterizou-se como fonte primária de mercúrio a área pertencente ao atual prédio da eletrólise, entretanto, a área da “antiga eletrólise” ainda apresenta vestígios, devido a vazamentos pretéritos. O **Desenho 02 (Apêndice A)** apresenta a localização dessas áreas juntamente com as demais instalações julgadas importantes para o desenvolvimento do trabalho.

#### **2.5. Técnicas de Remediação**

Remediação são técnicas aplicadas geralmente quando um devido local exibe risco à saúde humana acima dos valores aceitáveis, necessidade de proteção de receptores ecológicos, ou mesmo quando ocorrem situações de perigo. Essas técnicas são classificadas de acordo com seu objetivo, podendo ser para tratamento (descontaminação) ou para contenção (isolamento), existindo ainda técnicas que podem alcançar ambos objetivos juntos (CETESB, 2007).

Quando usadas, as técnicas de remediação por tratamento deverão ser prioritárias, cuja aplicação tenha como objetivo principal atingir as metas de remediação definidas para o caso, por meio da redução da massa dos contaminantes nos meios afetados, viabilizando o uso atual e futuro da área no espaço de tempo mais curto possível.

Para recuperar uma área com presença de contaminação existem basicamente duas formas de atacar o problema, retirando a água contaminada do local natural para ser tratada ou executar procedimentos diretamente no local contaminado, como por exemplo, a injeção de substâncias no subsolo que causem algum tipo de reação nos contaminantes presentes. Essas abordagens são denominadas respectivamente, *ex situ* e *in situ*.

#### Remediação Ex situ

Geralmente é realizado o bombeamento da água subterrânea e o envio desta para uma estação de tratamento, onde o contaminante é extraído através de algum procedimento e a água tratada ou é descartada, ou pode ser injetada novamente no aquífero. Este sistema é denominado *pump-and-treat*, sendo o mais comum, e provavelmente o mais utilizado.

Entretanto, para se obterem bons resultados com este tipo de sistema, as características do aquífero devem ser favoráveis, ou seja, o material que forma o aquífero deve ser permeável o suficiente para permitir a ação de bombeamento. Um aquífero formado por sedimentos finos, da fração argila ou silte, geralmente não apresentam permeabilidade suficiente para um bombeamento satisfatório, ficando o contaminante adsorvido no material do aquífero. Já um aquífero formado por material arenoso permite o deslocamento da água subterrânea com maior facilidade através dos poros, e através de um sistema de bombeamento bem dimensionado pode ser retirado grande volume de água contaminada.

Porém, os aquíferos nem sempre apresentam características favoráveis ao sistema *pump-and-treat*, e o que muitas vezes ocorre em ações de bombeamento é que inicialmente a concentração do contaminante tem uma grande redução, e posteriormente chega a um ponto que dificilmente reduz, sendo que estas concentrações residuais podem permanecer por muito tempo. Este fenômeno é resultado de vários processos físicos e químicos que podem ocorrer no aquífero, podendo fazer com que os contaminantes fiquem adsorvidos nas porções menos permeáveis do solo, de modo que a ação de bombeamento não consiga uma remoção satisfatória do contaminante.

Além disso, longos períodos de bombeamento geram grandes volumes de água a serem tratadas, o que exige uma estação de tratamento com capacidade suficiente para tal, elevando os custos operacionais ao longo do processo, ou seja, acaba por ser um sistema caro, e por vezes ineficiente.

### Remediação In situ

Define-se em poucas palavras como sendo um procedimento efetuado diretamente no local contaminado, geralmente sem remover o solo ou a água subterrânea contaminada. O procedimento mais usual para tratamento de contaminação, como por exemplo, para metais, é a injeção de substâncias e compostos químicos reativos no aquífero que sejam capazes de interagir com os contaminantes, alterando suas características para formas que facilitem sua remoção.

Existe ainda a alternativa de ser implantada uma barreira física de tratamento no local, para que a pluma passe através da barreira, ocorrendo reações químicas que levem à precipitação do contaminante. Essas barreiras de tratamento são chamadas de PBRs (barreiras reativas permeáveis).

Outras alternativas existentes são as técnicas da eletrocinética e da fitorremediação. A primeira é a aplicação de corrente elétrica na água, fazendo com que através das diferenças de cargas elétricas induzidas ocorra a migração dos metais em subsuperfície, ficando mais fácil a remoção destes. A segunda é dada através do uso de plantas que possuem a capacidade de acumular os contaminantes (MULLIGAN, 2001).

As técnicas de remediações existentes nem sempre são apropriadas e igualmente aplicáveis para todos os tipos de compostos, por exemplo, certas técnicas que são apropriadas para compostos orgânicos são inapropriadas para metais pesados. A **Tabela 2.5.1.** exibe quais dentre as técnicas mais comuns são mais aplicáveis para metais pesados.

<b>METAIS PESADOS</b>	
<b>Técnicas de Remediação</b>	<b>Aptidão</b>
Processos Térmicos	Geralmente não apropriado
Processos Químicos	Apropriado
Processos Biológicos	Apropriado com restrições
Lixiviação	Apropriado
Processos Pneumáticos	Geralmente não apropriado

**Tabela 2.5.1.** – Aptidão de Técnicas de Remediação para Metais Pesados.

Fonte: (Adaptado de CETESB, 2007)

Especificamente para os metais pesados, também existe a técnica de rizofiltração, que é baseada na adsorção por biomassa de plantas (MULLIGAN, 2001).

De modo geral, para que um projeto de remediação de uma área contaminada obtenha sucesso, devem ser analisadas todas as opções de técnicas disponíveis e uma possível integração entre elas, já que todas apresentam suas vantagens e desvantagens.

### **2.5.1. Remediação e o Mercúrio**

As técnicas mais comumente usadas para tratamento de resíduos com mercúrio são a incineração e a *roasting*, que são processos termais. O termo *roasting* designa a técnica que separa o mercúrio através do aquecimento do resíduo, para posteriormente condensando-o conseguir a recuperação ou remoção do mercúrio. Devido ao controle de emissões de mercúrio ser muito difícil através da incineração, novas tecnologias estão sendo procuradas para a reciclagem do mercúrio nos resíduos, para separar este dos materiais orgânicos antes da incineração ou mesmo para produzir um resíduo estável para eliminação, reduzindo os riscos atribuídos aos constituintes orgânicos e ao mercúrio. O tratamento apropriado depende do tipo de resíduo a ser tratado, e pode requerer o uso de uma série de processos (EPA, 2012).

Dependendo da espécie de mercúrio envolvida, de sua concentração, e da matriz de resíduos ou meios envolvidos, o mercúrio não pode ser destruído, tendo que contar com vários métodos de recuperação ou captura. Selecionar a forma de tratamento mais apropriada depende do grau de destruição orgânica necessária antes de promover o tratamento do mercúrio, do grau de controle da especiação de mercúrio exigido pela forma dos resíduos, e outros procedimentos operacionais que garantam a extração do mercúrio (EPA, 2012).

O tratamento de resíduos de mercúrio, sem o uso de processos térmicos, geralmente envolve tanto a precipitação quanto de imobilização. As técnicas mais comuns usadas são as reações químicas por oxidação, lixiviação e precipitação, havendo também as reações de solidificação/estabilização e amalgamação, e menos comumente a eletrocinética e a fitorremediação, ainda muito estudadas. Além dessas, tem-se desenvolvido através de processo termal a técnica para imobilização e captura do mercúrio na forma de vapor (EPA, 2012).

O tratamento por oxidação química é aplicado quando o mercúrio encontra-se na forma elementar ou orgânica, agindo na destruição dos materiais orgânicos e convertendo-o para uma forma solúvel, que pode ser separado da matriz de resíduos e posteriormente ser tratado. Já a lixiviação química é um processo aquoso que depende da capacidade de uma solução de lixiviação para solubilizar o mercúrio e removê-lo a partir da matriz de resíduos. Idealmente, o mercúrio solubilizado apresenta divisões para a fase líquida, podendo ser separado por filtração para um tratamento adicional, por exemplo, precipitação, troca iônica e adsorção em carvão ativado. A lixiviação pode remover formas inorgânicas de mercúrio a

partir de matrizes de resíduos inorgânicos, mas é menos eficaz para a remoção de mercúrio elementar não reativo, a não ser que a fórmula de lixiviação seja capaz de ionizar o mercúrio para uma forma extraível. Lixiviação ácida é mais comumente usada para remover mercúrio de meio inorgânico.

O tratamento por precipitação química só se aplica quando o mercúrio apresenta-se totalmente em estado iônico, ou seja, quando todo o conteúdo orgânico já tenha sido removido. A precipitação ocorre através de reagentes que são injetados no subsolo e que ao entrarem em contato com o mercúrio provocam trocas iônicas, sendo mais eficientes quando em meio aquoso para tratamento de sais de mercúrio, tais como cloretos de mercúrio.

O processo de tratamento por solidificação/estabilização atua no âmbito de imobilizar o mercúrio em uma matriz, reduzindo sua permeabilidade e sua área de influência. Enquanto a amalgamação envolve a mistura de mercúrio elementar com um metal em pó, geralmente o zinco, formando um não-líquido, uma matriz semi-sólida de mercúrio elementar e o metal.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

A metodologia utilizada para a caracterização da contaminação de mercúrio na área industrial e identificação do cenário atual possui como base dados de três momentos distintos, sendo um referente à compilação de dados de uma campanha de amostragem realizada em 2010, que diz respeito às primeiras delimitações das plumas de contaminação do local, servindo como *base line*, enquanto os outros dois momentos referem-se aos dados obtidos em campo nas duas últimas campanhas de monitoramento, realizadas em fevereiro e agosto de 2012, através das atividades que são listadas e descritas a seguir.

O tratamento dos dados obtidos em campo deu-se através de mapas, seções e gráficos. Foram utilizados os softwares *Aquifer Test Pro*, desenvolvido pela empresa WATERLOO HIDROGEOLOGIC Inc., para o auxílio do cálculo do fluxo da água subterrânea, e o EXCEL (Microsoft Office) que permitiu o tratamento estatístico dos resultados analíticos para a realização das interpretações necessárias, para a partir da caracterização da contaminação de mercúrio e do cenário atual, e do levantamento bibliográfico, tornar possível o discussão de medidas de remediação mais indicadas para o presente caso avaliado.

#### **3.1. Medição do Nível d'água dos Poços de Monitoramento**

Em ambas as campanhas de amostragem foram realizadas a medição dos níveis d'água estabilizados de todos os poços de monitoramento através do medidor elétrico INTERFACE METER, fabricado pela SOLINST – Modelo 122. A aquisição desses dados foi necessária para o cálculo das cargas hidráulicas, que permitiram a elaboração dos mapas

potenciométricos para os aquíferos do local. A **Planilha 01 (Apêndice B)** apresenta as cotas altimétricas e as coordenadas de todos os poços de monitoramento, juntamente com as cargas hidráulicas calculadas referentes aos níveis d'água medidos em ambas as campanhas.

### **3.2. Execução de Ensaios de Permeabilidade**

Foram realizados durante a campanha de fevereiro de 2012 ensaios de permeabilidade (teste de *Slug*) com o objetivo de obter as características físicas dos aquíferos, possibilitando o cálculo da velocidade do fluxo da água subterrânea no local. Esses ensaios foram efetuados em 25 poços através dos métodos *Bail Test* e *Slug Test*, totalizando 50 ensaios, de acordo com a metodologia do “*Bail Test*” (FREEZE & CHERRY, 1979).

O *Bail Test* é realizado através do acompanhamento e medição da recuperação do nível da água até sua estabilização (estático original ou pelo menos 70% dessa recuperação), após este ter sofrido um rápido rebaixamento por meio de bombeamento. Já o *Slug Test* é realizado através do acompanhamento e medição da velocidade de rebaixamento do nível estático da água subterrânea no interior do poço, após este ter sofrido uma abrupta elevação por meio da inserção de um sólido cilíndrico de volume conhecido em seu interior.

As medidas foram efetuadas em intervalos de aproximadamente 50 segundos com o uso de medidor elétrico com precisão de 0,5 cm (segundo o procedimento interno SQ-004 – Procedimento para a Execução de Ensaios Hidrológicos em Poços – GEOKLOCK).

Os dados obtidos em campo pelo ensaio de permeabilidade, mostrando o nível d'água estático e a variação deste em função do tempo, tanto para o *slug test* quanto para o *bail test*, são apresentados na **Planilha 02 (Apêndice B)**.

### **3.3. Coleta de Amostras de Água Subterrânea e Superficial**

Foi realizada a amostragem de água subterrânea e superficial para o monitoramento das concentrações dos compostos presentes no local, principalmente o mercúrio, verificando sua distribuição no aquífero e se este chegou a atingir o rio. Foram coletadas 47 amostras na primeira campanha e 42 na segunda. Ambas as campanhas foram realizadas no ano de 2012, a primeira deu-se em fevereiro e a segunda em agosto, totalizando 89 amostras de água.

Dessas 47 amostras referentes à primeira campanha, 29 pertencem aos poços de monitoramentos rasos, 09 aos poços de monitoramentos profundos, 04 amostras para

controle de qualidade, e 05 amostras de água superficial. Enquanto que na segunda campanha a coleta de menos amostras deve-se ao fato de cinco poços rasos estarem secos no dia da amostragem. As amostras foram coletadas em pontos fixos em ambas as campanhas. A localização em planta desses pontos de coleta é apresentada no **Desenho 03 (Apêndice A)**.

A metodologia empregada na coleta e preservação das amostras de água superficial atendeu aos requisitos contidos no Guia de Coleta e Preservação de Amostras de Água (1987), e no Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (2001), ambos elaborados pela CETESB. Entre as coletas, os materiais não descartáveis foram lavados com detergente neutro tipo EXTRAN, solução de acetona (5%) e água deionizada.

A amostragem de água subterrânea foi realizada utilizando o método de micro purga, seguindo os procedimentos “*Low Flow Ground-Water Sampling Procedures*” (EPA, 1996) e “*Standard Practice for Low-Flow Purging and Sampling for Wells and Devices Used for Groundwater Investigations*” – D6771-02 (ASTM, 2002). Tal técnica atende também ao recomendado no “Guia de Coleta e Preservação de Amostras de Água” (CETESB, 1987), a Norma 06.010 – Anexo A – “Orientação para coleta de Amostras” (CETESB, 1988) e o “Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas” (CETESB, 2001), elaborados pela CETESB.

Esta técnica refere-se à velocidade com que a água entra na captação da bomba. São utilizadas vazões controladas na ordem de 0,1 a 1,0 L/min, visando à otimização do fluxo e o mínimo rebaixamento do nível d’água. Neste método a água subterrânea é bombeada em baixa vazão diretamente da seção filtrante do poço, fornecendo assim, amostras de água com baixa turbidez, representativas do aquífero local.

Durante a micropurga foram medidos os parâmetros *in situ*, como nível dinâmico da água, turbidez, pH, condutividade elétrica, potencial de oxi-redução (ORP), temperatura e oxigênio dissolvido (OD), que são constantemente monitorados até sua estabilização, para posterior coleta das amostras. Esses parâmetros também foram medidos para as águas superficiais coletadas. A **Tabela 3.3.1.** a seguir apresenta os critérios de estabilização definidos pela NBR 15.847 (ABNT, 2010).



Parâmetro	Variação permitida
Temperatura	± 0,5 °C
pH	± 0,2 unidades
Condutividade elétrica	5%
Potencial oxi-redução (Eh)	20 mV
Oxigênio dissolvido (OD)	10%

**Tabela 3.3.1.** – Critérios de Estabilização para Coleta de Amostras de Água Subterrânea.

Fonte: NBR 15.847 (ABNT 2010).

A metodologia empregada na coleta e preservação de amostras de água subterrânea atenderá aos requisitos contidos na Norma ABNT NBR 15.847 – Amostragem de Água Subterrânea em Poços de Monitoramento – Métodos de Purga.

A preservação de amostras tem como objetivo retardar a ação bacteriológica, retardar a hidrólise e reduzir os efeitos de absorção ou adsorção. As amostras de água subterrânea, para análises de metais dissolvidos, foram filtradas no momento da coleta através filtros descartáveis (0,45 µm) e preservadas em meio ácido (pH=2). Esse procedimento evita problemas de lixiviação dos metais presentes na forma de colóides ou frações finas do solo para a água, quando as amostras são preservadas com ácido nítrico.

As amostras foram acondicionadas adequadamente em caixas termoplásticas (*cooler*), mantendo a refrigeração com gelo a uma temperatura próxima a 4,0 °C, estando acondicionados em sacos plásticos. Posteriormente, foram encaminhadas ao laboratório BACHEMA, certificado pelo INMETRO na NBR ISO/IEC 17025, para a análise de compostos orgânicos voláteis (VOC), varredura de ânions inorgânicos e metais (Lista CETESB).

As corridas para compostos orgânicos foram realizadas por varredura através dos métodos USEPA SW 5021A / 8260C e USEPA SW 3510C mod/8270D e os metais USEPA 6010C.

A **Tabela 3.3.2.** apresenta a relação das amostras de água superficial e subterrânea coletadas e os parâmetros analisados para ambas as campanhas.

**TABELA 3.3.2. – Identificação, Procedência e Parâmetros Analisados nas Amostras de Águas Subterrâneas e Superficiais**

Identificação (Ponto)	Procedência	Parâmetros Analisados
RG-001	Rio (montante)	VOC *1 Metais *2 Varredura de Ânions Inorgânicos*3
RG-002	Rio (intermediário)	
RG-003	Rio (jusante)	
RG-004	Açude	
RG-005	Açude	
PM-001	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-002	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-003	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-004	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-005	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-006	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-007	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-008	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-009	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-010	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
Réplica do PM-010		Metais *2, Inorgânicos*3
PM-011	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-012	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-013	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-014	Poço de Monitoramento	VOC *1, Metais *2, Inorgânicos*3
Réplica do PM-014		VOC *1, Metais *2, Inorgânicos*3
PM-015	Poço de Monitoramento	VOC *1, Metais *2, Inorgânicos*3
PM-016	Poço de Monitoramento	VOC *1, Metais *2, Inorgânicos*3
PM-017	Poço de Monitoramento	VOC *1, Metais *2, Inorgânicos*3
PM-018	Poço de Monitoramento	VOC *1, Metais *2, Inorgânicos*3
PM-019	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-020	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-021	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-022	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-023	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-024	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-025	Poço de Monitoramento	VOC *1, Metais *2, Inorgânicos*3
PM-026	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-027	Poço Destruido	
PM-028	Poço de Monitoramento	VOC *1, Metais *2, Inorgânicos*3
PM-029	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-030	Poço de Monitoramento	VOC *1, Metais *2, Inorgânicos*3
PM-031	Poço de Monitoramento	VOC *1, Metais *2, Inorgânicos*3
Réplica do PM-031		VOC *1, Metais *2, Inorgânicos*3
PM-032	Poço de Monitoramento	VOC *1, Metais *2, Inorgânicos*3
PM-033	Poço de Monitoramento	VOC *1, Metais *2, Inorgânicos*3
PM-034	Poço de Monitoramento	VOC *1, Metais *2, Inorgânicos*3
PM-035	Poço de Monitoramento	Metais *2, Inorgânicos*3
PM-036	Poço de Monitoramento	VOC *1, Metais *2, Inorgânicos*3
Réplica do PM-036		VOC *1, Metais *2, Inorgânicos*3

PM-037	Poço de Monitoramento	VOC * <sup>1</sup> , Metais * <sup>2</sup> , Inorgânicos* <sup>3</sup>
PM-038	Poço de Monitoramento	Metais * <sup>2</sup> , Inorgânicos* <sup>3</sup>
PM-039	Poço Destruido	
PM-040	Poço de Monitoramento	Metais * <sup>2</sup> , Inorgânicos* <sup>3</sup>
Branco Campo	Controle de Qualidade	VOC * <sup>1</sup> , Metais * <sup>2</sup> , Inorgânicos* <sup>3</sup>
Branco de Equipamento		VOC * <sup>1</sup> , Metais * <sup>2</sup> , Inorgânicos* <sup>3</sup>

\*1 – VOC (Diclorodifluorometano, Clorometano, Cloreto de Vinila, Bromometano, Cloroetano, Triclorofluorometano, 1,1 Dicloroetano, Diclorometano, Trans e cis 1,2 dicloroetano, 1,1 e 1,2 Dicloroetano, Clorofórmio, 1,1,1 Tricloroetano, 1,1 Dicloropropeno, Tetracloreto de carbono, Benzeno, Dibromometano, 1,2 e 1,3 Dicloropropano, Tricloroetano, Bromodichlorometano, Cis e Trans 1,3 Dicloropropeno, 4 Metil 2 Pentanona, 1,1,2 Tricloroetano, Tolueno, Dibromoclorometano, 2 Hexanona, 1,2 Dibromometano, Tetracloroetano, 1,1,1,2 e 1,1,2,2 Tetracloroetano, Clorobenzeno, Etilbenzeno, Bromofórmio, m, p-Xilenos, o-Xilenos, Trans e Cis 1,4 Dicloro 2 buteno, Estireno, 1,2,3 Tricloropropano, Isopropilbenzeno, Bromobenzeno, n-Propilbenzeno, 2 Clorotolueno, 4 Clorotolueno (PCT), Pentacloroetano, 1,3,5 e 1,2,4 Trimetilbenzeno, Terc e Sec Butilbenzeno, 1,2, 1,3 e 1,4 Diclorobenzeno, n-Isopropiltolueno, n-Butilbenzeno, 1,2 Dibromo 3 cloropropano, 1,2,4 e 1,2,3 Triclorobenzeno.).

\*2 – Metais (Lista CETESB - Al, Sb, As, Ba, B, Cd, Pb, Co, Cu, Cr, Fe, Mn, Hg, Mo, Ni, Ag, Se, V, Zn).

\*3 – Inorgânicos (Nitrogênio Total, Fósforo Total, Bromatos, Brometos, Cloratos (apenas água subterrânea), Cloretos, Cloritos, Fosfatos, Nitratos, Nitritos e Sulfatos).

O transporte das amostras foi acompanhado por uma cadeia de custódia (*Chain-of-Custody Record*) para assegurar seu recebimento dentro do prazo e condições de validade e encaminhadas ao laboratório.

### 3.4. Controle de Qualidade das Análises Químicas

As amostras de controle têm por objetivo rastrear eventuais desvios relacionados aos procedimentos de coleta ou análises químicas e verificar a representatividade dos resultados analíticos. Segue a descrição das amostras de controle:

- **Branco de Campo** - Quantidade de água previamente destilada, colocada em um frasco de coleta, transportada até o local da amostragem, manuseada como se fosse uma amostra e enviada ao laboratório para análises.
- **Branco de Equipamento** - Amostra de água destilada, desmineralizada ou deionizada que, depois de inserida em equipamento de amostragem ou de bombeada através do mesmo, é transferida para frascos de coleta e enviada ao laboratório para análise, a fim de que se verifique se esse equipamento foi efetivamente limpo no laboratório ou no campo.
- **Réplica** - Coleta de duas amostras de água de um mesmo ponto, para análise dos resultados analíticos e avaliação do desempenho do laboratório.

### 3.5. Padrões Ambientais de Referência

Os compostos de relevância ambiental em cada meio foram definidos por comparação direta de suas concentrações com os valores conservativos, estabelecidos por órgãos e agências ambientais e de saúde, em níveis nacionais e internacionais.

Nesta avaliação, para as análises das águas subterrâneas, foram considerados como valores de referência prioritários os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA

nº. 420. Perante a ausência de valores, nesta resolução, para determinado composto são adotados como valores de referência os padrões estabelecidos para a potabilidade humana na Portaria 518 do Ministério da Saúde, ou os Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo. Em última instância foram adotados os valores da EPA-ORNL. Enquanto para as águas superficiais foram utilizados os valores de referência da Resolução CONAMA nº. 357, de 17/Mar/2005.

- **Resolução nº. 420, de 28 de dezembro de 2009, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).** Dispõe sobre critérios e valores nacionais de referência de qualidade de solo e água subterrânea;
- **Portaria Federal nº. 2914/2011 do Ministério da Saúde.** Corresponde ao padrão de potabilidade nacional, que estabelece limites para águas destinadas ao consumo humano;
- **Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo da CETESB, 2005.** Na água subterrânea, para os valores que não estiverem presentes na Resolução CONAMA nº. 420 ou na Portaria 518, considera-se os valores de intervenção para as águas subterrâneas, que serão utilizados em caráter orientativo no gerenciamento da área avaliada;
- **EPA (atualizada em Abril/2012).** Regional Screening Levels (RSLs) definidos pela EPA e Oak Ridge National Laboratory (ORNL), acessível pelo site <http://www.epa.gov/region09/waste/sfund/prg/index.html>. Trata-se de uma atualização das tabelas RBC Região 3 – USEPA, HHMSSL – Região 6 – USEPA e PRG – Região 9 – USEPA;
- **Resolução nº. 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).** Dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.

Na ausência de enquadramento específico para o rio, os resultados das amostras de águas superficiais coletadas no mesmo, no trecho a jusante da área avaliada, foram comparados aos os valores estabelecidos para condições e padrões para águas Classe II – Águas Doces.

## **4. RESULTADOS OBTIDOS**

### **4.1. Potenciometria**

A partir dos valores de carga hidráulica obtidos, foram elaborados mapas potenciométricos para o aquífero raso e profundo, referentes às campanhas de monitoramento realizadas. Os **Desenhos 04a e 04b (Apêndice A)** apresentam,

respectivamente, os mapas potenciométricos do aquífero raso e profundo referentes à campanha de fevereiro de 2012 enquanto os **Desenhos 04c e 04d (Apêndice A)** apresentam os mapas potenciométricos referentes à campanha de agosto de 2012 para a porção do aquífero raso e profundo, respectivamente.

A análise dos mapas potenciométricos da porção rasa do aquífero apontam um sentido preferencial do fluxo da água no sentido sul para norte, em direção ao rio, e fluxos secundários para nordeste e noroeste. Já para a porção profunda do aquífero os mapas potenciométricos apontam um sentido preferencial de sudoeste para nordeste.

De modo geral, as águas subterrâneas de ambos os aquíferos fluem no mesmo sentido que as águas superficiais, de Sul para Norte-Nordeste, em direção ao rio e ao açude. Estes corpos hídricos constituem as zonas de descarga desses aquíferos.

#### 4.2. Ensaios de Permeabilidade e Fluxo da Água Subterrânea

O modelo matemático para a obtenção do coeficiente de condutividade hidráulica (k) foi desenvolvido por Bouwer & Rice (1976, *apud* Fetter, 1994) e é resumido na seguinte expressão:

$$K = \left[ r^2 \cdot \ln \left( \frac{R_{cont}}{2 \cdot L} \right) \right] \cdot \frac{1}{t} \cdot \left[ \ln \left( \frac{h_0}{h_t} \right) \right]$$

Onde:

r	=	Raio do poço de monitoramento (L).
R	=	Raio da perfuração do poço de monitoramento (L).
R <sub>cont</sub>	=	Distância da contribuição radial, sobre a qual a diferença na profundidade do nível d'água (t <sub>0</sub> ) é dissipada dentro do aquífero (L).
L	=	Comprimento do filtro do poço de monitoramento (L).
h <sub>0</sub>	=	Profundidade do nível d'água em t <sub>0</sub> =0 (L)
h <sub>t</sub>	=	Profundidade do nível d'água em t > t <sub>0</sub> (L)
K	=	Condutividade hidráulica (L/T).

A execução dos cálculos dos coeficientes de condutividade hidráulica foi auxiliada pelo software *Aquifer Test Pro*. Os gráficos com os valores obtidos para esses coeficientes são apresentados no **Anexo 01 (Apêndice C)**.

Os resultados obtidos apresentaram dois valores de condutividade hidráulica (k) para cada poço, um referente ao *slug test* e o outro ao *bail test*, sendo feita a média aritmética entre ambos. A **Tabela 4.2.1.** apresenta os valores médios obtidos para cada poço.

<b>Tabela 4.2.1. - Coeficientes de Condutividade Hidráulica (k) Obtidos</b>					
<b>Poço</b>	<b>K média (cm/s)</b>	<b>Poço</b>	<b>K média (cm/s)</b>	<b>Poço</b>	<b>K média (cm/s)</b>
PM-08	2,05E-05	PM-17	3,46E-05	PM-33	6,00E-05
PM-09	6,59E-05	PM-18	1,47E-04	PM-34	2,60E-04
PM-10	4,51E-04	PM-19	4,76E-06	PM-35	2,24E-05
PM-11	4,37E-05	PM-22	1,45E-05	PM-36	1,57E-04
PM-12	2,73E-05	PM-24	4,22E-04	PM-37	1,60E-04
PM-13	1,20E-03	PM-25	3,55E-04	PM-38	2,94E-04
PM-14	9,06E-05	PM-28	3,16E-04	PM-40	6,78E-04
PM-15	1,06E-04	PM-30	1,76E-04		
PM-16	1,61E-04	PM-31	6,67E-05		

De acordo com a geologia local, a litologia predominante na área na porção do aquífero raso é uma argila-arenosa, que segundo Fetter (1994), possui uma porosidade efetiva ( $n_e$ ) média de 7%, conforme a **Tabela 4.2.2.** a seguir.

<b>Tabela 4.2.2. – Valores de Porosidade Efetiva (<math>n_e</math>) de Materiais</b>			
<b>Material</b>	<b>Specific Yield (%)</b>		
	<b>Maximum</b>	<b>Minimum</b>	<b>Average</b>
Clay	5	0	2
Sandy clay	12	3	7
Silt	19	3	18
Fine sand	28	10	21
Medium sand	32	15	26
Coarse sand	35	20	27
Gravelly sand	35	20	25
Fine gravel	35	21	25
Medium gravel	26	13	23
Coarse gravel	26	12	22

Fonte: (Fetter 1994, Adaptado)

A velocidade de migração da água subterrânea foi calculada com base nos dados coletados em campo (ensaios permeabilidade) e parâmetros hidrogeológicos da literatura (Fetter, 1994 e Freeze & Cherry, 1979), de acordo com a Lei de Darcy, através da equação:

$$V = \frac{K \cdot i}{n_e}$$

Onde:

- V = Velocidade das águas subterrâneas (L/T)  
 K = Condutividade hidráulica (L/T)  
 i = Gradiente hidráulico (L/L)  
 n<sub>e</sub> = Porosidade efetiva (L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>)

Para determinação da velocidade de deslocamento da água subterrânea na área, calculou-se por meio da média geométrica um coeficiente de condutividade hidráulica a partir dos valores pontuais das condutividades hidráulicas obtidos nos ensaios de permeabilidade realizados em cada poço (Tabela 4.2.1.). O valor médio encontrado para esse coeficiente foi  $1,06 \times 10^{-4}$  cm/s.

Logo, para o cálculo foi adotada a porosidade efetiva média de 7% (Fetter, 1994), condutividade hidráulica média de  $1,06 \times 10^{-4}$  cm/s, segundo os ensaios de permeabilidade realizados, e gradiente hidráulico de 2,03%, conforme os dados de nível d'água referentes ao monitoramento efetuado em fevereiro de 2012.

A **Tabela 4.2.3.** apresenta os parâmetros envolvidos no cálculo da velocidade média de deslocamento das águas subterrâneas para o aquífero raso identificado na área do terreno em estudo.

<b>Tabela 4.2.3. – Parâmetros Utilizados no Cálculo da Velocidade de Deslocamento das Águas Subterrâneas</b>							
<b>Poço Potencial Máximo</b>	<b>Carga Hidráulica Máxima</b>	<b>Poço Potencial Mínimo</b>	<b>Carga Hidráulica Mínima</b>	<b>Distância Envolvida</b>	<b>Gradiente Hidráulico</b>	<b>Condutividade Hidráulica (k) Média</b>	<b>Porosidade Efetiva</b>
<b>(m)</b>	<b>(m)</b>	<b>(m)</b>	<b>(m)</b>	<b>(m)</b>	<b>(%)</b>	<b>(cm/s)</b>	<b>(%)</b>
PM-022	22,015	PM-011	10,159	584	2,03	$1,06 \times 10^{-4}$	7

Conforme apresentado, estima-se que a velocidade média de migração das águas subterrâneas no aquífero raso seja da ordem de 9,7 m/ano.

### **4.3. Parâmetros Físico-Químicos *In Situ***

A **Planilha 03 (Apêndice B)** apresenta um sumário com os resultados dos parâmetros físico-químicos obtidos *in situ* nas campanhas de fevereiro e agosto de 2012, e também os resultados referentes à campanha realizada em 2010.

A temperatura média da água subterrânea na área é de 28,7 °C, apresentando grande variação, com valores entre 26,6 °C (PM-23) e 32,4 °C (PM-14). Já os dados obtidos para condutividade elétrica (CE), que apesar de pontualmente mostrar valores abaixo de 200 µS/cm, geralmente apresentou valores muito elevados, caracterizando a água subterrânea como águas de alta salinidade. Os valores mais altos são encontrados na campanha de fevereiro de 2012, com máximo de 175.300 µS/cm (PM-14). Já na campanha de agosto de 2012 os valores, de modo geral, apresentaram significativa queda, entretanto mantiveram-se acima de 1.000 µS/cm.

Quanto ao potencial hidrogeniônico (pH), tanto a água subterrânea quanto a superficial do local são caracterizadas por serem neutras a levemente ácidas, apresentando valor médio de 6,54 UpH. Os índices mais elevados de acidez são obtidos em geral nos poços fora da área industrial (PM-17, PM-25, PM-31 e PM-33), localizados a jusante desta, com valores de pH entre 3,0 e 5,0, enquanto os mais alcalinos são obtidos nos poços PM-14 e PM-15, localizados na região do prédio da eletrólise, com valores acima de 12,0 UpH. Esses poços com pH elevado também apresentaram as mais baixas concentrações de oxigênio dissolvido (OD), que quando não é zero são valores muito próximos disso. Também são encontradas baixas concentrações de oxigênio dissolvido em quase todos os poços da área, exceção aos poços que ficam afastados da área industrial, em geral a jusante da mesma.

Os valores de oxi-redução (Eh) apresentaram grande variação, entre -507,5 mV a 220,5 mV, resultando um valor médio de 20,9 mV. Essa elevada amplitude entre os valores é importante ser destacada devido ao fato de muitos dos constituintes da água subterrânea serem sensíveis a variações desse parâmetro. Apesar dessa amplitude, os valores encontrados são baixos e, associados à baixa disponibilidade de oxigênio dissolvido (OD), corroboram de modo geral para um ambiente redutor. Exceção a isso é a área próxima ao rio, onde os dados obtidos indicam um ambiente oxidante.

### **4.4. Resultados Analíticos de Água Subterrânea e Superficial**

Apesar das análises terem contemplado os parâmetros VOC, inorgânicos e metais, serão apresentados apenas os resultados referentes aos metais para ambas as campanhas de amostragem realizadas em 2012, o sumário com esses resultados é apresentado no

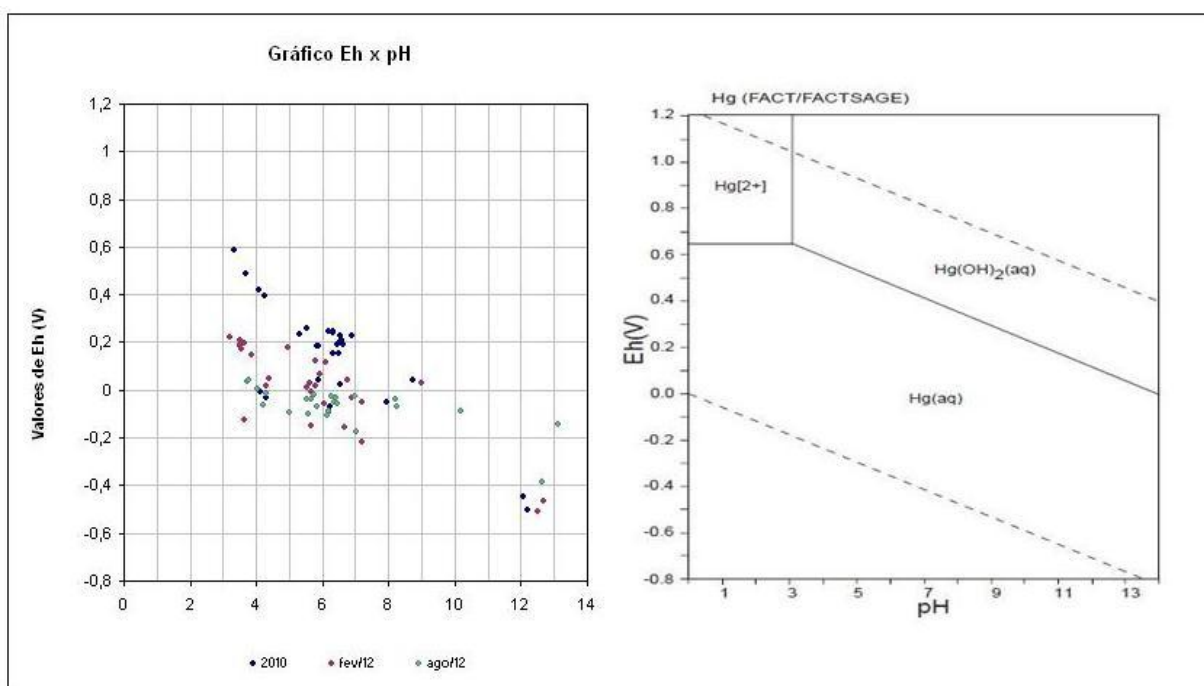


**Anexo 02 (Apêndice C).** Essas análises detectaram concentrações acima dos valores de referência para diversos metais, entretanto apenas será dado destaque aos níveis encontrados para mercúrio.

### **Mercúrio**

Foi detectada concentrações de mercúrio acima dos valores permitidos em 09 poços de monitoramento do local. Destacam-se os valores obtidos nos poços da área da eletrólise (PM-14 e PM-15), que vêm apresentando em todas as campanhas aumento nas concentrações, chegando a atingir valores mil vezes acima do limite permitido. O **Desenho 05 (Apêndice A)** apresenta a distribuição espacial do histórico das concentrações já obtidas para mercúrio nesses nove poços, referente às três campanhas em estudo neste trabalho. Para água superficial nenhuma concentração de mercúrio foi detectada.

Esse mercúrio obtido na água subterrânea da área foi analisado mediante a construção de gráficos entre pH x Eh (**Anexo 03 - Apêndice C**) referentes a cada campanha realizada para a avaliação da mobilidade desse composto. A **Figura 4.4.1.** mostra uma compilação desses resultados em um único gráfico comparando-o ao diagrama de estabilidade do mercúrio .



**Figura 4.4.1. – Avaliação da Mobilidade do Mercúrio.**

Fonte do Diagrama: *Geological Survey of Japan – Open File Report Nº 419 – Atlas of Eh-pH diagrams*, 2005

Os resultados obtidos indicam que as condições hidroquímicas da área são condizentes com a presença de mercúrio detectado em solução ( $\text{Hg}_{(\text{aq})}$ ). Nota-se também que os maiores valores de pH estão associados aos menores valores de Eh, enquanto os maiores valores de Eh estão associados aos menores valores de pH.

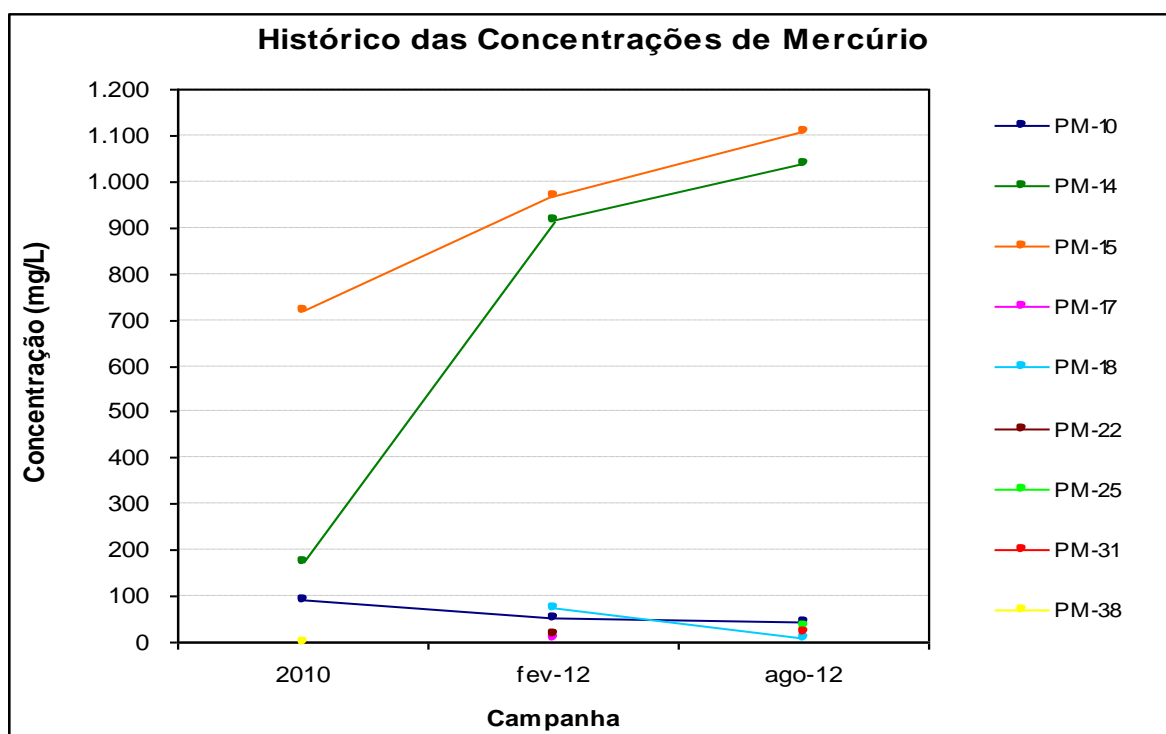
## 5. INTERPRETAÇÕES E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

### 5.1. Hidrogeologia e Hidroquímica

Através das concentrações de mercúrio obtidas em cada poço de monitoramento foi delimitada a distribuição espacial das plumas de contaminação deste metal para cada campanha realizada. O **Desenho 06 (Apêndice A)** apresenta essas distribuições em planta.

Analisando essas plantas observa-se a distinção de três plumas principais, uma no atual prédio da eletrólise, outra na área da antiga eletrólise, e uma próxima ao rio. Dentre essas, é possível observar que o centro de massa principal para os três momentos monitorados diz respeito a pluma localizada na região do atual prédio da eletrólise, condizente com a caracterização do local como fonte primária da contaminação de mercúrio. Para os três monitoramentos, o prédio da antiga eletrólise ainda mostrou vestígios de seu passado como fonte primária, fato evidenciado pela pequena pluma que ainda persiste no local, caracterizando uma atual fonte secundária. Pontualmente, baixos teores de mercúrio são encontrados na porção sudoeste da área, local próximo ao antigo depósito de cal e lama, porém na campanha mais recente (agosto de 2012) nenhum valor foi observado nas amostras desse local. Entretanto, nesta mesma campanha obteve-se concentrações de mercúrio na região a jusante da indústria, local próximo ao rio e sem ocorrências no passado.

A **Figura 5.1.1.** mostra o gráfico com a evolução das concentrações de mercúrio para os poços de monitoramento que já apresentaram detecção desse composto em alguma dentre as três campanhas realizadas.



**Figura 5.1.1.** – Gráfico da Evolução das Concentrações de Mercúrio em cada Poço de Monitoramento.

As concentrações de mercúrio obtidas mostram que em determinados poços essas diminuíram e/ou sumiram enquanto em outros aumentaram e/ou surgiram. Dentre os poços que já apresentaram concentrações de mercúrio, o PM-10 (área da antiga eletrólise) e o PM-18 mostraram um decréscimo gradativo em seus teores, enquanto que os PM's 17, 22 e 38 já não mais apresentam concentrações deste metal. O PM-14 e o PM-15, localizados na área da eletrólise, alcançaram teores acima de 1.000 mg/L, enquanto os PM's 25 e 31 localizados próximos ao rio, que nunca haviam obtido concentrações, passaram a apresentar.

Associando as concentrações de mercúrio obtidas com a distribuição de suas plumas, nota-se que na pluma da área da antiga eletrólise apesar das concentrações de mercúrio terem mostrado uma gradativa baixa em seus valores, especialmente ela não apresentou redução e nem deslocamento. Para a área próxima ao rio houve o aparecimento de concentrações de mercúrio e a delimitação de uma pequena pluma para esse local, tal fato pode estar associado a alguma nova fonte de contaminação provavelmente decorrente das canaletas que levam os efluentes até o rio, ou apenas estar associado a algum erro de coleta. Já para a pluma de mercúrio na área do atual prédio da eletrólise, em um primeiro momento essa mostrou avanço em sua área de influência e aumento em seus níveis de concentrações, em seguida essas concentrações mostram diminuição nas porções mais externas da pluma e redução de sua área, esse fato pode estar associado a sazonalidade

do local, que permite uma maior dissolução do mercúrio de acordo com a disponibilidade de água, ou mesmo indicar que a pluma ao avançar para jusante e encontrar condições físico-químicas diferentes, por exemplo mais oxidantes, faz o mercúrio mudar para uma forma não possível de detectar com os atuais métodos de análises utilizados, enquanto que na porção central desta pluma as concentrações aumentaram ainda mais.

Verticalmente, a percolação dessas plumas de contaminação fica limitada pela heterogeneidade geológica. Presume-se que o contaminante consegue mover-se na vertical apenas na porção areno-argilosa do solo, camada mais superficial, até encontrar o topo da argila compacta, nível que pode ser atingido entre profundidades de 10 e 20 metros. Essa argila funciona como selo, impedindo a contaminação de atingir maiores profundidades e alcançar o aquífero profundo, mantendo-a apenas em meio ao aquífero raso.

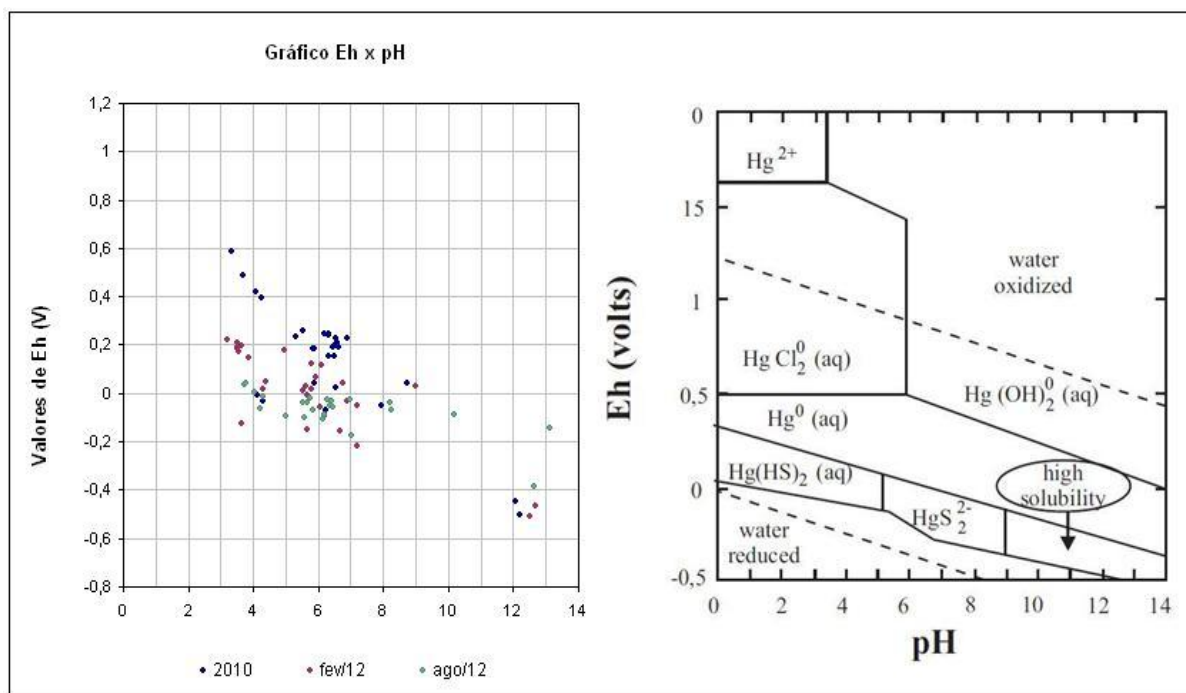
No atual prédio da eletrólise (fonte primária), os vazamentos durante o manuseio e processos de produção dos compostos acrescido ao grande vazamento ocorrido no passado com os tanques de armazenamento de cloro, que proporcionou a percolação de grandes concentrações deste composto para o aquífero, fazem este local apresentar uma grande disponibilidade de cloro ( $\text{Cl}^-$ ), de soda cáustica ( $\text{NaOH}$ ), de amálgama ( $\text{NaHg}$ ), e do próprio mercúrio ( $\text{Hg}$ ). A disponibilidade desses compostos pode desencadear reações químicas (**Reação 5.1. a 5.4.**) que irão gerar novos compostos.



Na possibilidade dessas reações ocorrerem, da **Reação 5.1a** obtêm-se o sal de cozinha ( $\text{NaCl}$ ) e a liberação de hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), composto que pode estar corroborando para o elevado pH (>12,0) encontrado neste local. Da **Reação 5.1b** obtêm-se novamente o sal de cozinha, dessa vez junto com mercúrio dissolvido, composto que pode incrementar as elevadas concentrações encontradas. Já das **Reações 5.1c e 5.1d** são esperados obter os complexos orgânicos Cloreto de Mercúrio ( $\text{HgCl}_2$ ) e/ou o Cloreto de mercurioso ( $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ), a depender do estado de valência em que o mercúrio estiver.

Comparando os dados do gráfico de estabilidade Eh x pH, referente aos dados compilados das campanhas realizadas, com o diagrama de estabilidade das principais

espécies de mercúrio inorgânico (**Figura 5.1.2.**), nota-se que o complexo  $\text{HgCl}_{2(\text{aq})}$  é possível de ocorrer em condições específicas, dependendo dos valores de pH e Eh encontrados.



**Figura 5.1.2.** – Avaliação da Mobilidade e Ocorrência do Mercúrio através do Diagrama de Estabilidade das Principais Espécies de Mercúrio Inorgânico adaptado de Veiga (1994).

De acordo com os dados dos gráficos é possível dizer que provavelmente em alguns pontos pertencentes a campanha de 2010 tenha ocorrido a geração do cloreto de mercúrio ( $\text{HgCl}_{2(\text{aq})}$ ), a comparação entre os gráficos apontam condições de Eh e pH apropriadas para isso, com valores de pH abaixo 6,0 UpH e principalmente Eh acima de 0,5 volts. Entretanto, observa-se que as condições químicas atuais e prevalecentes no local, com Eh entre -0,2 e 0,4 volts e pH com caráter neutro ou em torno disso, favorecem para a ocorrência principal do mercúrio dissolvido ( $\text{Hg}_{(\text{aq})}$ ), até com alguns pontos de pH elevado caindo dentro do campo onde o mercúrio apresenta elevada solubilidade.

## 5.2. Considerações

Através dos resultados alcançados pela caracterização da área industrial impactada por mercúrio, do atual cenário encontrado, e pelas interpretações realizadas é possível concluir alguns pontos importantes:

- As águas subterrâneas de ambos os aquíferos possuem uma direção preferencial de fluxo de sul para norte-nordeste, até atingir as zonas de descarga constituídas pelo

rio e pelo açude. Para o aquífero raso a velocidade média desse fluxo é de 9,7 m/ano;

- A litologia predominante na porção referente ao aquífero raso possui um caráter heterogêneo, com intercalações de materiais arenosos e argilosos, que proporcionam a baixa condutividade hidráulica encontrada condizente com a velocidade do fluxo obtido;
- Os elevados valores de pH obtidos na área da eletrólise pode estar associado a liberação de hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) gerada na reação entre a soda cáustica e o cloro puro disponíveis no aquífero;
- Os diagramas de pH x Eh apontam que o mercúrio presente no aquífero raso encontra-se na forma dissolvida e, nos pontos com elevado UpH, caracteriza-se por ser muito solúvel, indicando que sua mobilidade possui relação com o pH da água;
- Não há concentrações de mercúrio nas águas subterrâneas do aquífero profundo devido a este composto não conseguir percolar verticalmente através da argila compacta, e também não há concentrações de mercúrio nas águas superficiais;
- A contaminação encontra-se exclusivamente no aquífero raso, distribuindo-se em três locais distintos: (i) uma fonte primária ativa na atual área da eletrólise; (ii) uma fonte secundária proveniente de antigos vazamentos na velha área da eletrólise; e (iii) uma nova suspeita de fonte a norte da indústria podendo estar relacionada a vazamentos nas canaletas que levam os resíduos até o rio ou algum erro durante a amostragem, necessitando uma melhor avaliação desta área;

De acordo com o atual cenário encontrado, e antes de qualquer direcionamento ou discussão sobre alguma técnica de remediação, é importante observar a necessidade de algumas medidas prioritárias a serem realizadas na área.

Primordialmente é recomendado que a fonte primária de contaminação seja cessada na área da eletrólise através de reformas que adéqüem as instalações onde ocorrem os processos de produção e manuseios de compostos, impedindo esta fonte ativa de continuar atuando através do incremento de cloro e mercúrio para o aquífero, e também a realização de pelo menos duas campanhas de amostragem, sanando a questão levantada sobre a fonte da concentração de mercúrio próximo ao rio, e também para ajudar no entendimento do novo comportamento das plumas, realizando um novo modelamento que ajudasse a compreender esse comportamento ao longo do tempo

## **6. CONCLUSÕES**

A remediação em uma área contaminada por mercúrio, ou mesmo por qualquer outro composto, envolve uma série de cuidados para que o sistema a ser implantado obtenha

sucesso. É importante seguir e executar todas as etapas propostas no gerenciamento de áreas contaminadas, sendo: investigação ambiental detalhada, modelo matemático de fluxo e transporte de contaminantes, avaliação de risco à saúde humana, conceito de remediação e projeto de remediação, envolvendo os ensaios de bancada e/ou piloto.

Pelas características físicas encontradas para o aquífero, o método *pump-and-treat* (*ex situ*) pode ser considerado descartado das opções para remediação, já que esse sistema é muito dependente de uma alta condutividade hidráulica para que seu funcionamento seja eficiente, característica não encontrada na área. Desse modo, é provável que o sistema de remediação para a área seja realizado *in situ*, onde o sucesso do sistema dependerá muito da ação do meio físico.

Dentre esses sistemas realizados *in situ* e que possam vir a ser adequados, provavelmente irão englobar processos térmicos ou químicos. Os processos térmicos envolvem o aquecimento dos resíduos (mercúrio + solo) para posterior condensação e recuperação do mercúrio, entretanto tal processo não remove o metal dissolvido da água subterrânea e também é inviável devido a impossibilidade de remoção dos solos abaixo das edificações da indústria.

Assim, de acordo com as características físicas do local e do contaminante, o sistema de remediação a ser implantado provavelmente será realizado através de técnicas que envolvam processos químicos, como por exemplo, a injeção de reagentes que sejam capazes de mobilizar o mercúrio, havendo ainda a possibilidade de a técnica escolhida ser aplicada juntamente com outra para conseguir alcançar os resultados esperados de forma mais eficaz. Essas técnicas, através de ensaios piloto realizados tanto em bancada quanto *in situ*, irão demonstrar a eficiência dos processos.

Após a implantação do sistema de remediação, concomitante a ele deverá haver um monitoramento periódico da água subterrânea para acompanhar a evolução das concentrações de mercúrio no aquífero.

Quanto a hipótese levantada sobre a presença de mercúrio na área próxima ao rio estar associada às canaletas de transporte de efluentes líquidos, se confirmada, torna necessário avaliar a eficiência da ETE, já que em tese os efluentes líquidos ao sair dela e ir em direção ao rio devem estar sem nenhuma contaminação. Independente disso, a adequação das canaletas que ligam a área de produção à ETE é importante, garantindo o transporte dos resíduos sem perdas.

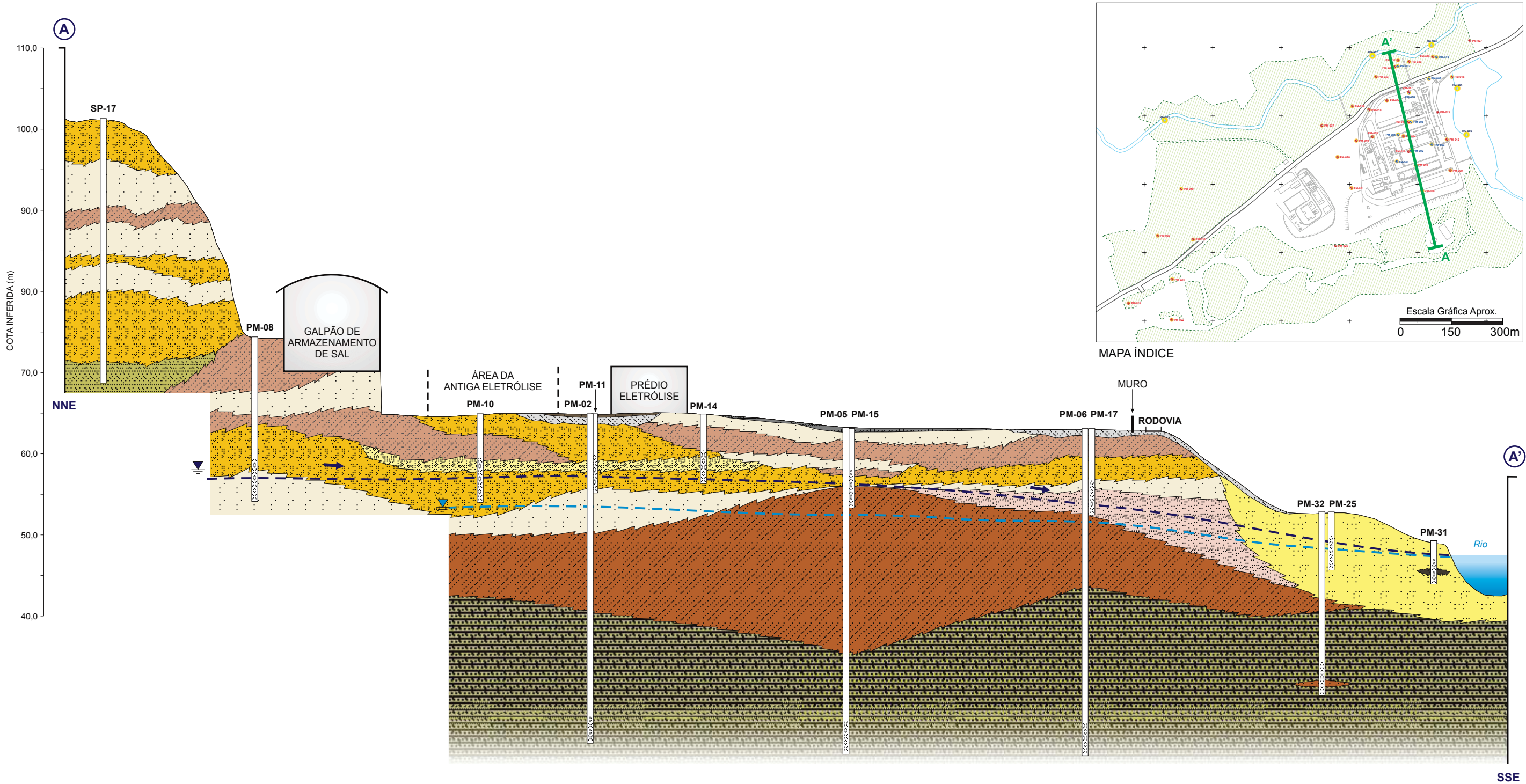
## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2010. NBR 15.847: amostragem de água subterrânea em poços de monitoramento e métodos de purga. Rio de Janeiro.
- ALLOWAY, B.J. 1995 - “Heavy Metals in Soils”. Blackie Academic & Professional, sec ed., 368p.
- ARAÚJO, V.D., REYES-PERES, Y.A., LIMA, R.O., PELOSI, A.M.R., MENEZES, L., CÓRDOBA, V.C., PINHEIRO, F.L., 2006. Fácies e Sistema Depositional da Formação Barreiras na Região da Barreira do Inferno, Litoral Oriental do Rio Grande do Norte. Revista do Instituto de Geociências – USP - Geol. USP Sér. Cient., São Paulo, v. 6, n. 2, p. 43-49, outubro 2006. Disponível em: [www.igc.usp.br/geologiausp](http://www.igc.usp.br/geologiausp). Acessado em: 23 maio 2012.
- ASTM 2002. American Society for Testing and Materials. ASTM D 6771–02: Standard Practice for Low-Flow Purging and Sampling for Wells and Devices Used for Ground-Water Quality Investigations.
- CAMPOS, V., 2001. Comportamento químico de arsênio, fósforo e metais pesados (cromo, cobre, chumbo e mercúrio) em solos expostos a cultivares frutíferos, Município de Jundiá, São Paulo. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 143pp.
- CETESB 1987. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Guia de Coleta e Preservação de Amostras de Água
- CETESB 1988. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Norma 06.010 – Amostragem e Monitoramento de Águas Subterrâneas. Anexo A - Orientação para Coleta de Amostras. p.10 – 21. Atualizado em 1999.
- CETESB 2001. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Manual de Gerenciamento de áreas contaminadas. 2ª Edição. São Paulo: CETESB/GTZ, 2001.
- CETESB 2007. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Procedimentos para Gerenciamento de Áreas Contaminadas. São Paulo: CETESB/SMA, 2007.
- CONAMA 2005. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de Março de 2005.
- CONAMA 2009. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 420 de 28 de Dezembro de 2009.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2005. Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea. Diagnóstico do Município de Igarassu, Estado de Pernambuco. CPRM/PRODEEM.
- EVONIK INDUSTRIES AG 2012 – TMT-15. Disponível em: <http://www.tmt15.com/product/tmt15/en/Pages/default.aspx>. Acessado em: 05 jun 2012.



- FETTER, C. W., 1994 – “Applied Hydrogeology”, 3a. ed, New Jersey, Prentice Hall. 91 p.
- FREEZE & CHERRY, 1979. “Groundwater”. Prentice Hall, N.J., 604 pp.
- Ministério da Saúde, 2004. Portaria N.º 518, de 25 de Março de 2004.
- MULLIGAN, C.N., YONG, R. N., & GIBBS, B.F. 2001 – “Remediation Technologies for Metal-contaminated Soils and Groundwater: An Evaluation”. Engineering Geology v.60, n.1-4, pp. 193-207.
- GEOLOGICAL SURVEY OF JAPAN, 2005. Atlas of Eh-pH diagrams - Intercomparison of thermodynamic databases. Geological Survey of Japan - Open File Report N° 419. 285p.
- USEPA. 1996. United States Environmental Protection Agency. Soil Screening Guidance: Technical Background Document Tables of Contents. Document Number: EPA/540/R-95/128, July 1996.
- USEPA. 2012. United States Environmental Protection Agency e Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Regional Screening Levels for Chemical Contaminants at Superfund Sites. Apr 2012. Summary Table. <http://www.epa.gov/region09/superfund/prg/>
- USEPA, 2012 – United States Environmental Protection Agency. Contaminated Site – Clean-Up Information. Disponível em: <http://www.clu-in.org/contaminantfocus/default.focus/sec/Mercury>. Acessado em: 01 outubro 2012.
- VEIGA, M.M. 1994. A Heuristic System For Environmental Risk Assessment of Mercury From Gold Mining Operation. Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Doctor of Philosophy. The University of British Columbia – Department of Mining and Mineral Engineering. 196p.

DESENHO 01A - SEÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA ÁREA INVESTIGADA (A-A')



LEGENDA

- Solo orgânico, argio-arenoso de cor marrom a preto
- Concreto, paralelepípedo ou cimento
- Aterro areno-argiloso, de cor cinza amarelado, por vezes contendo concreto

GRUPO BARREIRAS

- Argila arenosa com tons variegados (vermelho, amarelo, marrom), por vezes apresentando seixos de quartzo
- Areia fina a grossa, por vezes contendo níveis argilosos e grânulos de quartzo leitoso e hialino, de coloração variegada (cinza esbranquiçado, marrom ao vermelho)
- Argila, por vezes compacta e níveis poucos arenosos de coloração vermelha e vinho
- Argila de coloração avermelhada, por vezes esbranquiçado
- Areia argilosa, de granulometria fina a grossa com coloração variegada (cinza, vermelho e rosa) e presença de quartzo leitoso
- Arenito fino a médio de coloração variegada
- Nível conglomerático

ALUVIÃO

- Areia fina a grossa de coloração amarelo esbranquiçado
- Argila orgânica preta

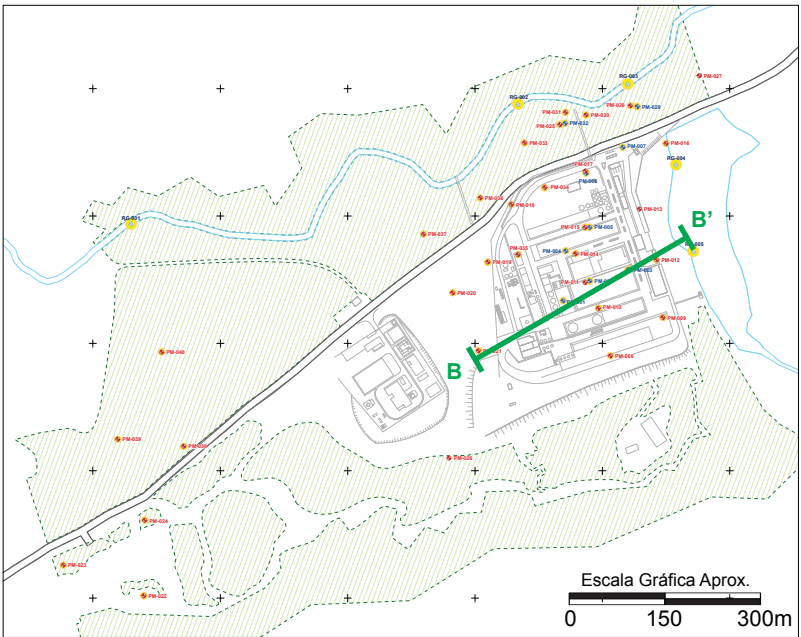
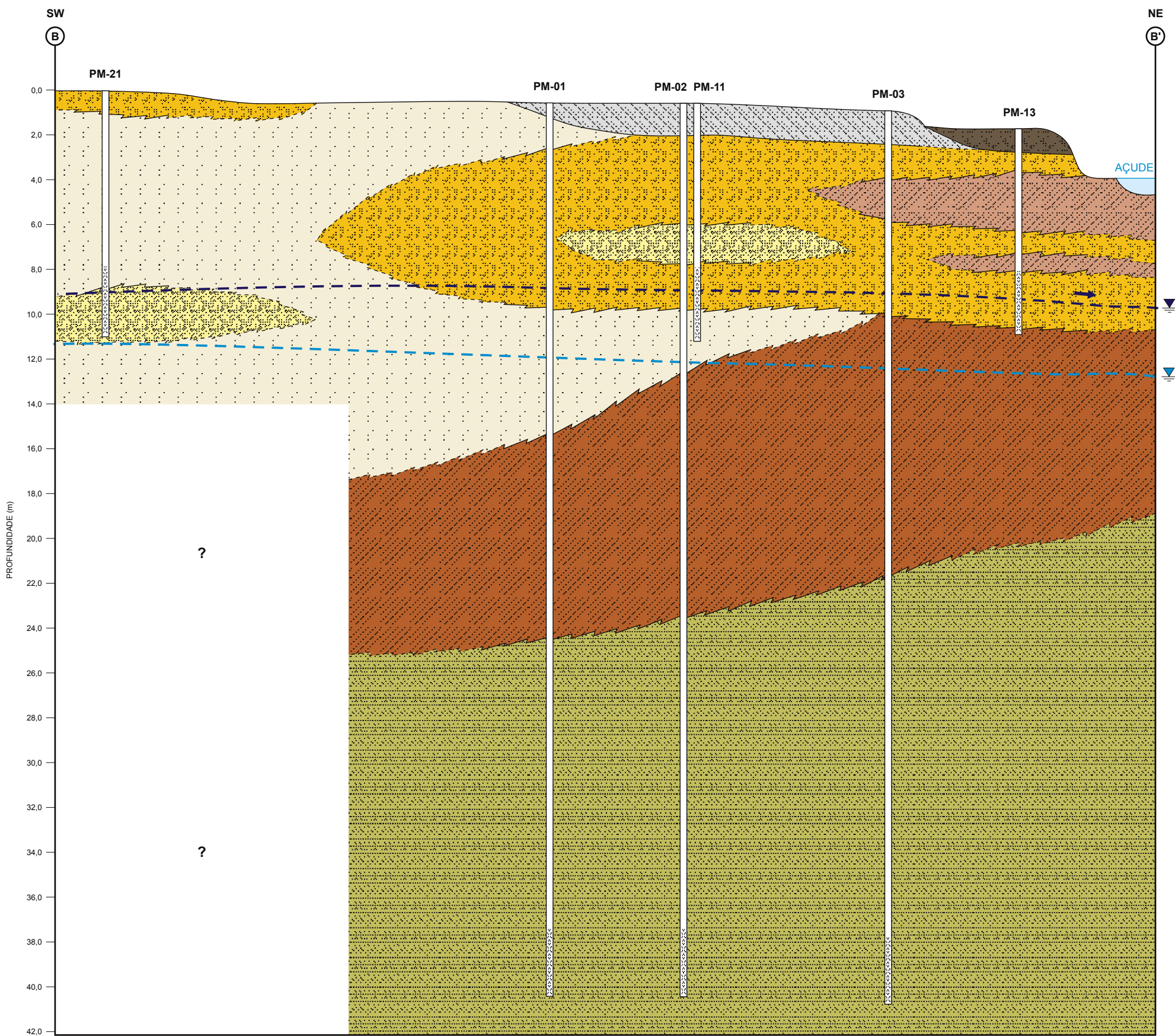
- Direção do fluxo
- Nível d'água
- Superfície piezométrica média (aqüífero raso)
- Superfície piezométrica média (aqüífero profundo)

Escala Horizontal  
0 35 70m

MONOGRAFIA
TF - 2012 / 30
DESENHO 01A
APÊNDICE A



DESENHO 01B - SEÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA ÁREA INVESTIGADA (B-B')



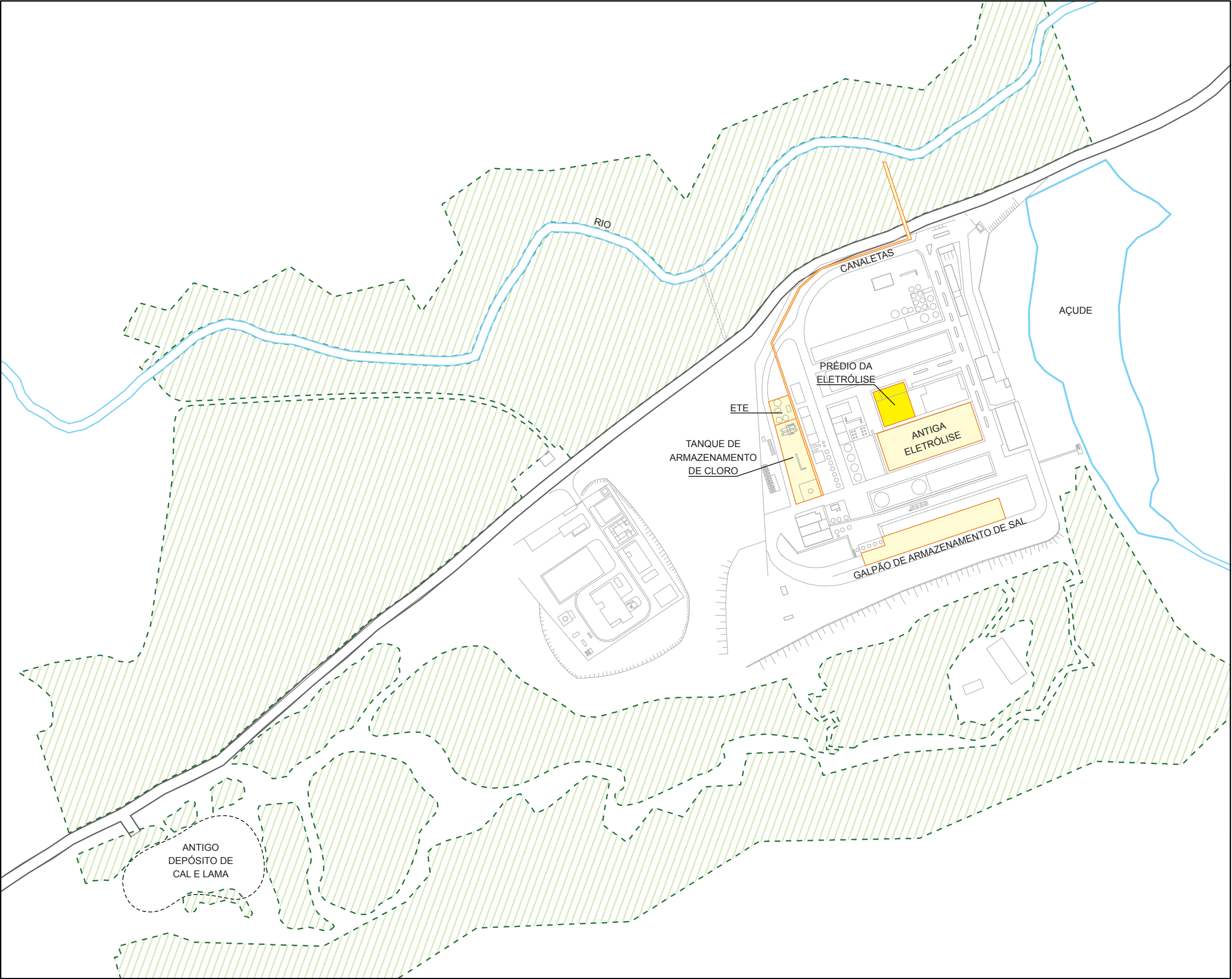
MAPA ÍNDICE

LEGENDA

- Solo orgânico, argilo-arenoso de cor marrom a preto
- Aterro areno-argiloso, de cor cinza amarelado, por vezes contendo concreto
- Argila arenosa com tons variegados (vermelho, amarelo, marrom), por vezes apresentando seixos de quartzo e localmente variações na proporção da argila-arenosa
- Areia fina a grossa, por vezes contendo níveis argilosos e grânulos de quartzo leitoso e hialino de coloração variegada (cinza esbranquiçado do marrom ao vermelho)
- Argila de coloração avermelhada, esbranquiçada
- Areia argilosa de granulometria fina a grossa com coloração variegada
- Arenito fino a médio de colorações variegada (esbranquiçado, amarelo a vermelho)
- Nível conglomerado
- Contato definido
- Contato inferido
- ? Sem informação
- Direção do fluxo
- Nível d'água
- Superfície piezométrica média (aqüífero raso)
- Superfície piezométrica média (aqüífero profundo)

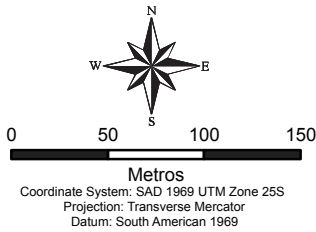
GRUPO BARREIRAS

DESENHO 02 - PLANTA SA ÁREA INDUSTRIAL INVESTIGADA



Legenda

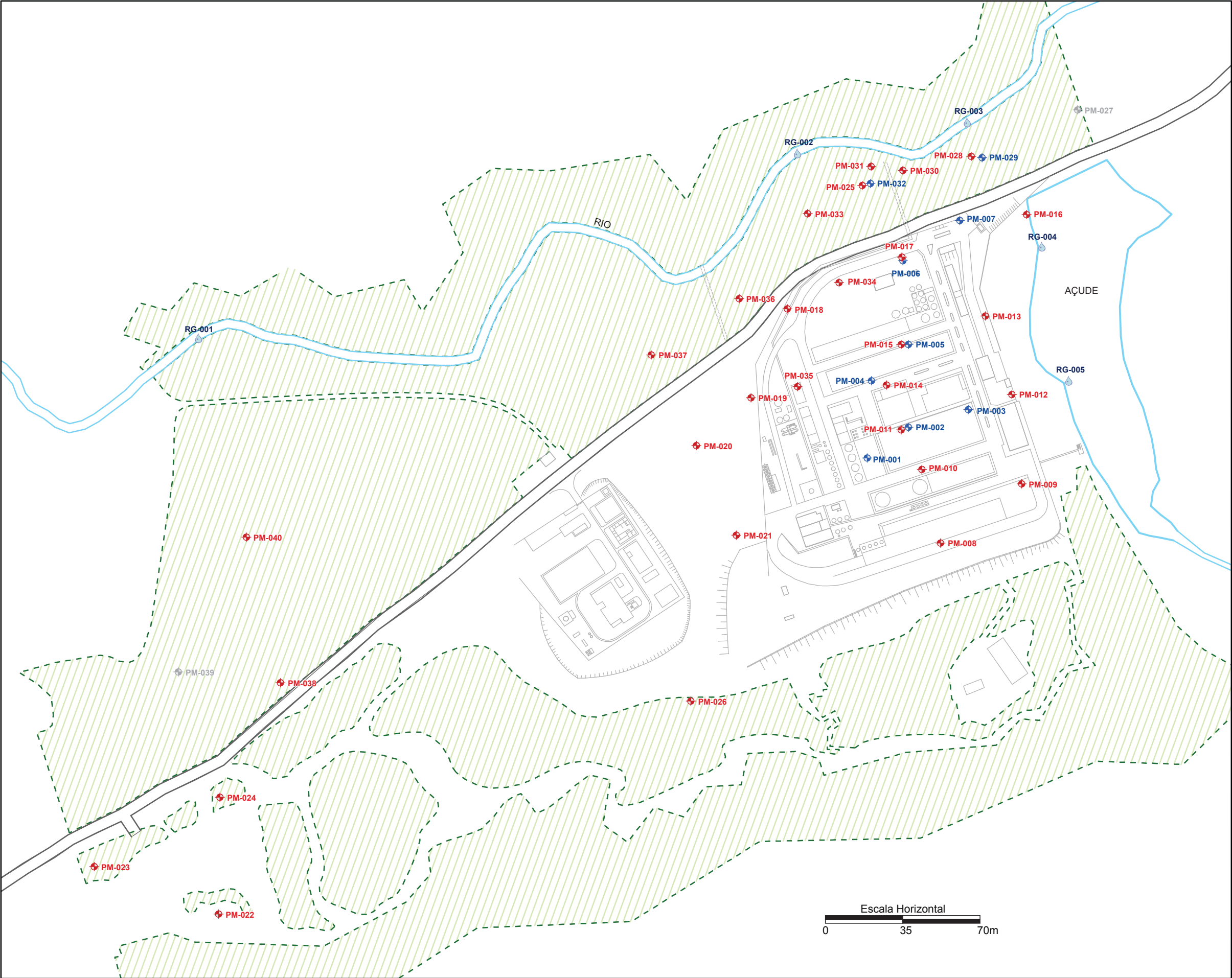
- Hidrografia
- Vegetação
- Rodovia
- Fonte primária de Hg
- Principais áreas



MONOGRAFIA
TF - 2012 / 30
DESENHO 02
APÊNDICE A

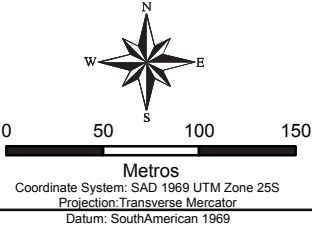


DESENHO 03 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE COLETA DAS AMOSTRAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA E SUPERFICIAL



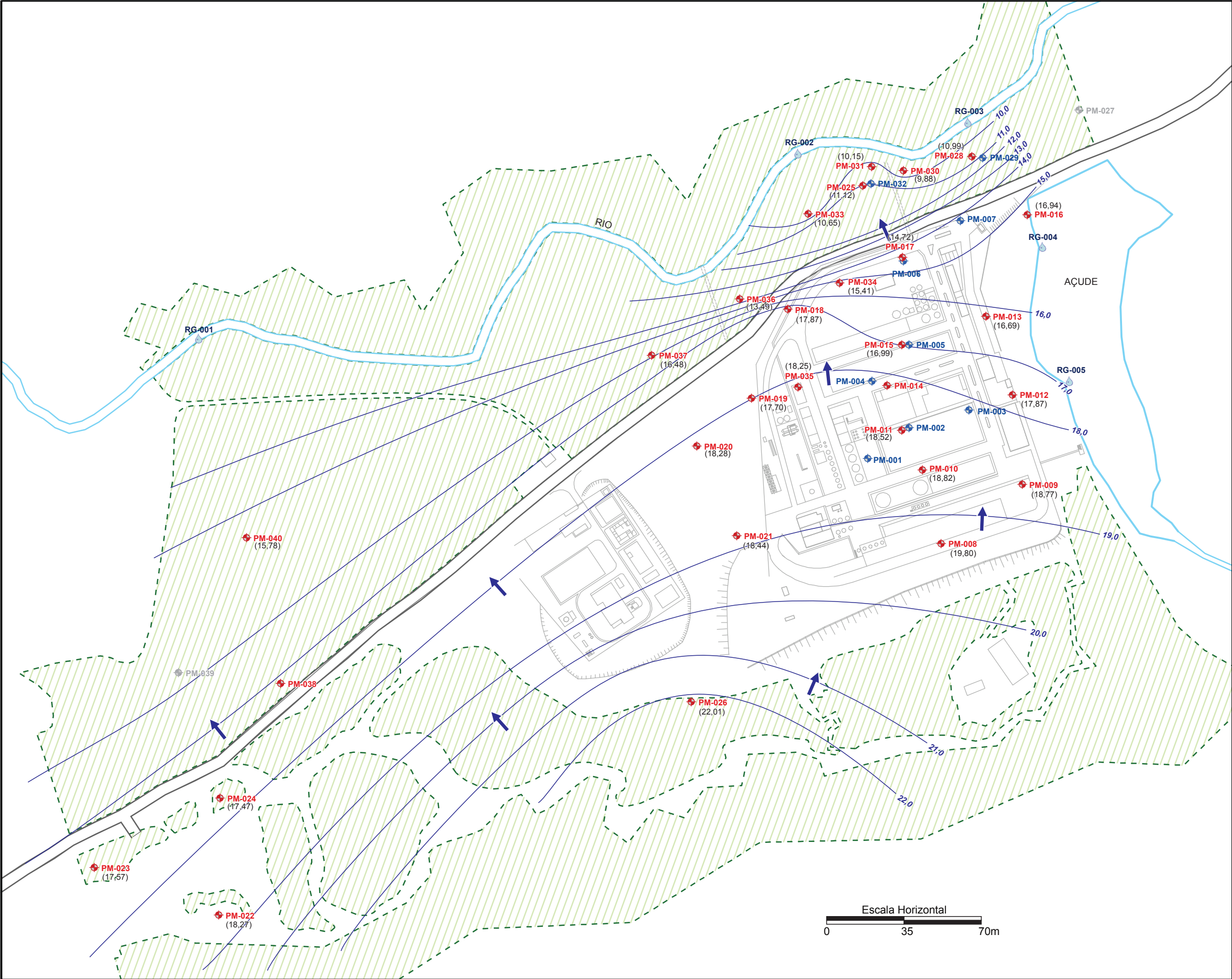
Legenda

- Poço de Monitoramento Raso
- Poço de Monitoramento Profundo
- Poço Destruído
- Régua
- Hidrografia
- Vegetação
- Rodovia

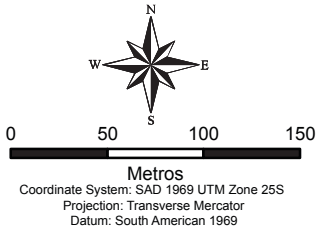


MONOGRAFIA
TF - 2012 / 30
DESENHO 03
APÊNDICE A

DESENHO 04A - MAPA POTENCIOMÉTRICO DO AQUÍFERO RASO - FEV/12



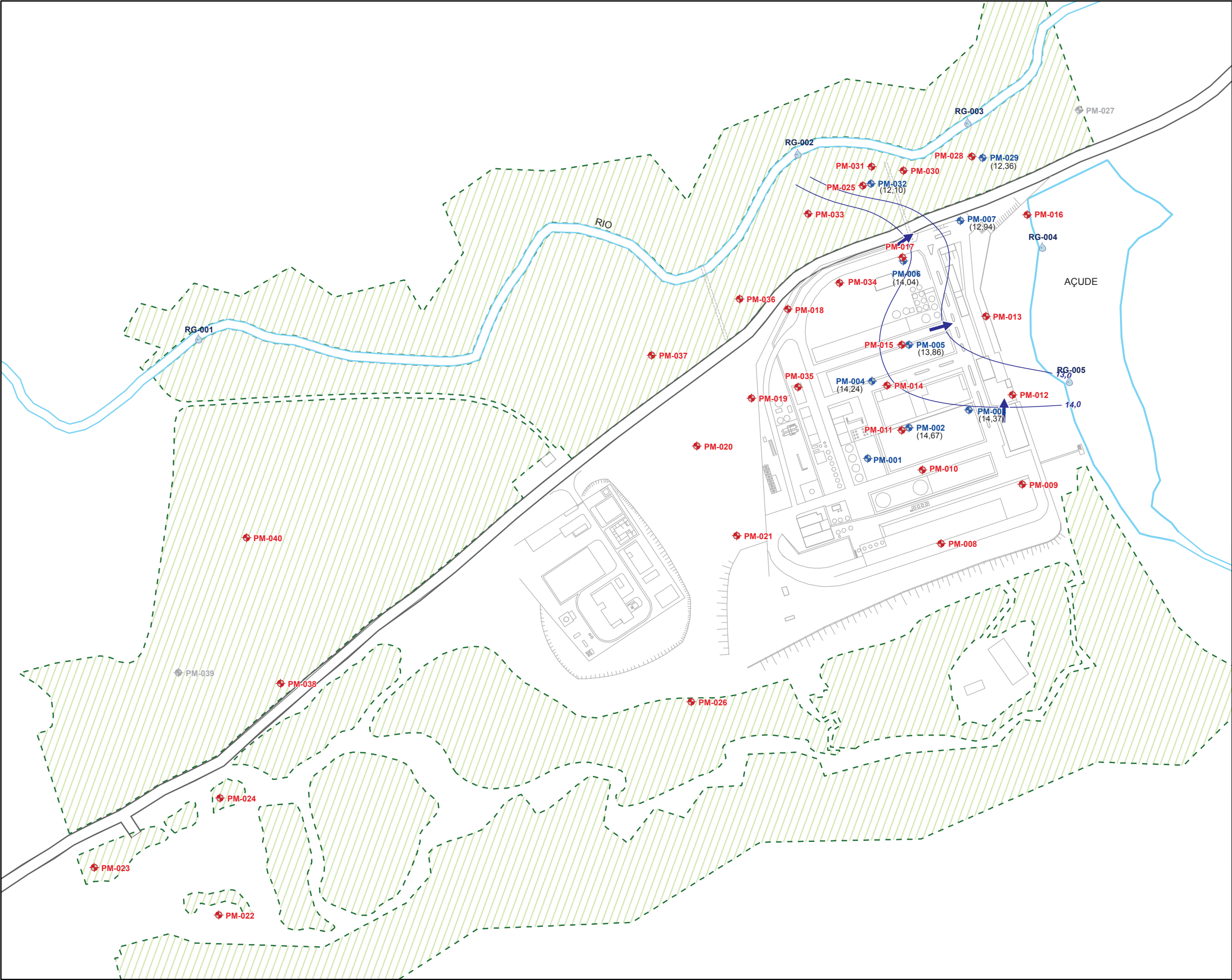
- Legenda**
- Poço de Monitoramento Raso
  - Poço de Monitoramento Profundo
  - Poço Destruído
  - Régua
  - Hidrografia
  - Vegetação
  - Rodovia
  - 22,0 Linhas equipotenciais interpoladas (m)
  - 22,0 Linhas equipotenciais inferidas (m)
  - (18,82) Carga hidráulica (m)
  - Sentido do fluxo subterrâneo



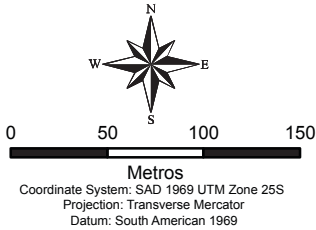
MONOGRAFIA
TF - 2012 / 30
DESENHO 04A
APÊNDICE A



DESENHO 04B - MAPA POTENCIOMÉTRICO DO AQUÍFERO PROFUNDO - FEV/12

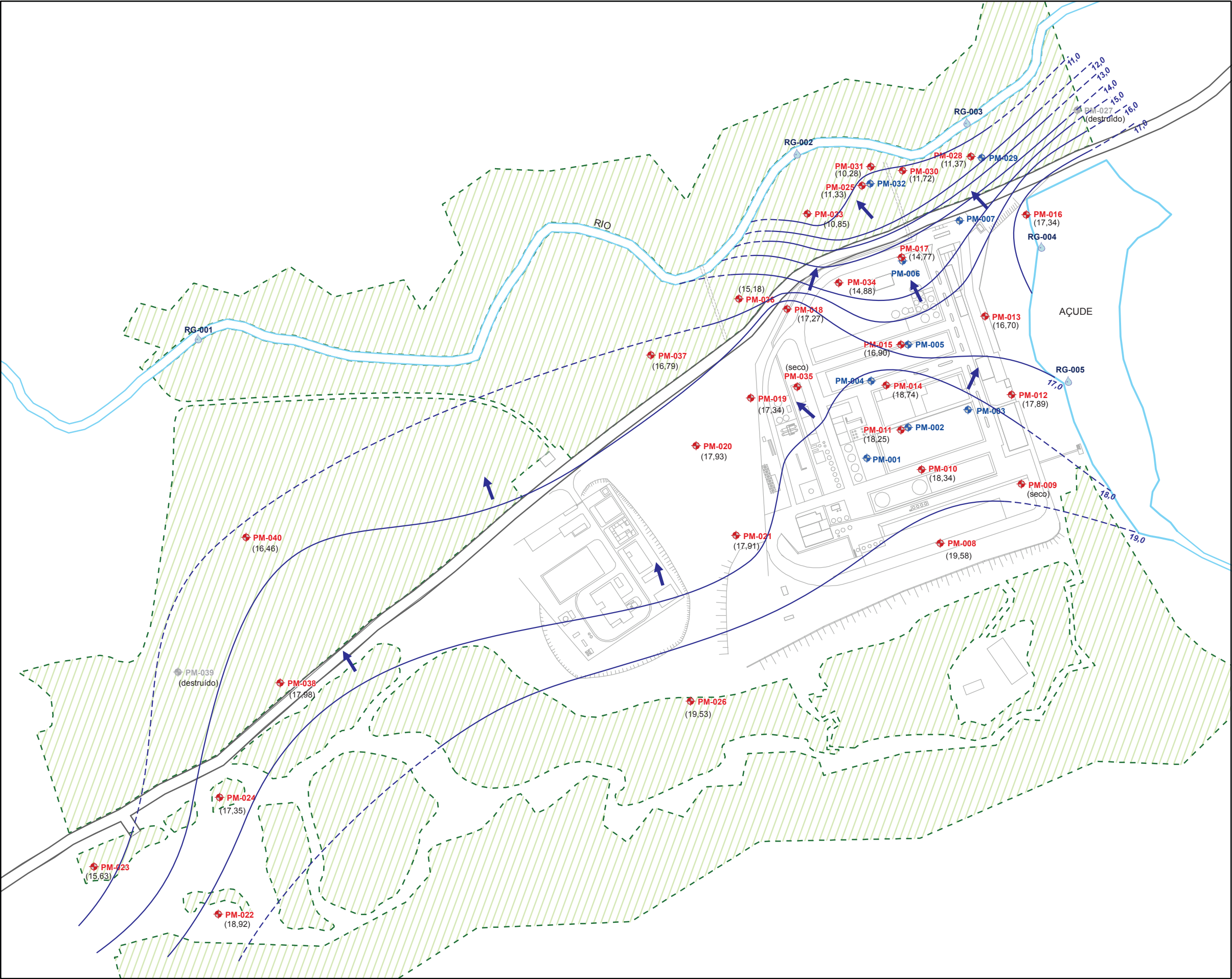


- Legenda**
- Poço de Monitoramento Raso
  - Poço de Monitoramento Profundo
  - Poço Destruído
  - Régua
  - Hidrografia
  - Vegetação
  - Rodovia
  - 22,0 Linhas equipotenciais interpoladas (m)
  - 22,0 Linhas equipotenciais inferidas (m)
  - (18,82) Carga hidráulica (m)
  - Sentido do fluxo subterrâneo

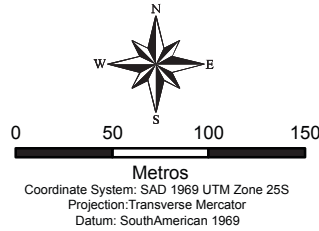


MONOGRAFIA
TF - 2012 / 30
DESENHO 04B
APÊNDICE A

DESENHO 04C - MAPA POTENCIOMÉTRICO DO AQUÍFERO RASO - AGO/12



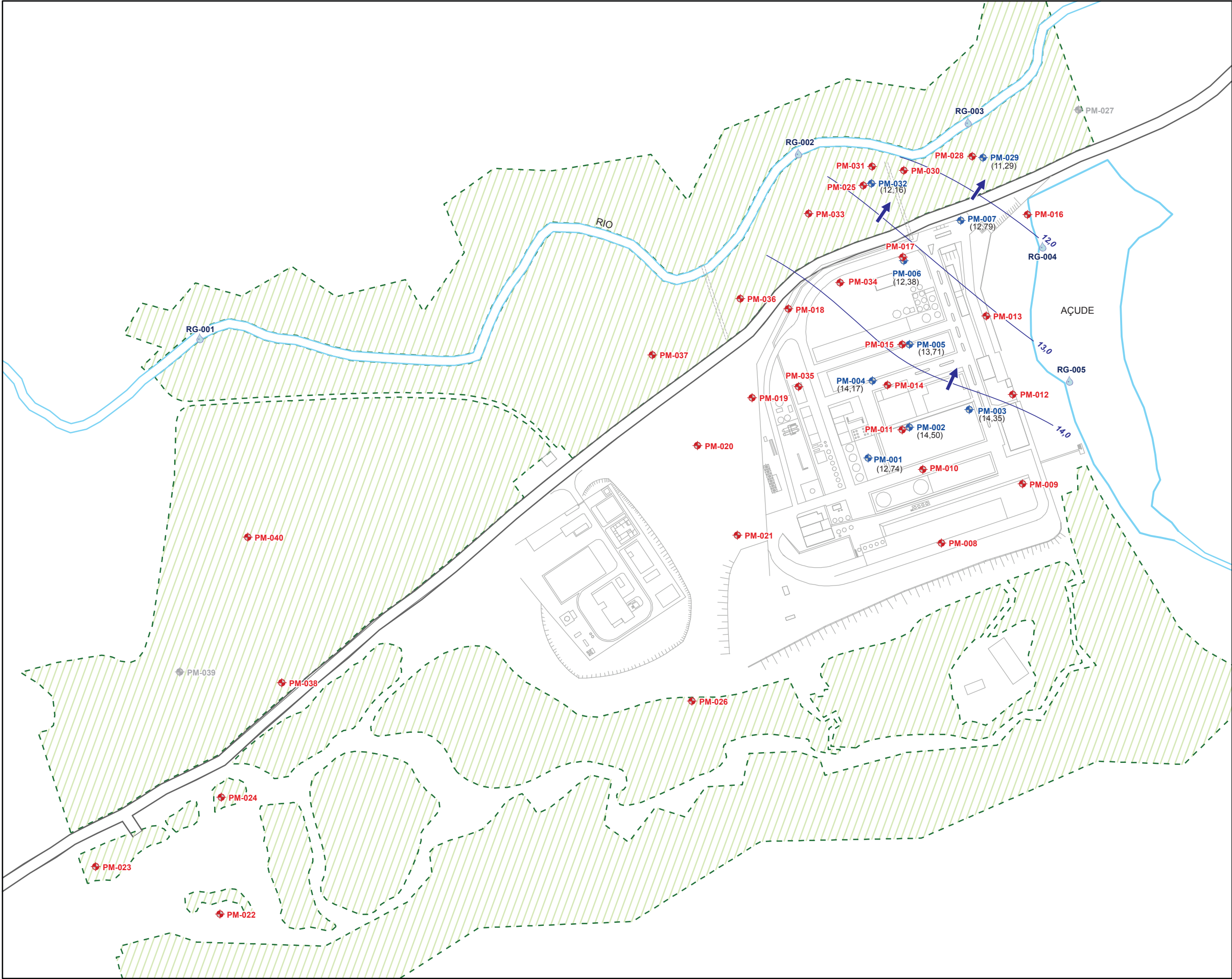
- Legenda**
- Poço de Monitoramento Raso
  - Poço de Monitoramento Profundo
  - Poço Destruido
  - Régua
  - Hidrografia
  - Vegetação
  - Rodovia
  - 18,0 Linhas equipotenciais interpoladas (m)
  - 18,0 Linhas equipotenciais inferidas (m)
  - (18,82) Carga hidráulica (m)
  - Sentido do fluxo subterrâneo



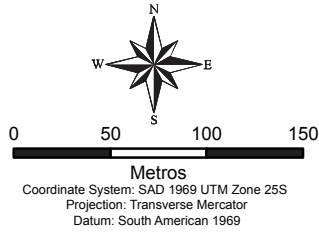
MONOGRAFIA
TF - 2012 / 30
DESENHO 04C
APÊNDICE A



DESENHO 04D - MAPA POTENCIOMÉTRICO DO AQUÍFERO PROFUNDO - AGO/12

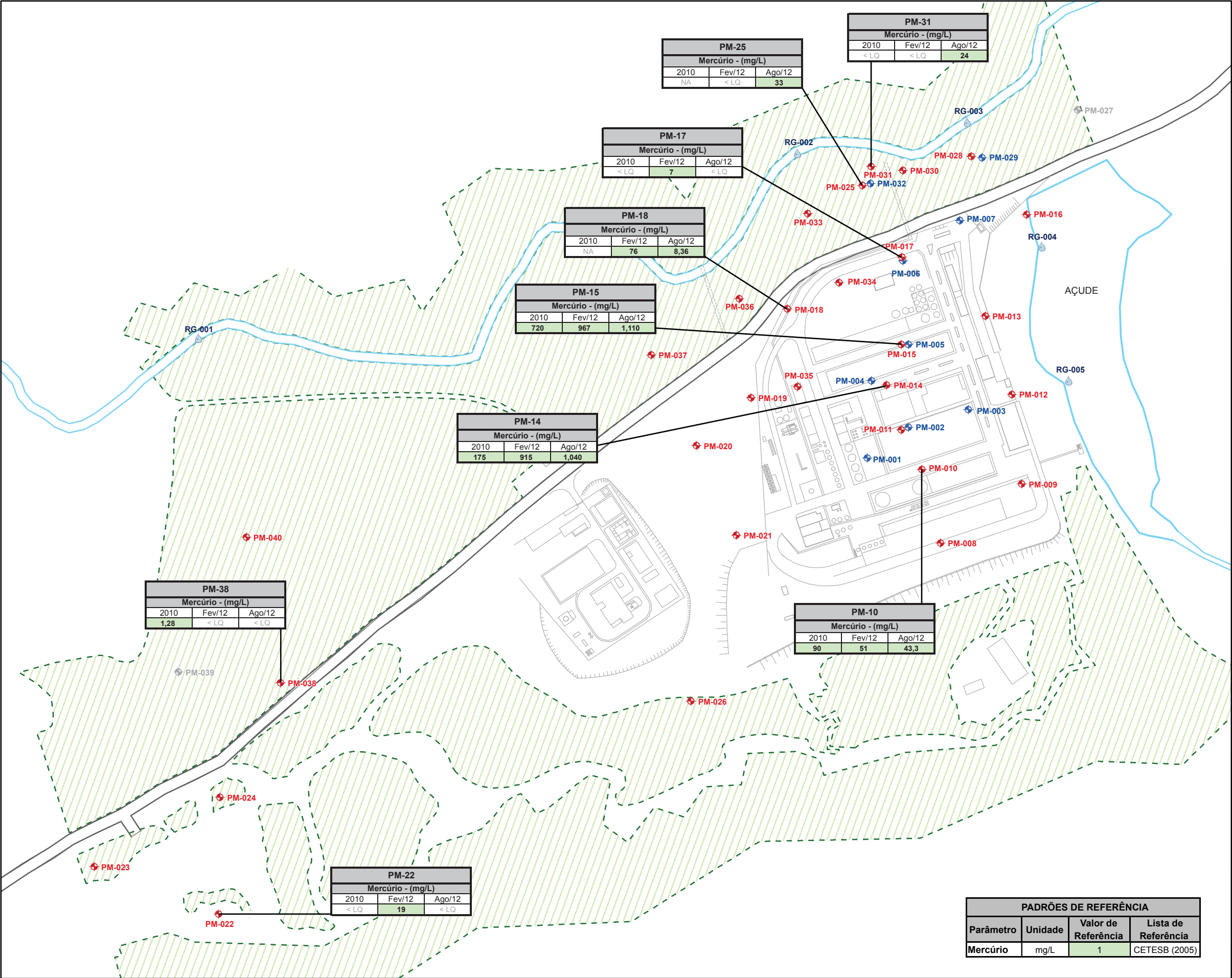


- Legenda**
- Poço de Monitoramento Raso
  - Poço de Monitoramento Profundo
  - Poço Destruído
  - Régua
  - Hidrografia
  - Vegetação
  - Rodovia
  - 22,0 Linhas equipotenciais interpoladas (m)
  - 22,0 Linhas equipotenciais inferidas (m)
  - (18,82) Carga hidráulica (m)
  - Sentido do fluxo subterrâneo

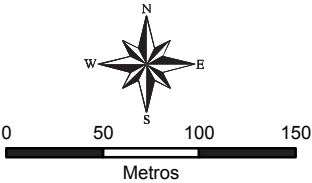


MONOGRAFIA
TF - 2012 / 30
DESENHO 04D
APÊNDICE A

DESENHO 05 - MAPA DA DISTRIBUIÇÃO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS ANALÍTICOS DE MERCÚRIO



- Legenda**
- Poço de Monitoramento Raso
  - Poço de Monitoramento Profundo
  - Poço Destruído
  - Régua
  - Hidrografia
  - Vegetação
  - Rodovia

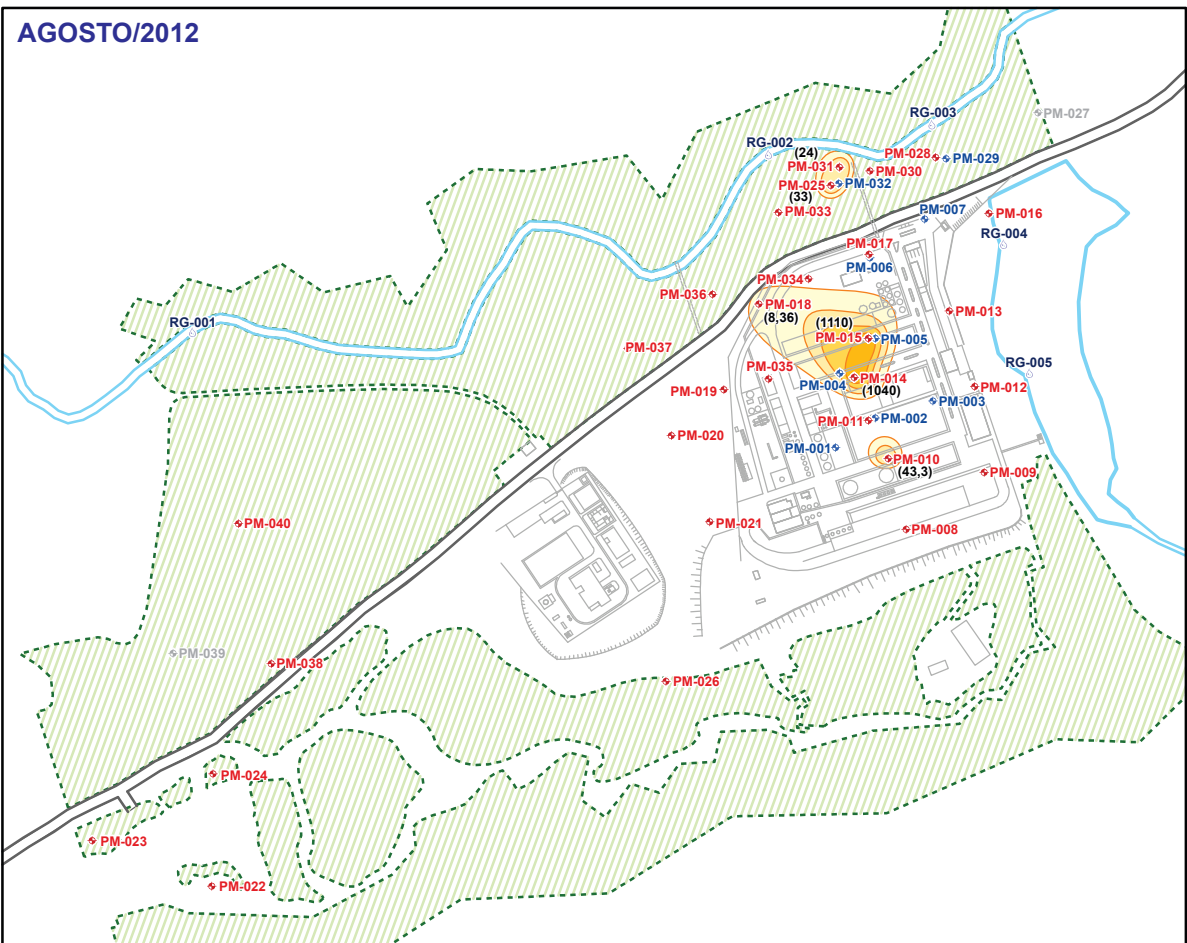
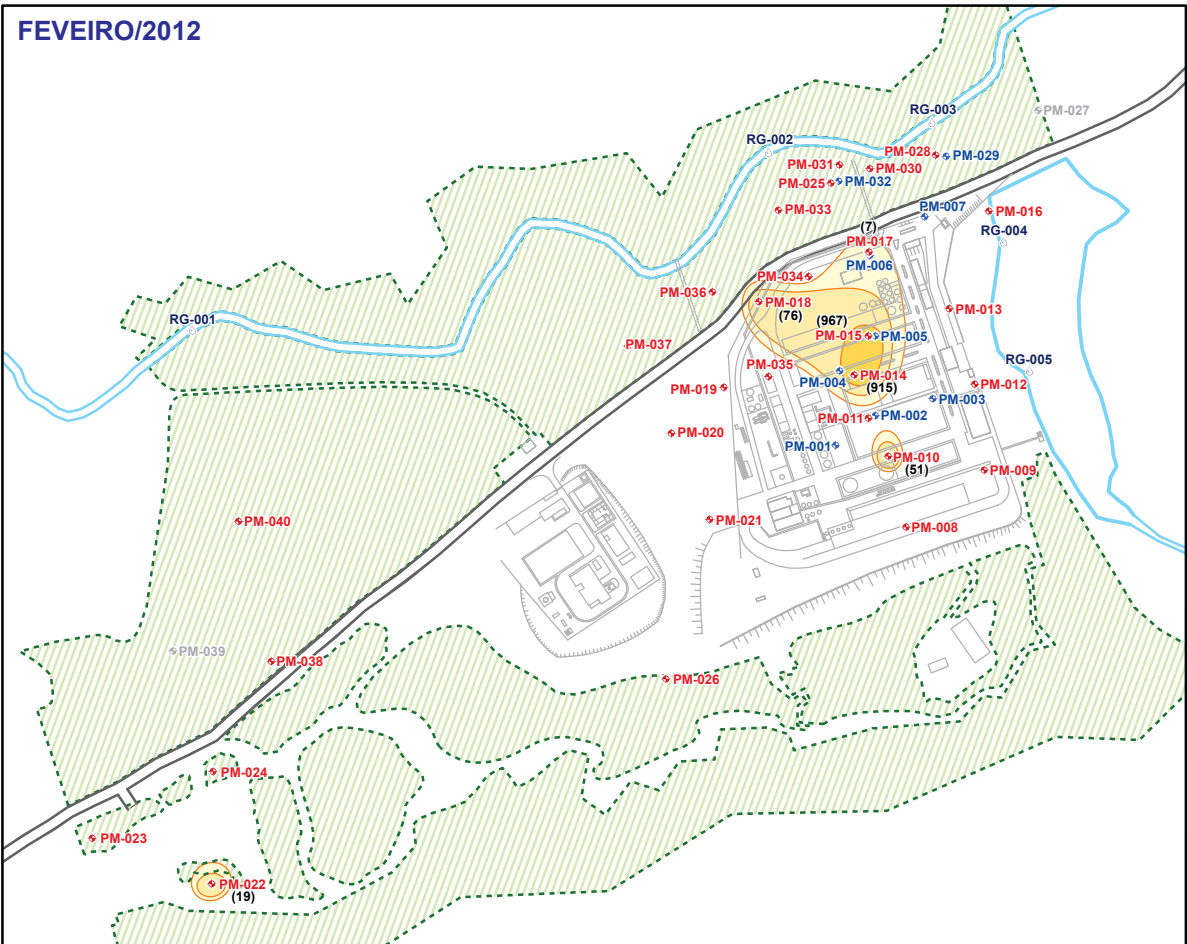
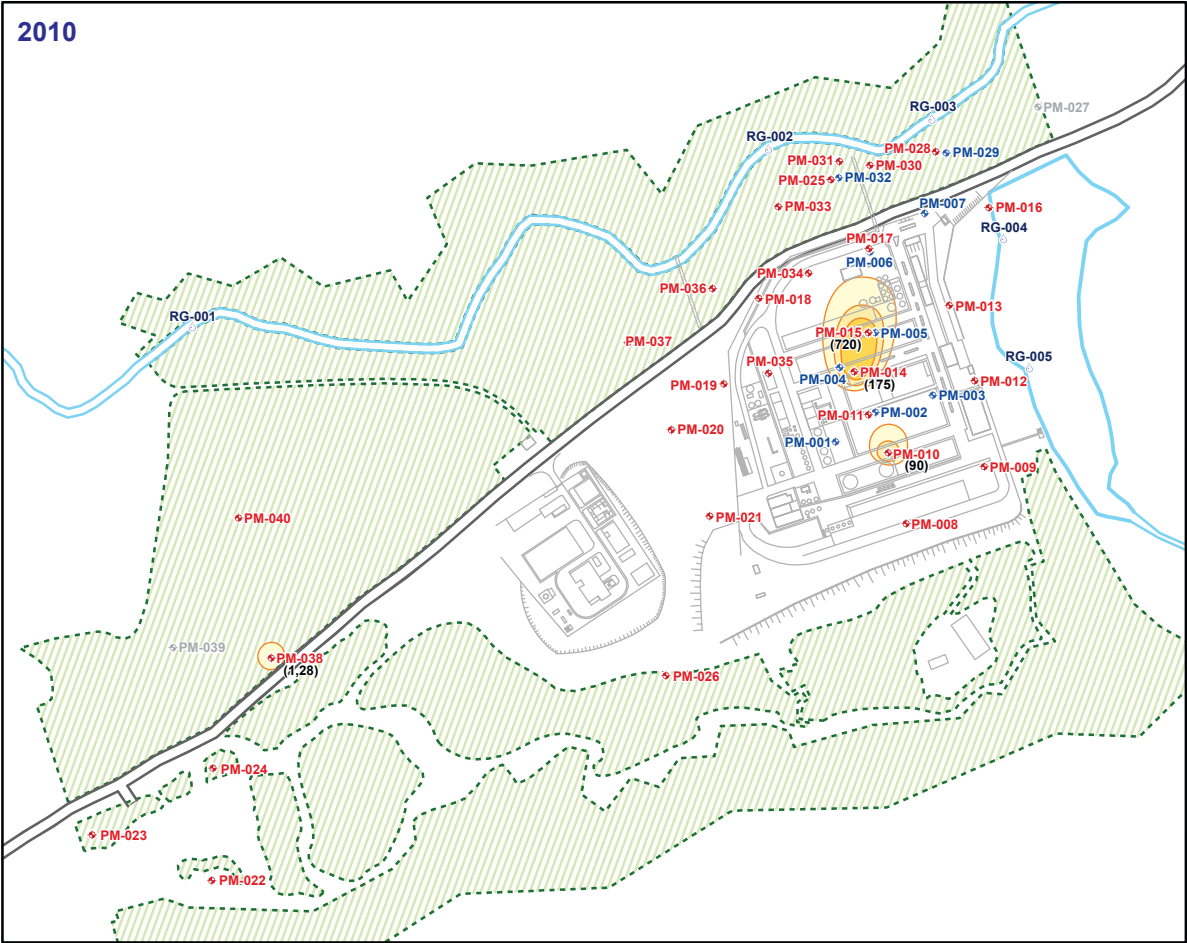


PADRÕES DE REFERÊNCIA			
Parâmetro	Unidade	Valor de Referência	Lista de Referência
Mercúrio	mg/L	1	CETESB (2005)

MONOGRAFIA
TF - 2012 / 30
DESENHO 05
APÊNDICE A



DESENHO 06 - MAPA DAS PLUMAS DE CONTAMINAÇÃO DE MERCÚRIO

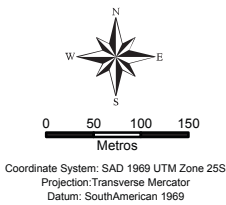


Legenda

- Poço de Monitoramento Raso
- Poço de Monitoramento Profundo
- Poço Destruído
- Régua
- Hidrografia
- Vegetação
- Rodovia

CONCENTRAÇÕES

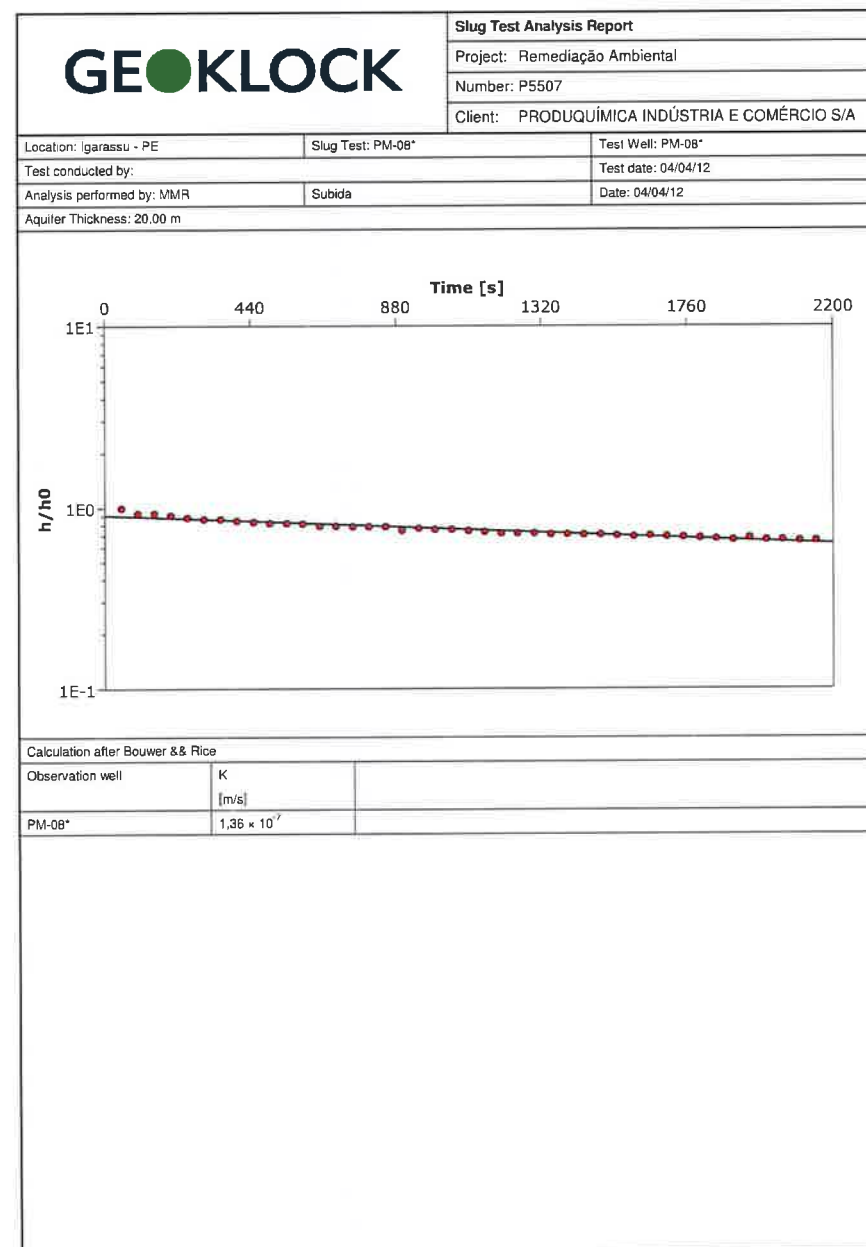
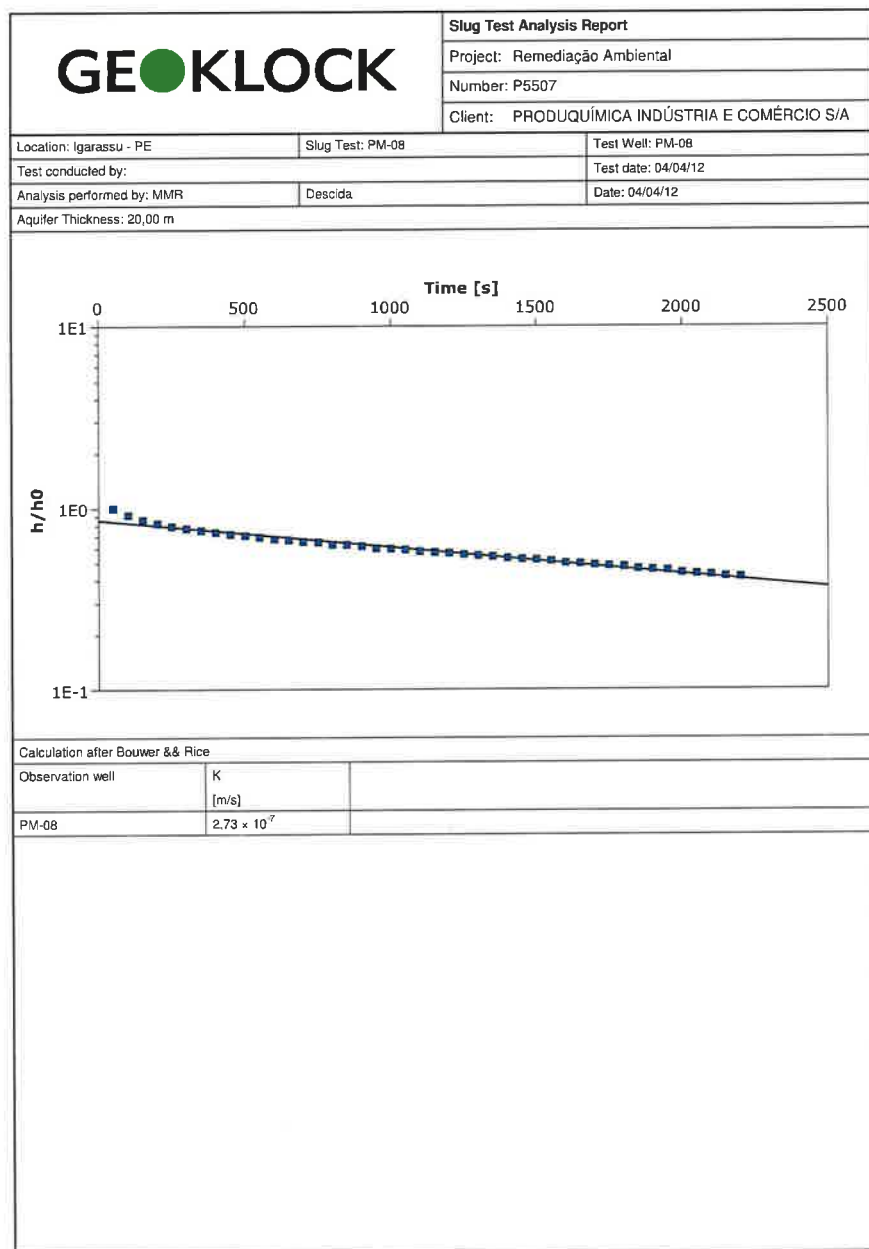
- < 1
- 1 - 10
- 10 - 100
- 1 - 10
- 10 - 100

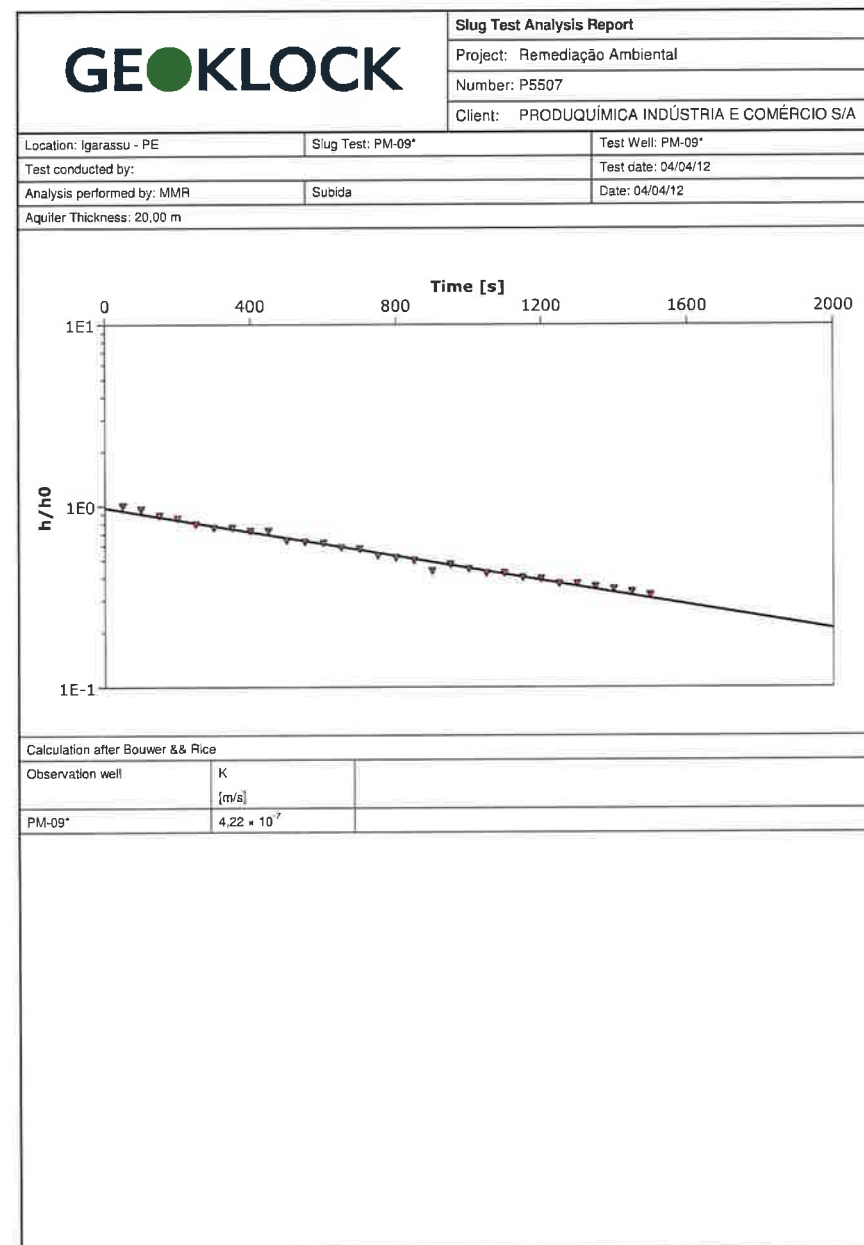
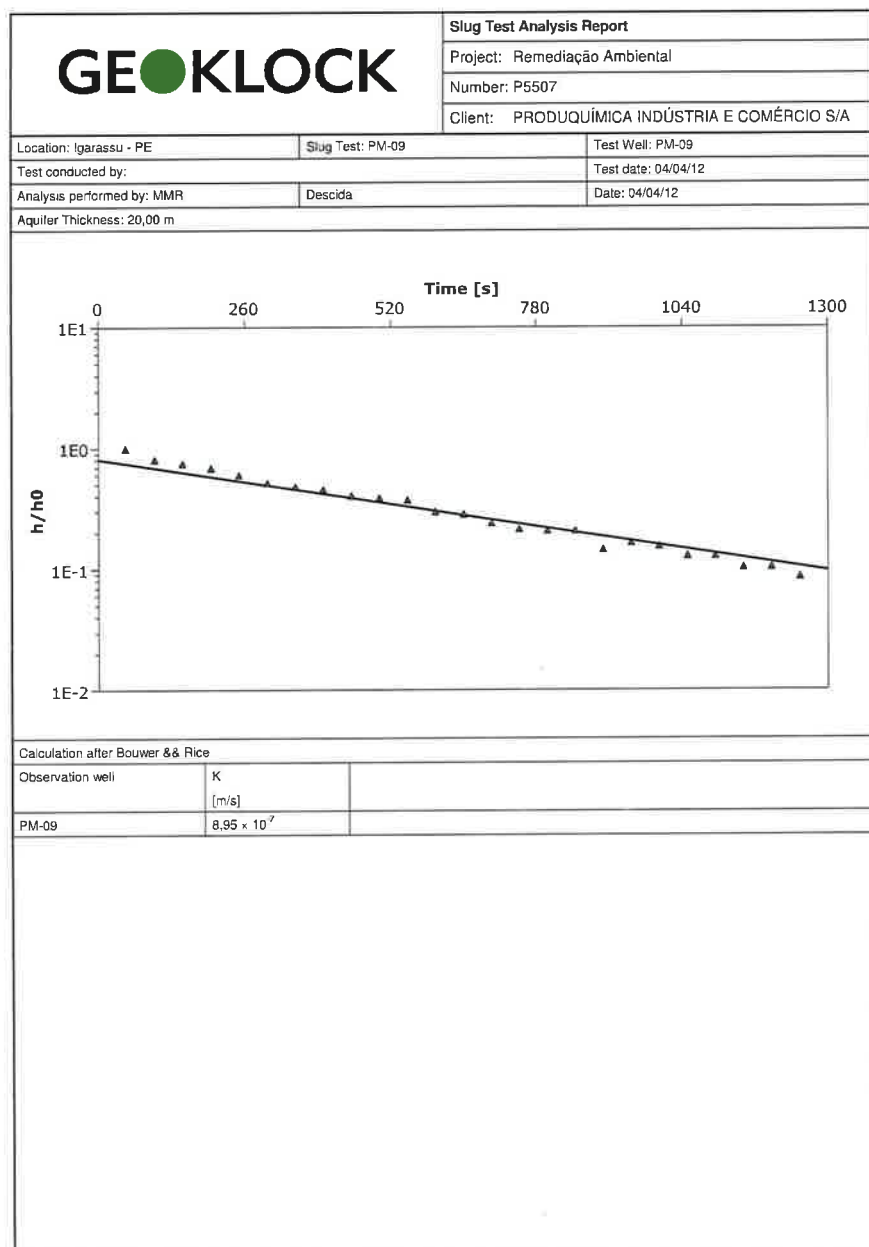


PLANILHA 01 – Medição do Nível d'Água e Cargas Hidráulicas								
Poço Monitorado	Coordenadas UTM		Cota Absoluta (m)	Prof. do Nível d'Água (m)	Carga Hidráulica (m)	Prof. do Nível d'Água (m)	Carga Hidráulica (m)	
	X	Y		Campanha - Fev/12		Campanha - Ago/12		
	POÇOS RASOS							
PM-08	9.138.170	282.011	35,473	15,67	19,803	15,89	19,583	
PM-09	9.138.288	282.097	31,540	12,77	18,770	seco	-	
PM-10	9.138.250	281.997	25,820	7,00	18,820	7,48	18,340	
PM-11	9.138.315	281.955	26,237	7,71	18,527	7,99	18,247	
PM-12	9.138.321	282.089	24,360	6,49	17,870	6,47	17,890	
PM-13	9.138.401	282.066	24,128	7,43	16,698	7,43	16,698	
PM-14	9.138.327	281.964	24,619	5,72	18,899	5,88	18,739	
PM-15	9.138.377	281.978	24,025	7,03	16,995	7,13	16,895	
PM-16	9.138.495	282.101	20,097	3,15	16,947	2,76	17,337	
PM-17	9.138.465	281.983	23,824	9,10	14,724	9,05	14,774	
PM-18	9.138.377	281.847	24,260	6,39	17,870	6,99	17,270	
PM-19	9.138.327	281.826	22,655	4,95	17,705	5,32	17,335	
PM-20	9.138.282	281.766	23,384	5,10	18,284	5,45	17,934	
PM-21	9.138.186	281.809	26,807	8,36	18,447	8,90	17,907	
PM-22	9.137.809	281.264	36,811	18,54	18,271	17,89	18,921	
PM-23	9.137.862	281.136	28,403	10,83	17,573	12,77	15,633	
PM-24	9.137.927	281.273	30,790	13,32	17,470	13,44	17,350	
PM-25	9.138.539	281.948	14,012	2,89	11,122	2,68	11,332	
PM-26	9.138.016	281.309	39,865	17,85	22,015	20,34	19,525	
PM-27	9.138.689	282.210	destruído					
PM-28	9.138.611	282.093	16,525	5,53	10,995	5,16	11,365	
PM-30	9.138.601	282.039	12,888	3,00	9,888	1,17	11,718	
PM-31	9.138.599	282.018	12,869	2,71	10,159	2,59	10,279	
PM-33	9.138.568	281.961	14,739	4,08	10,659	3,89	10,849	
PM-34	9.138.470	281.968	23,900	8,49	15,410	9,02	14,880	
PM-35	9.138.366	281.933	24,480	6,23	18,250	seco	-	
PM-36	9.138.445	281.876	18,529	5,03	13,499	3,35	15,179	
PM-37	9.138.383	281.793	21,010	4,53	16,480	4,22	16,790	
PM-38	9.138.003	281.351	27,960	9,95	18,010	9,98	17,980	
PM-39	9.138.016	281.310	destruído					
PM-40	9.138.112	281.300	16,669	0,88	15,789	0,21	16,459	
POÇOS PROFUNDOS								
PM-01	9.138.259	281.936	25,677	12,90	12,78	12,94	12,74	
PM-02	9.138.317	281.960	25,913	11,24	14,67	11,41	14,50	
PM-03	9.138.316	282.043	25,293	10,92	14,37	10,94	14,35	
PM-04	9.138.342	281.951	24,508	10,27	14,24	10,34	14,17	
PM-05	9.138.385	281.973	24,331	10,47	13,86	10,62	13,71	
PM-06	9.138.466	281.982	23,858	9,82	14,04	10,48	13,38	
PM-07	9.138.503	282.038	22,209	9,27	12,94	9,42	12,79	
PM-29	9.138.613	282.094	16,301	3,94	12,36	5,01	11,29	
PM-32	9.138.574	282.016	14,108	2,01	12,10	1,95	12,16	

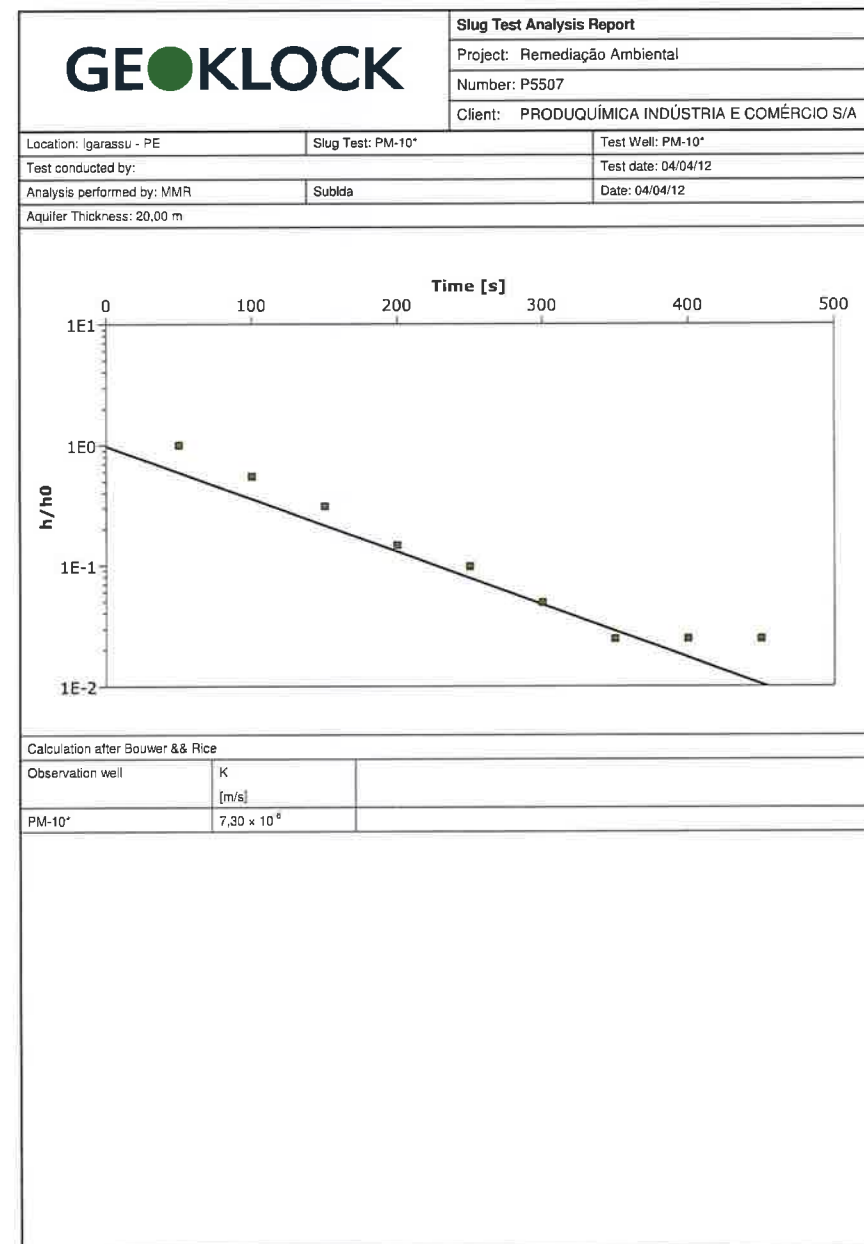
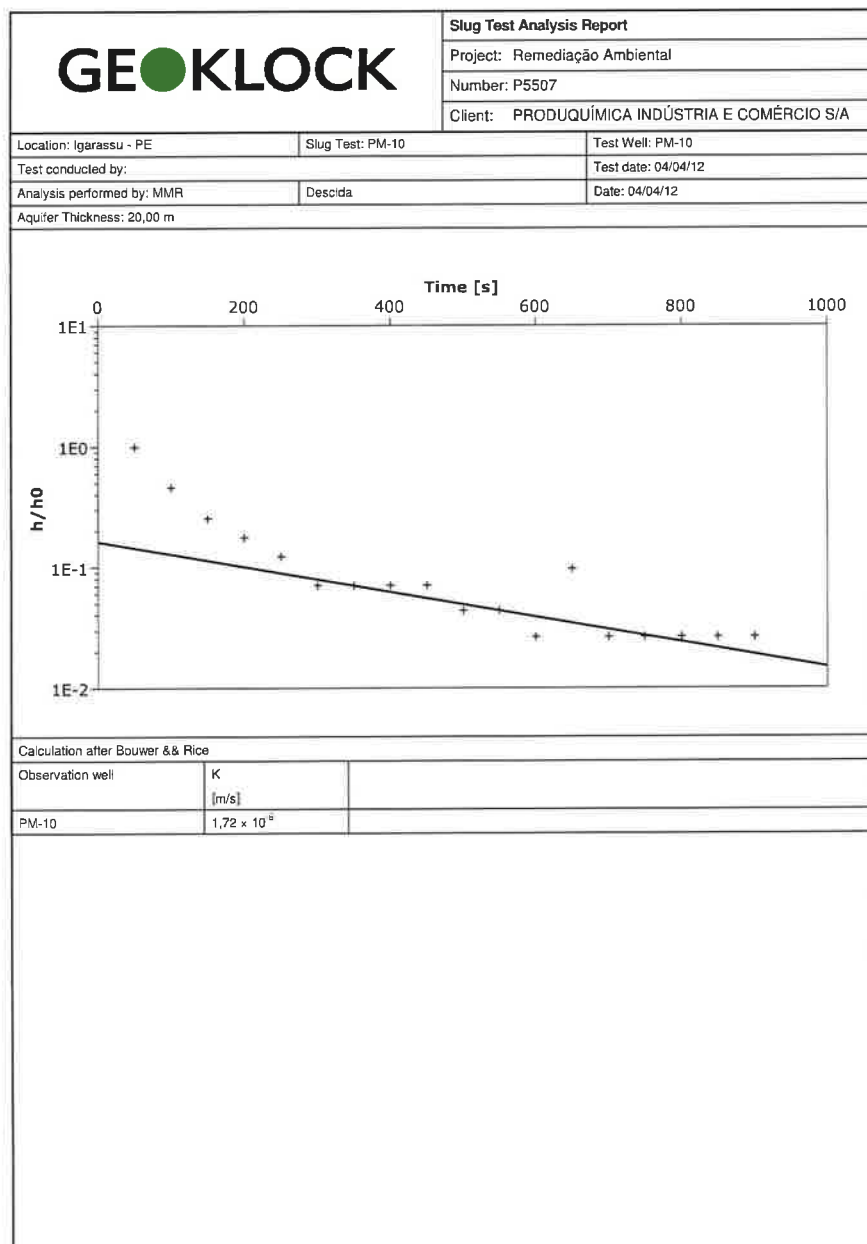
PLANILHA 02 - Dados dos Ensaios de Permeabilidade Obtidos em Campo																																													
PM-08			PM-09			PM-10			PM-11			PM-12			PM-14			PM-15			PM-17			PM-18			PM-19			PM-22			PM-34			PM-36			PM-35						
N.A. 15,67			N.A. 12,77			N.A. 7,00			N.A. 7,71			N.A. 6,49			N.A. 5,72			N.A. 7,03			N.A. 9,10			N.A. 6,39			N.A. 4,95			N.A. 18,54			N.A. 8,49			N.A. 5,03			N.A. 6,23						
Tempo	Slug Test	Bail Test	Tempo	Slug Test	Bail Test	Tempo	Slug Test	Bail Test	Tempo	Slug Test	Bail Test	Tempo	Slug Test	Bail Test	Tempo	Slug Test	Bail Test	Tempo	Slug Test	Bail Test	Tempo	Slug Test	Bail Test	Tempo	Slug Test	Bail Test	Tempo	Slug Test	Bail Test	Tempo	Slug Test	Bail Test	Tempo	Slug Test	Bail Test	Tempo	Slug Test	Bail Test	Tempo	Slug Test	Bail Test				
(s)	(m)	(m)	(s)	(m)	(m)	(s)	(m)	(m)	(s)	(m)	(m)	(s)	(m)	(m)	(s)	(m)	(m)	(s)	(m)	(m)	(s)	(m)	(m)	(s)	(m)	(m)	(s)	(m)	(m)	(s)	(m)	(m)	(s)	(m)	(m)	(s)	(m)	(m)	(s)	(m)	(m)				
50	10,85	19,65	50	9,41	15,29	50	5,87	8,22	50	6,14	9,62	25	3,33	50	10,61	50	3,95	8,57	50	5,84	8,19	50	7,82	10,52	50	4,71	9,23	50	2,49	6,98	50	13,99	23,27	50	7,12	9,82	50	2,8	7,24	50	1,97	10,75			
100	11,26	19,38	100	10,04	15,18	100	6,48	7,67	100	6,2	9,36	50	3,85	100	10,14	100	4,5	7,67	100	6,16	7,85	100	7,91	10,38	100	5	8,83	100	2,49	6,92	100	13,99	23,16	100	7,44	9,42	100	3,06	6,83	100	2,11	10,58			
150	11,52	19,38	150	10,25	15	150	6,71	7,38	150	6,26	9,19	75	4,14	150	9,82	150	4,88	7,14	150	6,33	7,64	150	7,97	10,32	150	5,26	8,51	150	2,52	6,9	150	14,1	23,18	150	7,62	9,21	150	3,29	6,57	150	2,26	10,43			
200	11,69	19,3	200	10,45	14,92	200	6,8	7,18	200	6,28	9,04	100	4,29	200	9,56	200	5,05	6,8	200	6,48	7,53	200	8	10,29	200	5,46	8,28	200	2,52	6,9	200	14,16	23,1	200	7,79	9,07	200	3,44	6,37	200	2,2	10,31			
250	11,84	19,18	250	10,74	14,77	250	6,86	7,12	250	6,34	8,93	125	4,37	250	9,36	250	5,19	6,62	250	6,56	7,47	250	8,03	10,23	250	5,58	8,04	250	2,52	6,9	250	14,22	23,1	250	7,88	9,04	250	3,61	6,19	250	2,26	10,17			
300	11,95	19,12	300	11,03	14,68	300	6,92	7,06	300	6,4	8,81	150	4,43	300	9,19	300	5,25	6,48	300	6,62	7,38	300	8,08	10,23	300	5,69	7,87	300	2,52	6,87	300	14,25	23,04	300	7,97	8,89	300	3,76	6,05	300	2,29	10,08			
350	12,04	19,12	350	11,15	14,68	350	6,92	7,03	350	6,4	8,72	175	4,49	350	9,07	350	5,34	6,36	350	6,71	7,32	350	8,11	10,21	350	5,78	7,73	350	2,55	6,87	350	14,3	22,98	350	8,05	8,84	350	3,87	5,9	350	2,34	9,94			
400	12,13	19,04	400	11,23	14,6	400	6,92	7,03	400	6,43	8,64	200	4,55	400	8,98	400	5,4	6,27	400	6,74	7,32	400	8,14	10,15	400	5,84	7,58	400	2,55	6,87	400	14,33	22,95	400	8,08	8,78	400	3,99	5,82	400	2,4	9,85			
450	12,22	19,01	450	11,41	14,6	450	6,92	7,03	450	6,46	8,58	225	4,58	450	8,87	450	5,46	6,25	450	6,79	7,27	450	8,17	10,15	450	5,87	7,44	450	2,58	6,84	450	14,39	22,95	450	8,14	8,75	450	4,1	5,7	450	2,43	9,71			
500	12,27	18,95	500	11,47	14,39	500	6,95		500	6,52	8,52	250	4,58	500	8,78	500	5,46	6,22	500	6,82	7,24	500	8,2	10,12	500	6,01	7,32	500	2,58	6,87	500	14,48	22,89	500	8,17	8,69	500	4,16	5,64	500	2,52	9,68			
550	12,33	18,95	550	11,52	14,36	550	6,95		550	6,52	8,46	275	4,61	550	8,72	550	5,48	6,19	550	6,82	7,24	550	8,32	10,09	550	6,01	7,23	550	2,6	6,84	550	14,54	22,89	550	8,23	8,66	550	4,25	5,55	550	2,52	9,59			
600	12,42	18,92	600	11,76	14,34	600	6,97		600	6,55	8,41	300	4,64	600	8,63	600	5,48	6,16	600	6,85	7,21	600	8,26	10,06	600	6,01	7,12	600	2,6	6,84	600	14,56	22,89	600	8,26	8,63	600	4,34	5,53	600	2,58	9,53			
650	12,45	18,83	650	11,81	14,25	650	6,89		650	6,57	8,35	325	4,66	650	8,52	650	5,51	6,13	650	6,85	7,24	650	8,23	10,06	650	6,07	7,09	650	2,63	6,84	650	14,65	22,84	650	8,31	8,63	650	4,39	5,47	650	2,63	9,47			
700	12,51	18,83	700	11,96	14,22	700	6,97		700	6,63	8,32	350	4,66	700	8,46	700	5,54	6,13	700	6,88	7,21	700	8,26	10,03	700	6,1	7	700	2,63	6,84	700	14,77	22,81	700	8,28	8,6	700	4,45	5,41	700	2,63	9,36			
750	12,56	18,8	750	12,05	14,1	750	6,97		750	6,66	8,32	375	4,69	750	8,43	750	5,57	6,13	750	6,91	7,18	750	8,26	10,03	750	6,13	6,91	750	2,63	6,84	750	14,77	22,81	750	8,31	8,57	750	4,51	5,38	750	2,69	9,33			
800	12,62	18,8	800	12,07	14,07	800	6,97		800	6,66	8,29	400	4,69	800	8,34	800	5,57	6,1	800	6,91	7,18	800	8,34	10	800	6,13	6,88	800	2,66	6,84	800	14,83	22,78	800	8,34	8,57	800	4,57	5,32	800	2,72	9,27			
850	12,65	18,8	850	12,07	14,02	850	6,97		850	6,69	8,26	425	4,72	850	8,32	850	5,57	6,1	850	6,91	7,18	850	8,34	9,97	850	6,16	6,8	850	2,66	6,84	850	14,88	22,72	850	8,34	8,55	850	4,6	5,29	850	2,78	9,3			
900	12,71	18,66	900	12,28	13,87	900	6,97		900	6,72	8,2	450	4,75	900	8,2	900	5,6	6,1	900	6,91	7,18	900	8,37	9,97	900	6,19	6,77	900	2,66	6,81	900	14,94	22,69	900	8,37	8,57	900	4,66	5,24	900	2,78	9,15			
950	12,77	18,72	950	12,22	13,96				950	6,75	8,2	475	4,75	950	8,17	950	5,6	6,07	950	6,94	7,18	950	8,37	9,94	950	6,22	6,74	950	2,69	6,81	950	15,07	22,69	950	8,37	8,55	950	4,66	5,24	950	2,84	9,04			
1000	12,8	18,69	1000	12,25	13,9				1000	6,78	8,17	500	4,75	1000	8,14	1000	5,63	6,07	1000	6,91	7,15	1000	8,4	9,94	1000	6,25	6,71	1000	2,72	6,84	1000	15,03	22,66	1000	8,4	8,55	1000	4,68	5,21	1000	2,87	9,04			
1050	12,82	18,69	1050	12,34	13,84				1050	6,81	8,17	525	4,75	1050	8,11	1050	5,63	6,07	1050	6,94	7,18	1050	8,4	9,92	1050	6,22	6,71	1050	2,72	6,84	1050	15,09	22,63	1050	8,4	8,55	1050	4,71	5,21	1050	2,87	8,95			
1100	12,88	18,63	1100	12,34	13,84				1100	6,81	8,12	550	4,78	1100	8,03	1100	5,63	6,04	1100	6,94	7,18	1100	8,46	9,92	1100	6,22	6,68	1100	2,72	6,84	1100	15,12	22,63	1100	8,4	8,52	1100	4,74	5,18	1100	2,9	8,92			
1150	12,91	18,6	1150	12,42	13,78				1150	6,81	8,12	575	4,81	1150	8	1150	5,63	6,04	1150	6,94	7,18	1150	8,46	9,89	1150	6,25	6,65	1150	2,75	6,81	1150	15,2	22,6	1150	8,4	8,52	1150	4,8	5,18	1150	2,92	8,89			
1200	12,94	18,54	1200	12,42	13,76				1200	6,84	8,09	600	4,81	1200	7,97	1200	5,6	6,04	1200	6,94	7,15	1200	8,49	9,89	1200	6,22	6,62	1200	2,75	6,78	1200	15,23	22,58	1200	8,43	8,52	1200	4,8	5,18	1200	2,95	8,84			
1250	13	18,54	1250	12,48	13,7				1250	6,89	8,09	625	4,84	1250	7,94	1250	5,66	6,04	1250	6,94	7,15	1250	8,49	9,89	1250	6,25	6,62	1250	2,78	6,81	1250	15,26	22,55	1250	8,43	8,57	1250	4,83	5,18	1250	2,98	8,84			
1300	13,03	18,54	1300		13,7				1300	6,89	8,06	650	4,84	1300	7,85	1300	5,69	6,04	1300	6,94	7,15	1300	8,52	9,86	1300	6,3	6,59	1300	2,78	6,81	1300	15,12	22,49	1300	8,43	8,52	1300	4,83	5,15	1300	2,98	8,72			
1350	13,06	18,51	1350		13,67				1350	6,89	8,06	675	4,87	1350	7,82	1350	5,66	6,04	1350	6,94	7,15	1350	8,55	9,83	1350	6,27	6,59	1350	2,81	6,78	1350	15,35	22,55	1350	8,43										

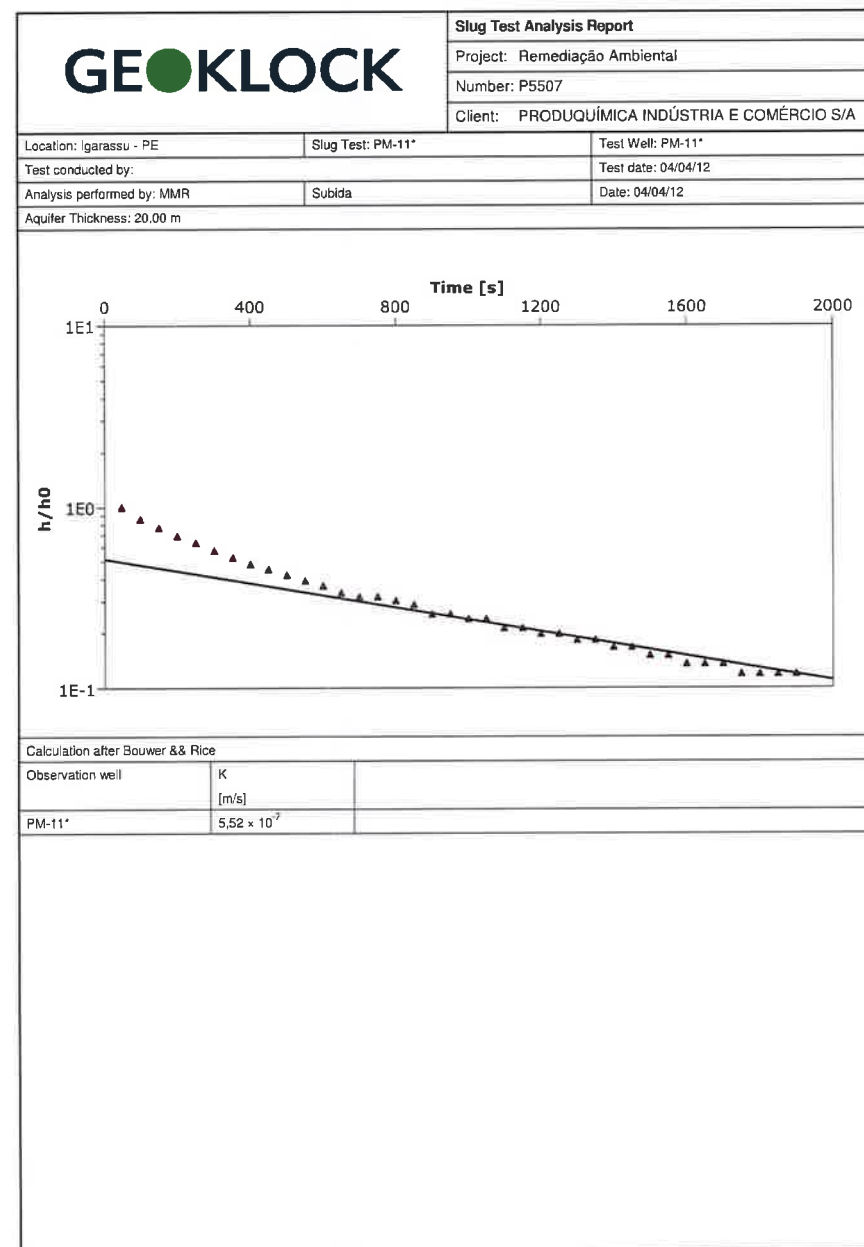
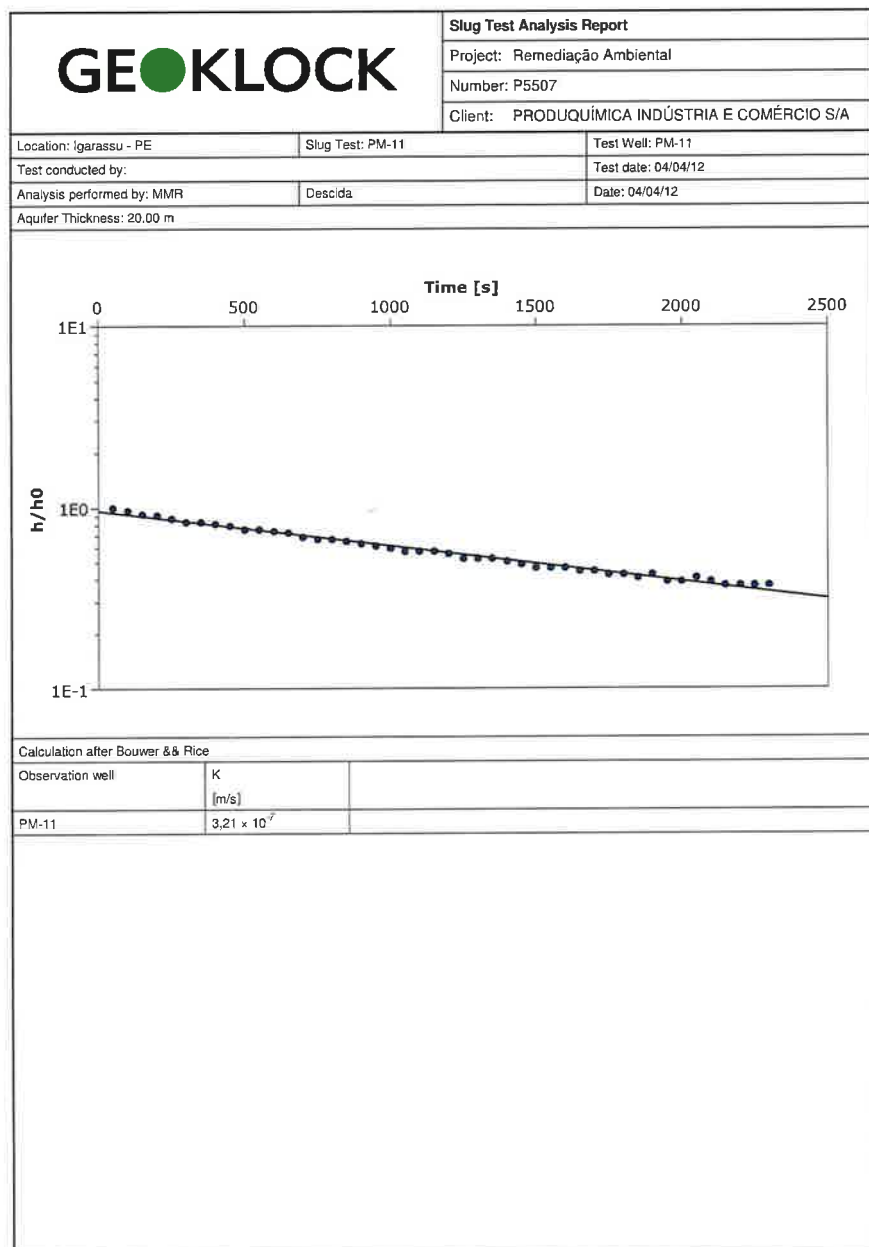
PLANILHA 03 - Características Físico-Químicas das Amostras de Subterrâneas e Superficiais															
Poço	Condutividade Elétrica (µS/cm)			ORP (mV)			O.D. (mg/L)			pH			Temperatura (° C)		
	Campanha														
	2010	Fev/12	Ago/12	2010	Fev/12	Ago/12	2010	Fev/12	Ago/12	2010	Fev/12	Ago/12	2010	Fev/12	Ago/12
Poços Rasos															
PM-008	288	373	seco	227,1	-94	seco	7,36	2,79	seco	6,90	6,21	seco	28,90	28,40	seco
PM-009	1446	602	seco	187,9	-5,7	seco	7,60	3,09	seco	6,46	5,68	seco	29,60	26,94	seco
PM-010	10040	24,69	1337	151,7	41,5	-23,2	5,08	0,00	0,53	6,30	6,77	6,98	28,60	29,91	29,87
PM-011	609	551	622	198,5	17,5	-50,5	2,35	2,16	0,00	6,48	5,78	6,36	28,50	28,23	28,58
PM-012	56,6	58	291	185,4	46,3	-92,4	4,27	0,00	0,09	5,85	4,41	5,01	28,70	27,17	27,38
PM-013	830	479	400	21,7	120,3	-103,6	3,68	0,00	0,21	6,55	5,79	6,15	30,90	28,09	27,63
PM-014	110200	175300	1271	-503	-468,5	-140,8	0,17	0,00	0,00	12,22	12,70	13,12	33,30	31,18	32,37
PM-015	22200	31870	1341	-448	-507,5	-386,6	0,04	0,00	0,00	12,07	12,50	12,66	30,50	28,76	29,16
PM-016	288	76	67	226,2	-152,4	-99,1	1,99	0,00	0,55	6,52	5,67	5,58	28,10	27,92	27,38
PM-017	8280	6104	1312	584,6	220,5	-63,5	1,35	1,45	0,30	3,33	3,21	4,23	31,10	29,82	30,20
PM-018	84300	62130	1334	241,1	32,6	-85,9	0,67	0,00	0,51	6,33	9,01	10,20	30,30	29,54	30,04
PM-019	19630	41800	1428	191,5	-217,4	-172,8	3,91	0,52	1,31	6,62	7,18	7,04	29,80	29,17	29,12
PM-020	49000	78450	1362	-52,6	-32,3	-68,9	3,46	0,00	2,21	7,95	6,90	8,27	30,50	29,09	28,61
PM-021	2079	1146	1314	195,5	8,9	-67,9	3,92	2,22	3,50	6,49	5,51	5,82	30,60	27,74	27,98
PM-022	502	5594	1949	-30,4	147,8	-22,2	4,20	0,00	2,47	4,28	3,87	5,75	28,20	27,65	27,31
PM-023	687	247	seco	40,7	-122,2	seco	3,12	0,00	seco	5,87	3,64	seco	29,70	26,61	seco
PM-024	1526	1057	seco	260,2	185,9	seco	3,73	0,82	seco	5,54	3,53	seco	28,70	27,51	seco
PM-025	7750	6281	1371	485,5	188,8	34,6	1,95	1,45	3,66	3,68	3,49	3,75	27,60	27,81	27,56
PM-026	65,3	412,7	65	185,2	-58,6	-89,7	5,14	1,02	1,22	5,86	6,04	6,19	29,30	29,75	26,66
PM-027	Destruído														
PM-028	723	483	946	153,4	30,6	-55,4	1,57	0,00	3,40	6,49	5,60	6,44	27,60	27,13	27,34
PM-030	1005	1278	2380	-69,3	180,7	-36,7	0,49	0,00	2,73	6,23	4,97	5,51	27,10	27,14	27,07
PM-031	3000	3583	4358	419,1	197,5	5,5	3,31	2,69	3,98	4,09	3,63	4,02	27,50	27,43	28,07
PM-033	17420	14570	23520	395,4	172,7	40,7	1,02	0,00	1,23	4,27	3,56	3,79	27,30	27,24	27,26
PM-034	15510	42310	1349	248,7	-51,7	-39,4	0,29	0,00	3,25	6,30	7,21	8,22	30,80	29,31	29,40
PM-035	26100	32410	seco	41	-157,4	seco	0,92	1,20	seco	8,72	6,67	seco	30,70	30,06	seco
PM-036	1169	22,9	1392	246	69	-34	4,00	0,00	0,43	6,19	5,94	6,41	27,70	27,76	27,36
PM-037	13980	46000	1372	208,5	116,7	-25,4	4,55	0,52	1,12	6,58	6,09	6,27	27,60	27,69	27,91
PM-038	912	531	372	-7,5	206,3	-36	3,17	1,20	1,21	4,13	3,49	5,66	28,10	28,18	27,00
PM-039	Destruído														
PM-040	672	427	425	232,7	17,5	-16,4	4,96	0,32	0,27	5,31	4,30	4,28	28,40	28,47	27,17
Poços Profundos															
PM-001	452	277,6	1339	-153	-248,1	-120,3	4,55	0,00	1,90	11,59	12,45	13,01	30,40	29,53	29,81
PM-002	607	481	521	251,8	-33,1	-78,4	5,61	2,07	4,18	6,61	5,64	6,01	28,00	29,19	27,87
PM-003	506	169	358	173,9	-37,8	-59,1	4,15	0,62	4,91	6,69	5,23	5,38	28,40	27,82	27,61
PM-004	1956	1179	1033	107,7	-75,5	-97,7	3,82	0,35	2,72	8,98	7,00	7,37	29,40	29,94	30,12
PM-005	390	197	332	244,8	140,9	-15,6	5,96	0,30	3,36	5,93	5,69	5,58	30,10	28,39	29,23
PM-006	1270	778	1024	79	128,8	-136	4,78	3,74	1,88	11,29	6,73	7,45	30,40	29,23	30,01
PM-007	645	601	656	185,6	-171,4	-96,8	6,21	1,65	3,30	7,00	5,90	6,41	28,20	30,17	28,25
PM-029	241	43	92	175,9	146	-16,8	6,94	2,80	5,67	6,32	4,67	5,29	28,50	27,13	27,24
PM-032	124	194	201	302,4	209,8	-50,9	4,62	5,81	4,70	5,41	5,05	5,74	27,40	27,25	27,19
Rio / Açude															
RG-001	178,9	894	88	178,8	-344,7	113	7,45	2,15	12,09	6,93	6,94	7,92	27,10	27,82	24,61
RG-002	213,5	5	102	218,1	-78,3	-102,5	7,60	0,42	9,77	6,95	8,45	7,73	27,80	26,44	25,34
RG-003	211,6	521	117	211,6	-2,4	-99,2	7,47	0,32	8,45	6,88	6,48	7,62	27,50	26,32	25,30
RG-004	74,2	0	49	269,1	-9,1	-104	7,08	3,83	7,05	5,62	7,51	7,31	30,00	30,67	26,57
RG-005	68,9	0	72	238	56,2	70,5	7,95	3,69	8,42	6,36	6,10	6,78	29,50	29,04	24,89

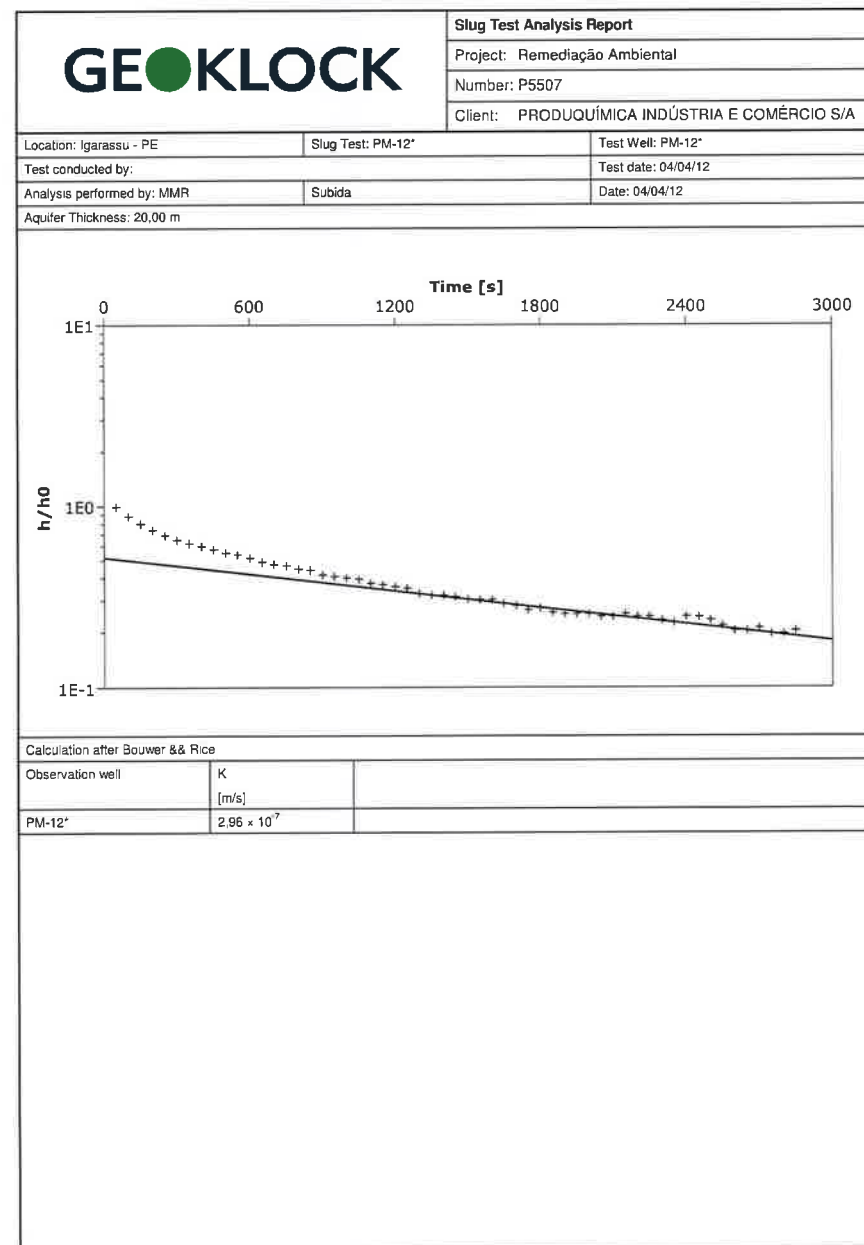
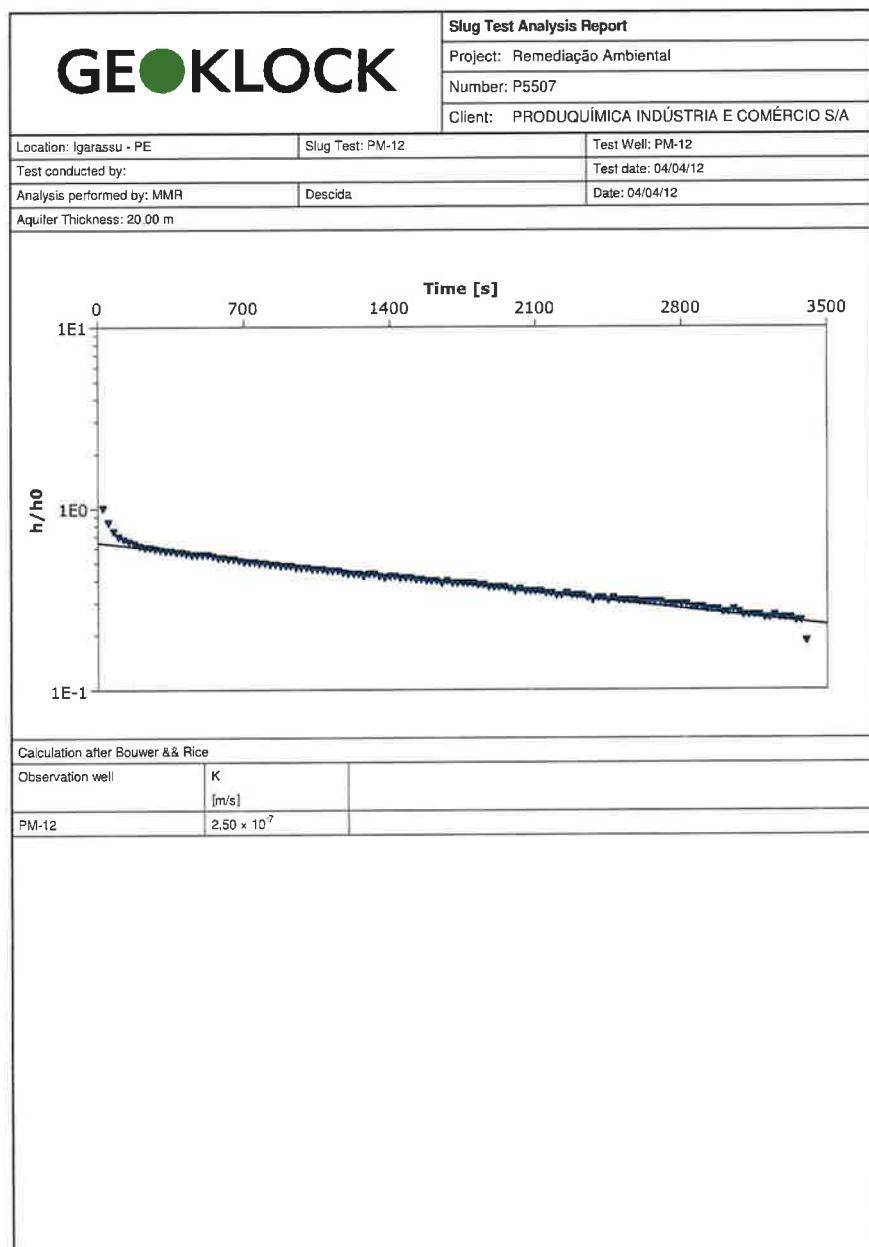


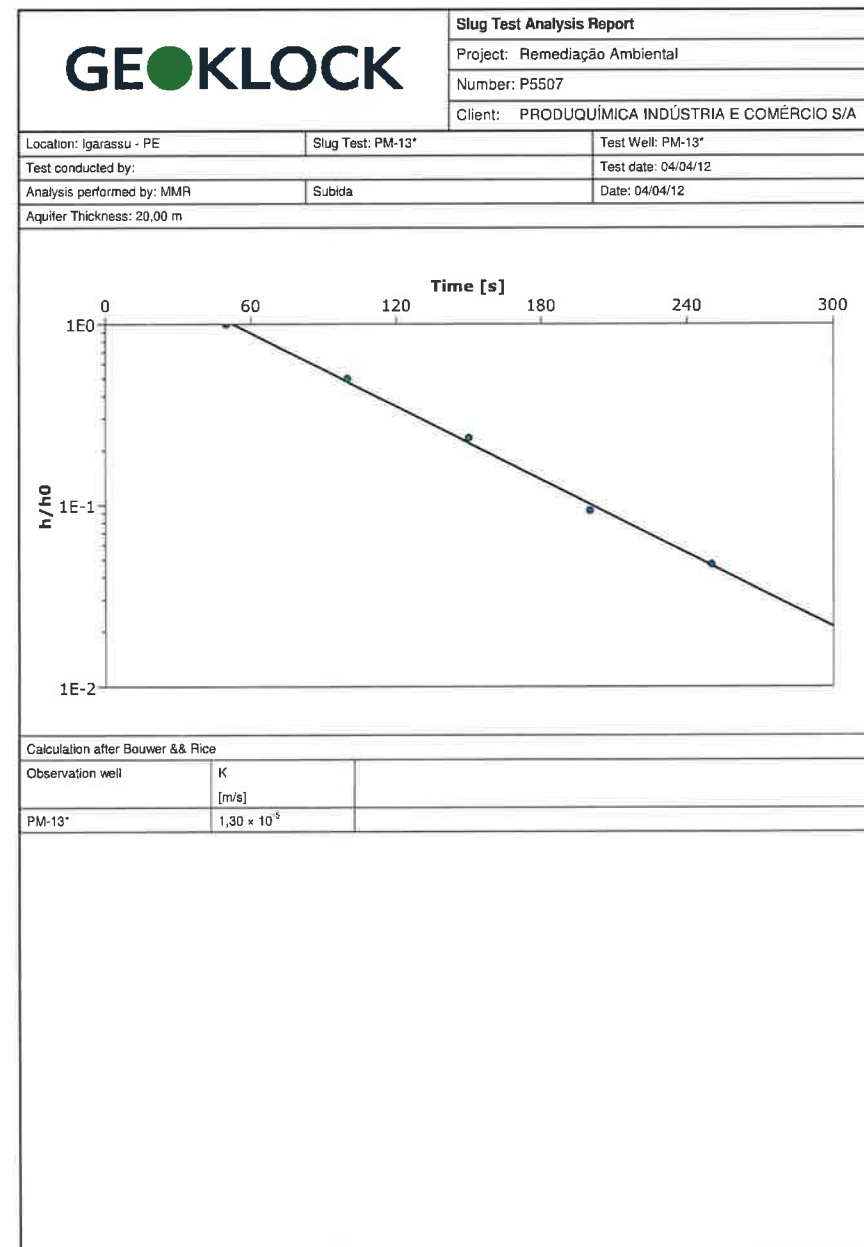
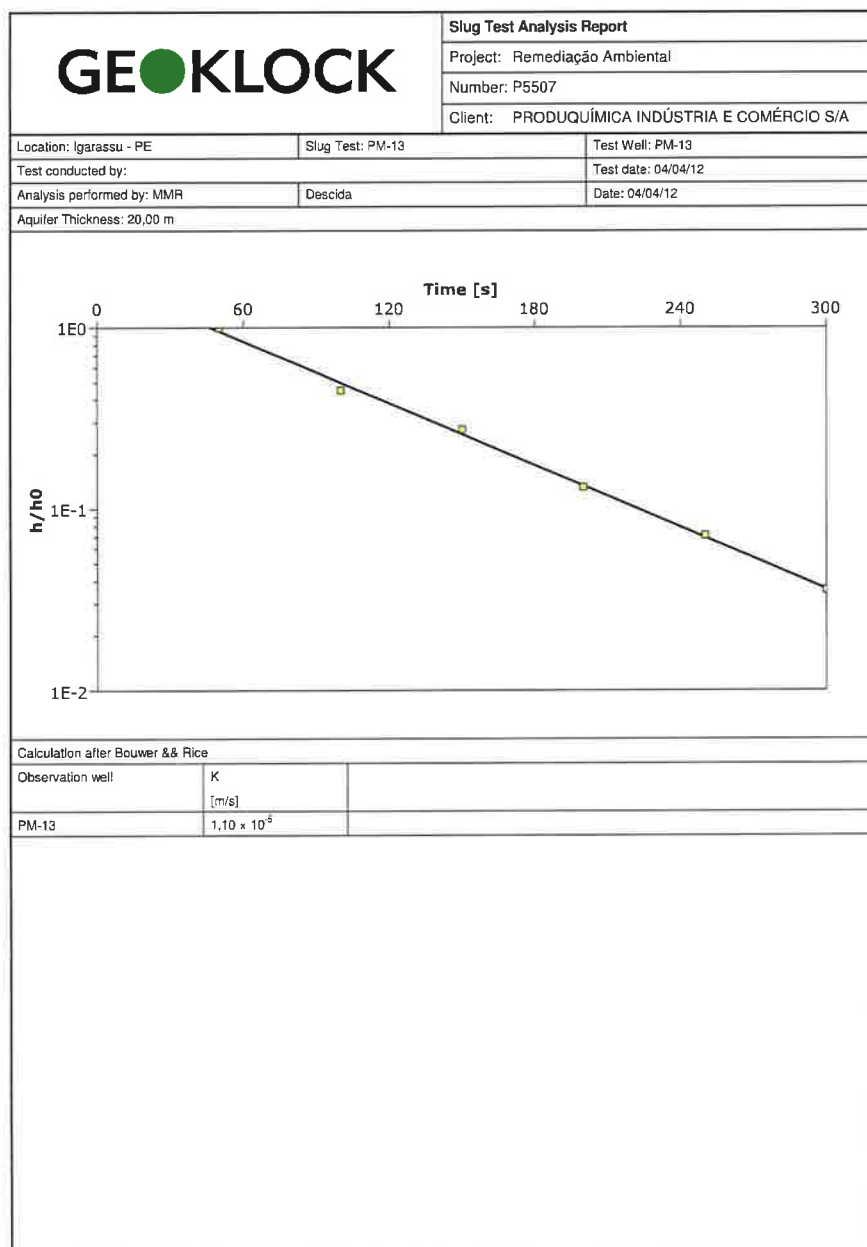


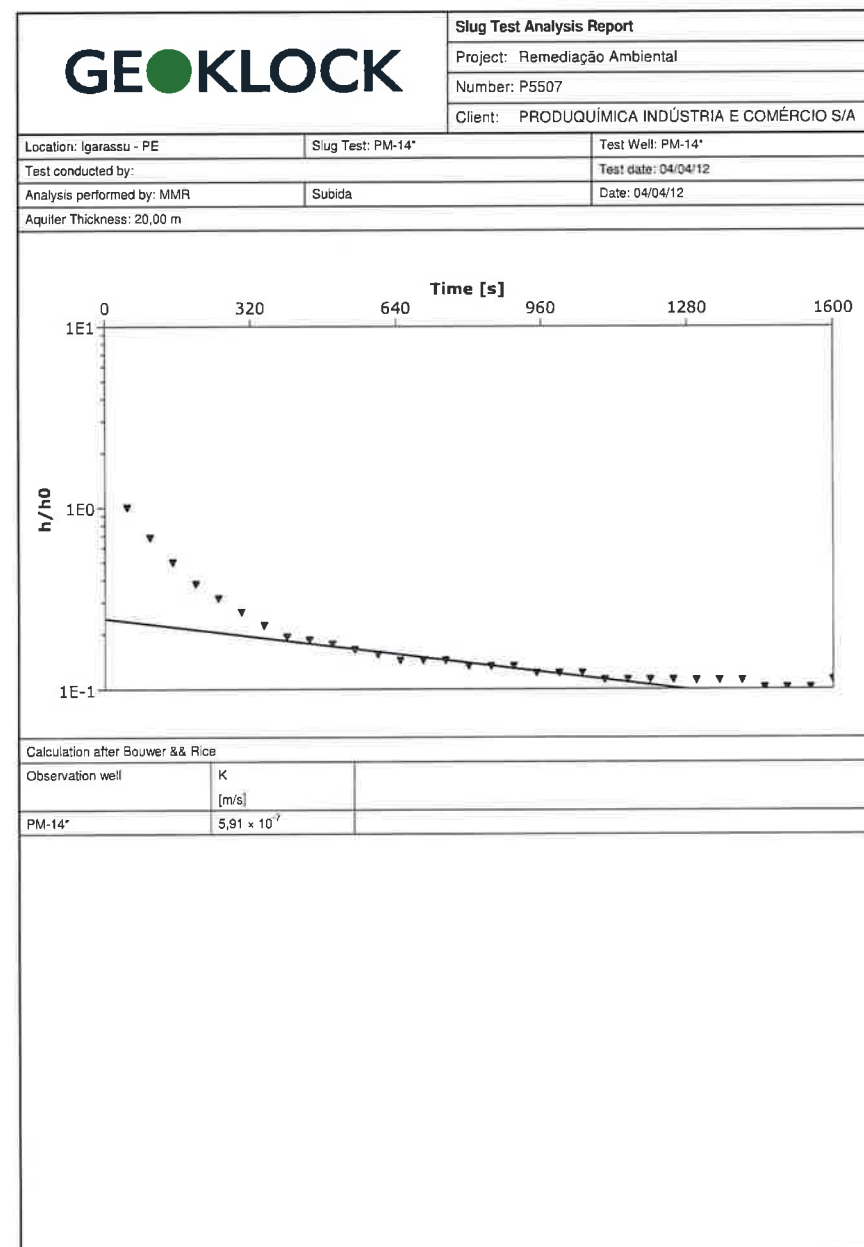
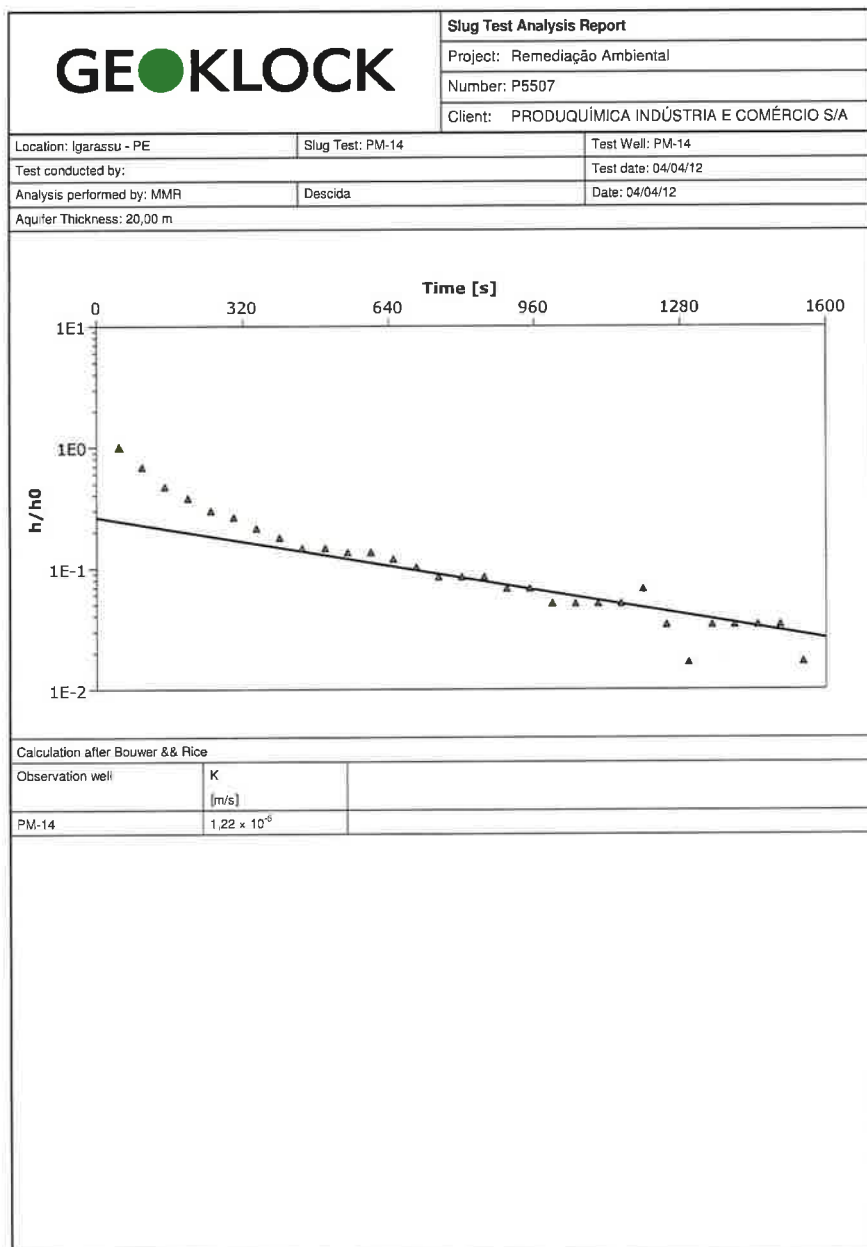


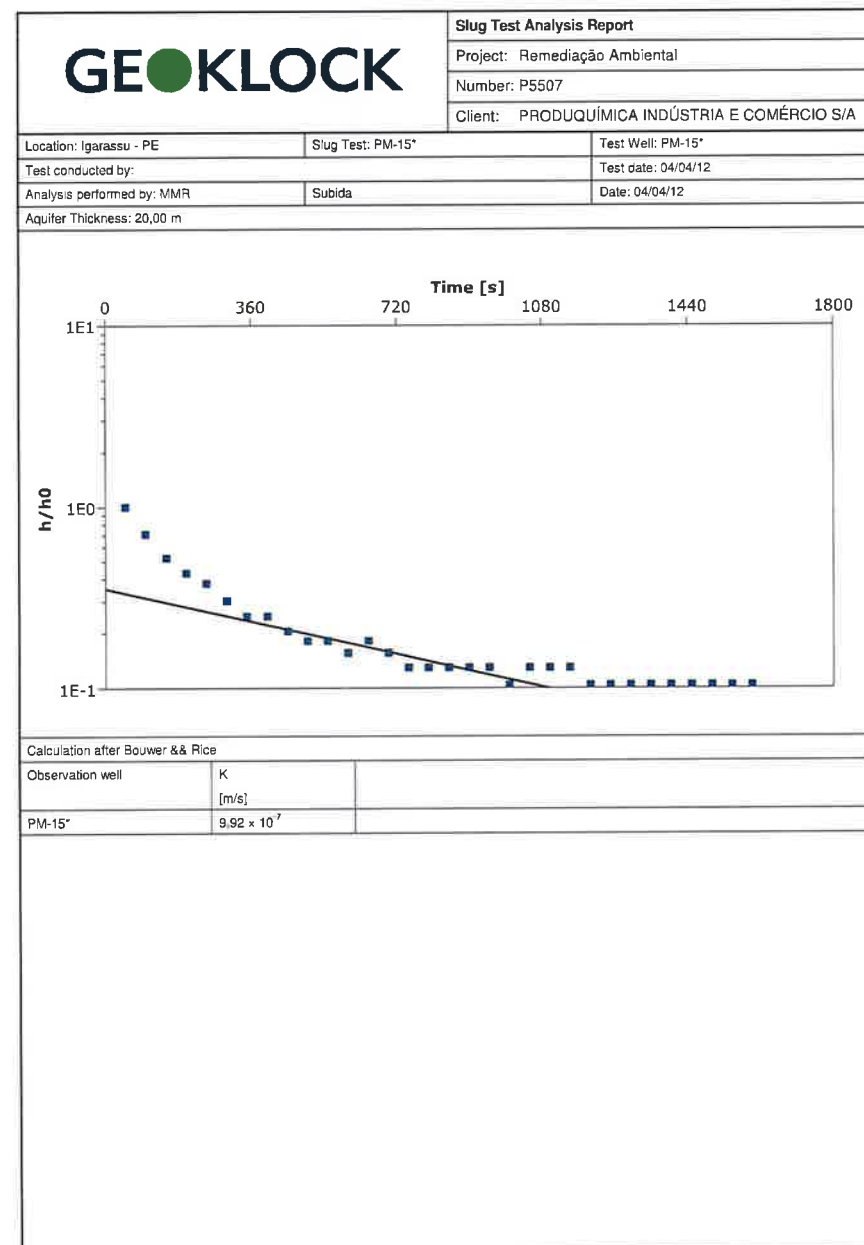
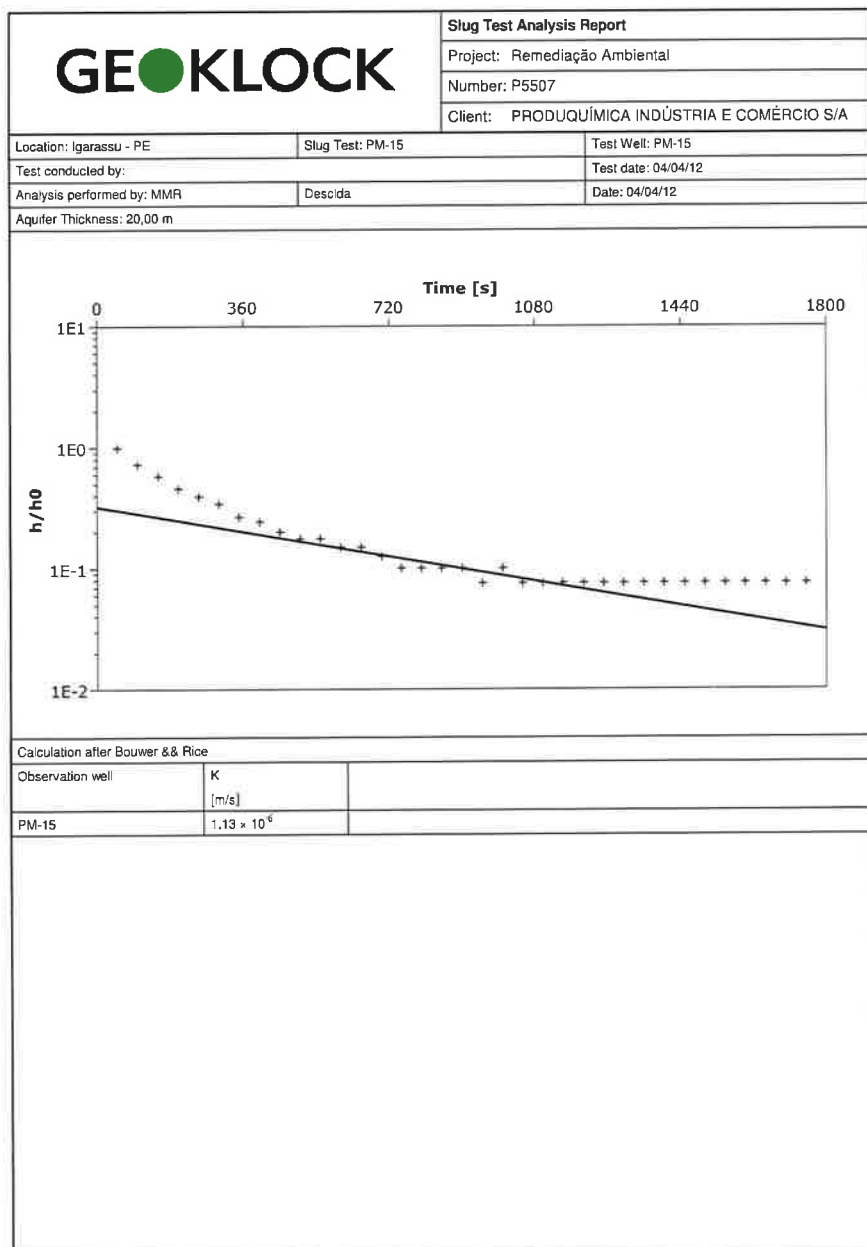


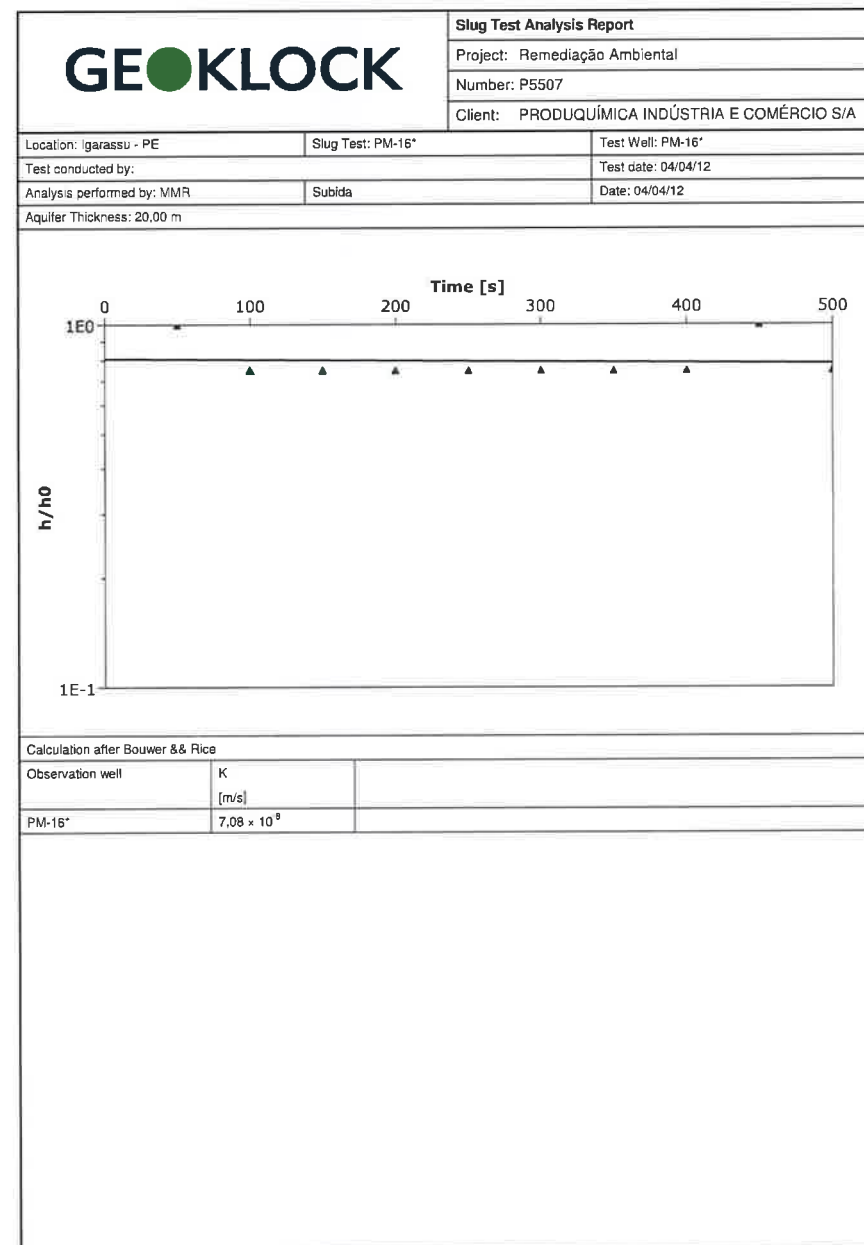
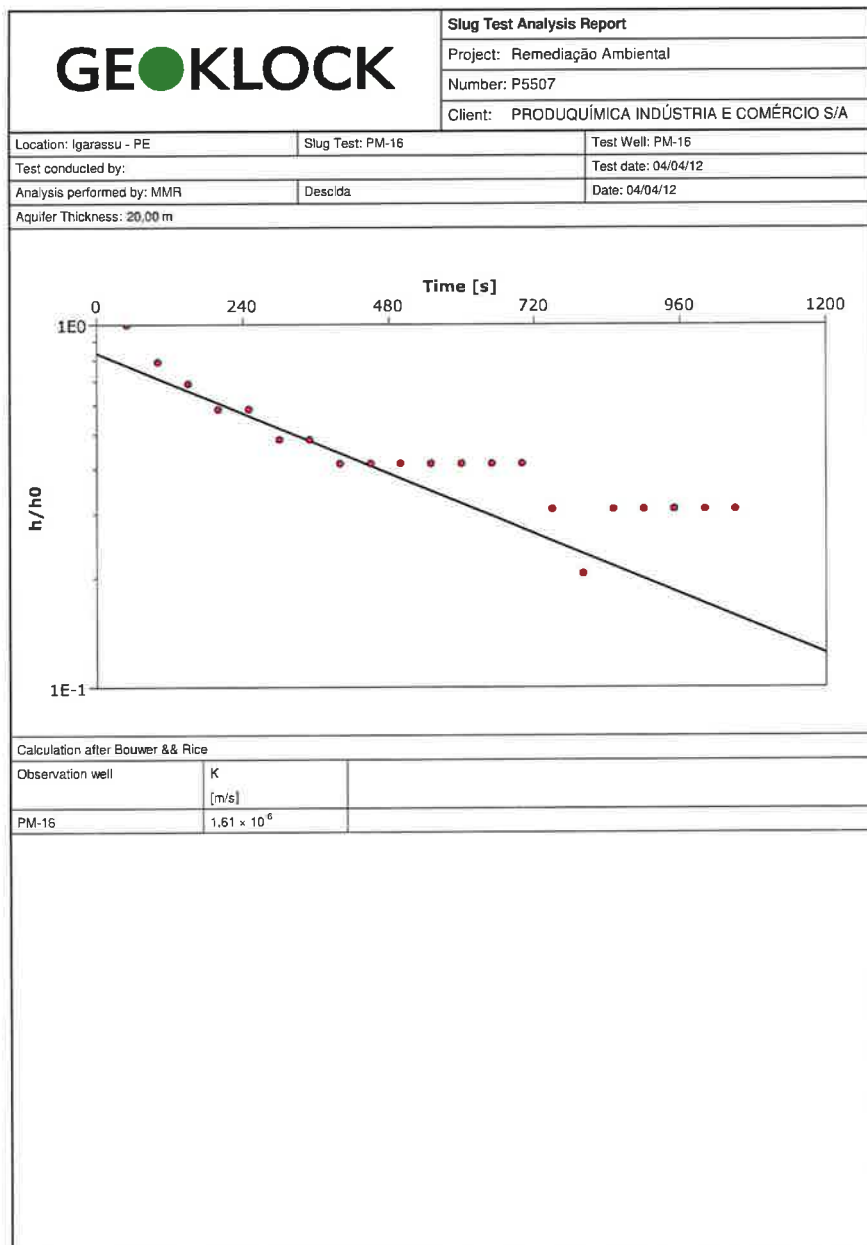


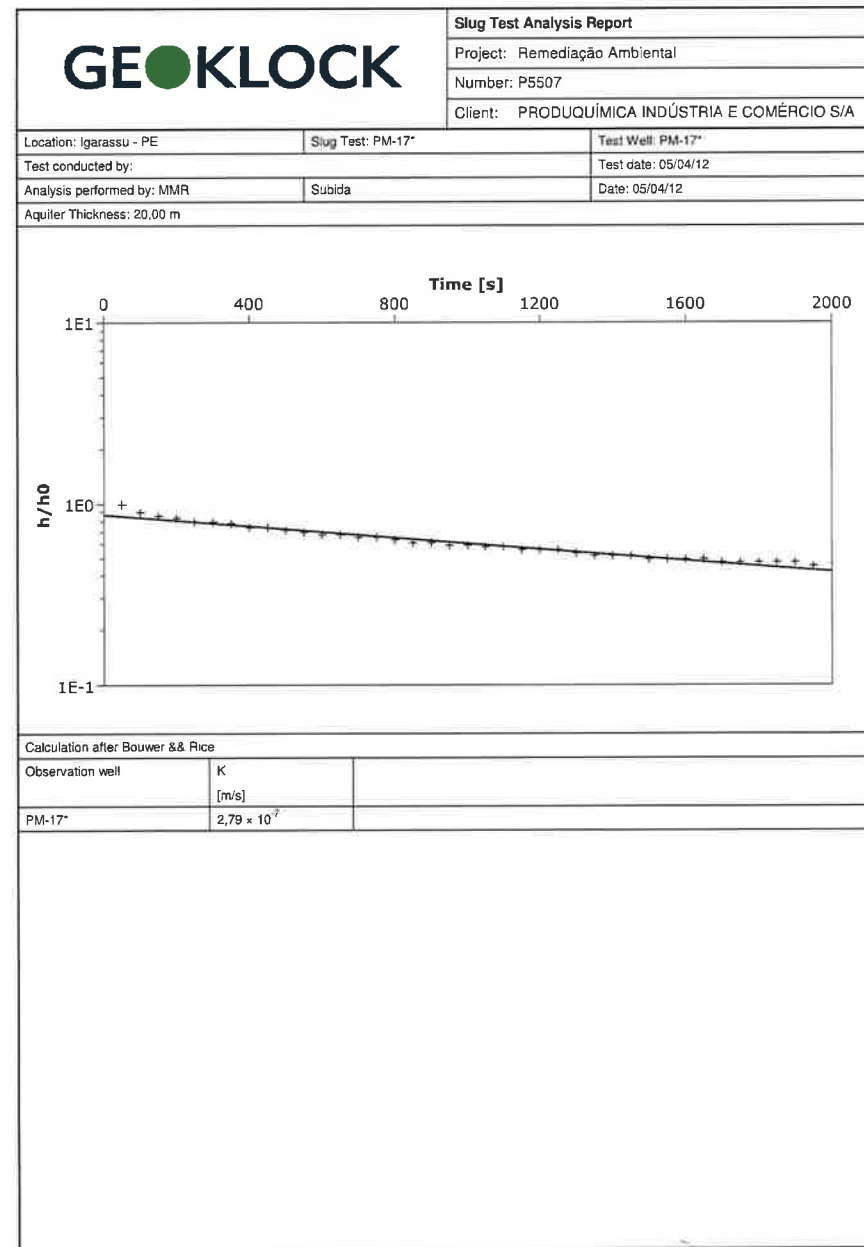
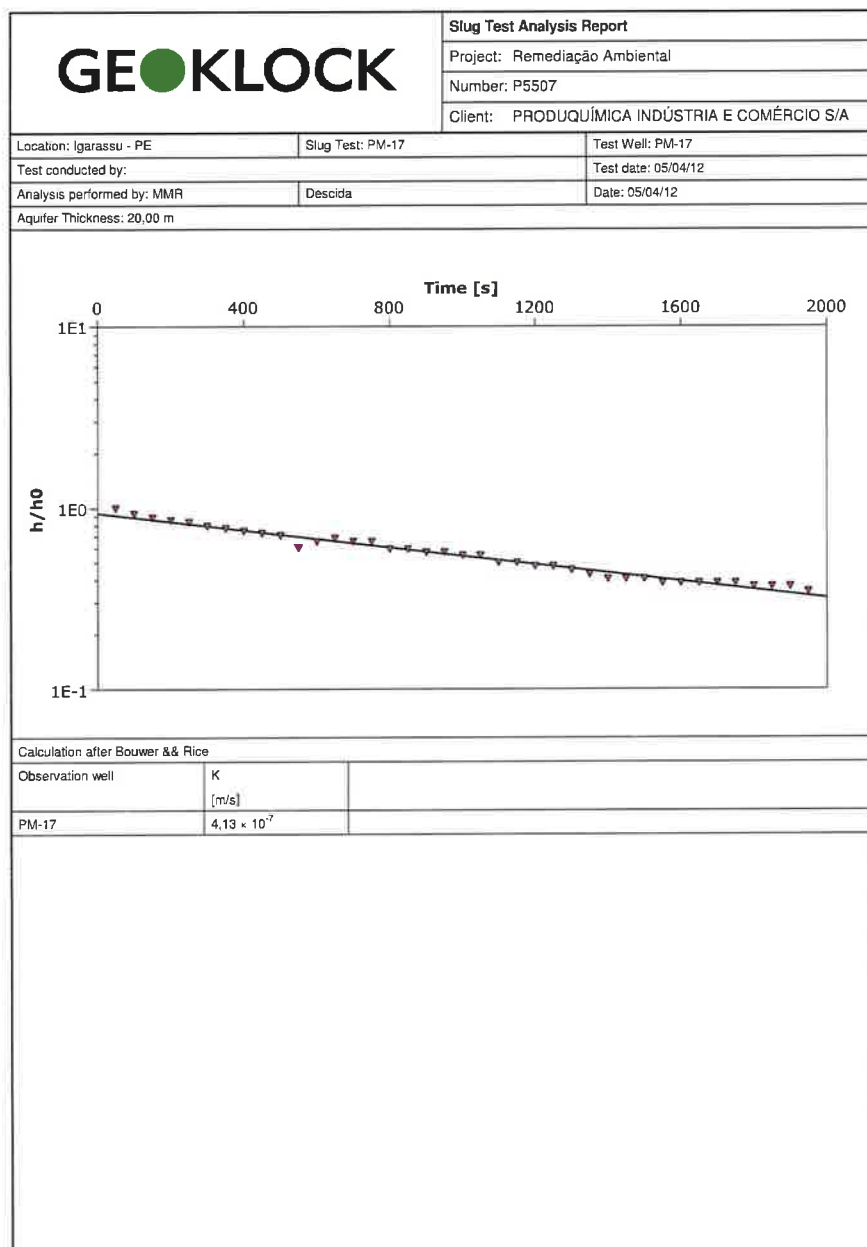




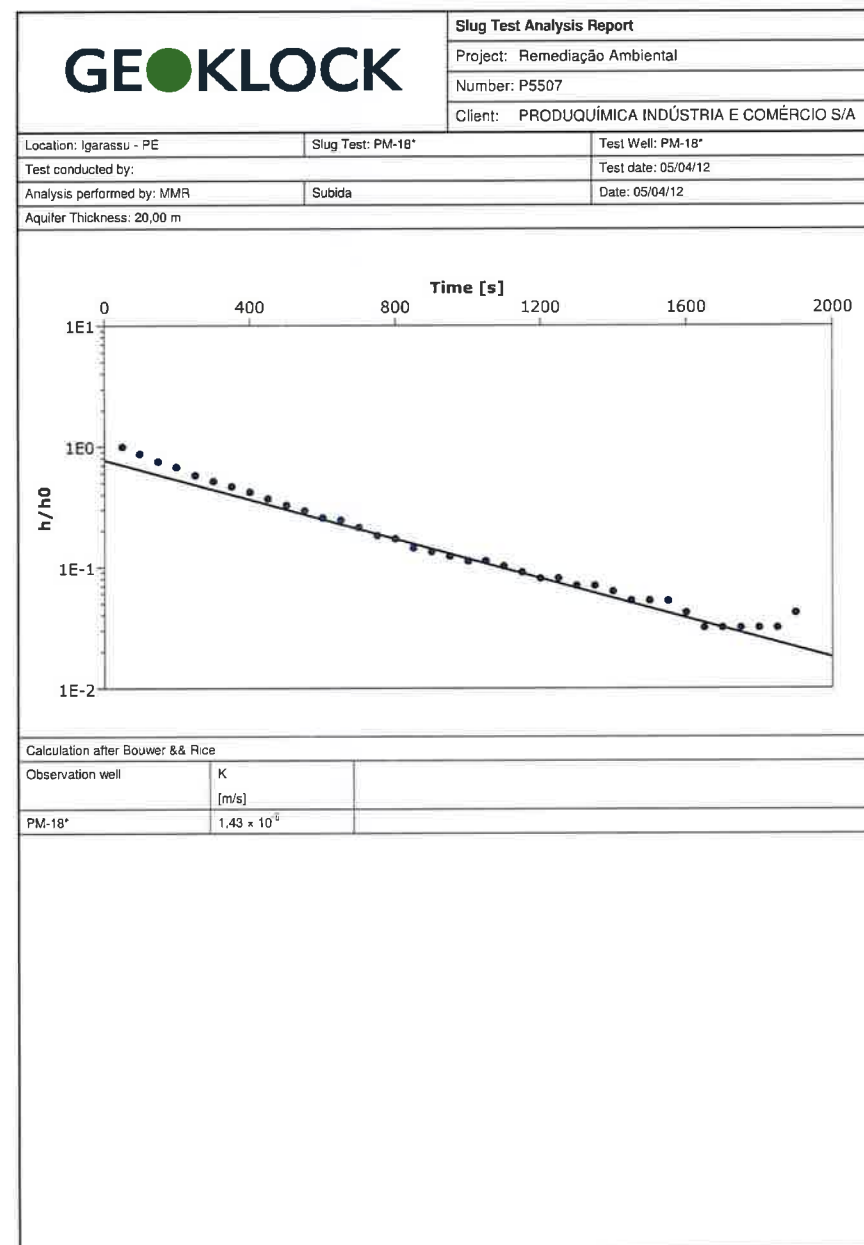
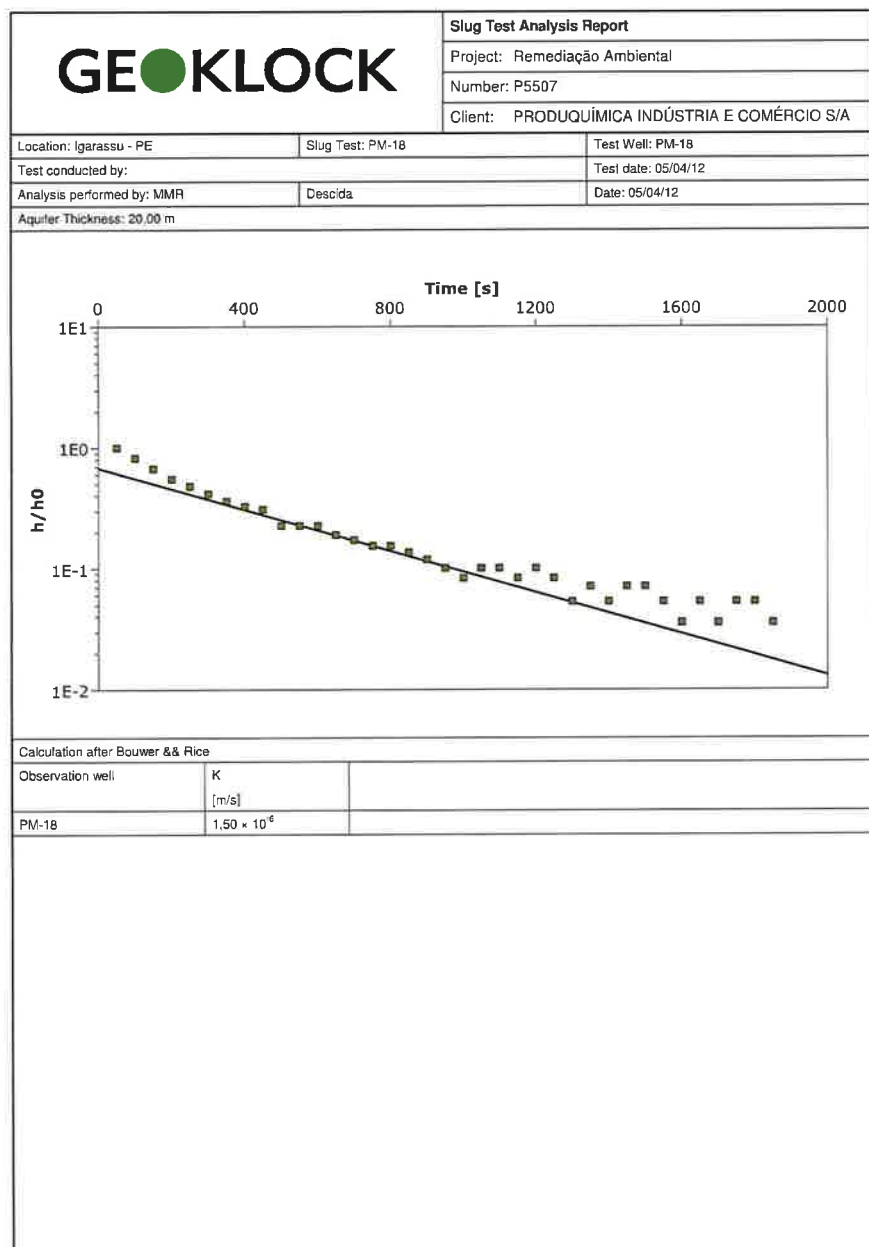


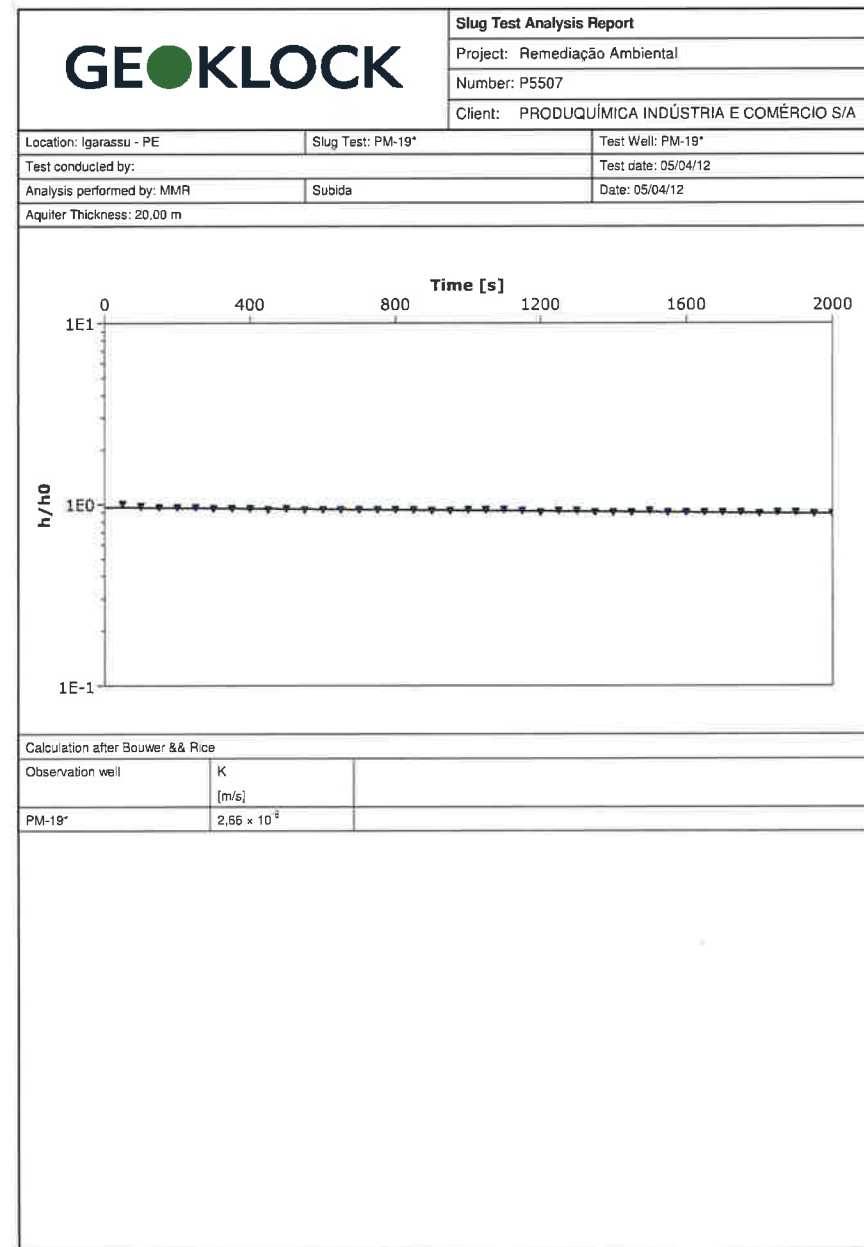
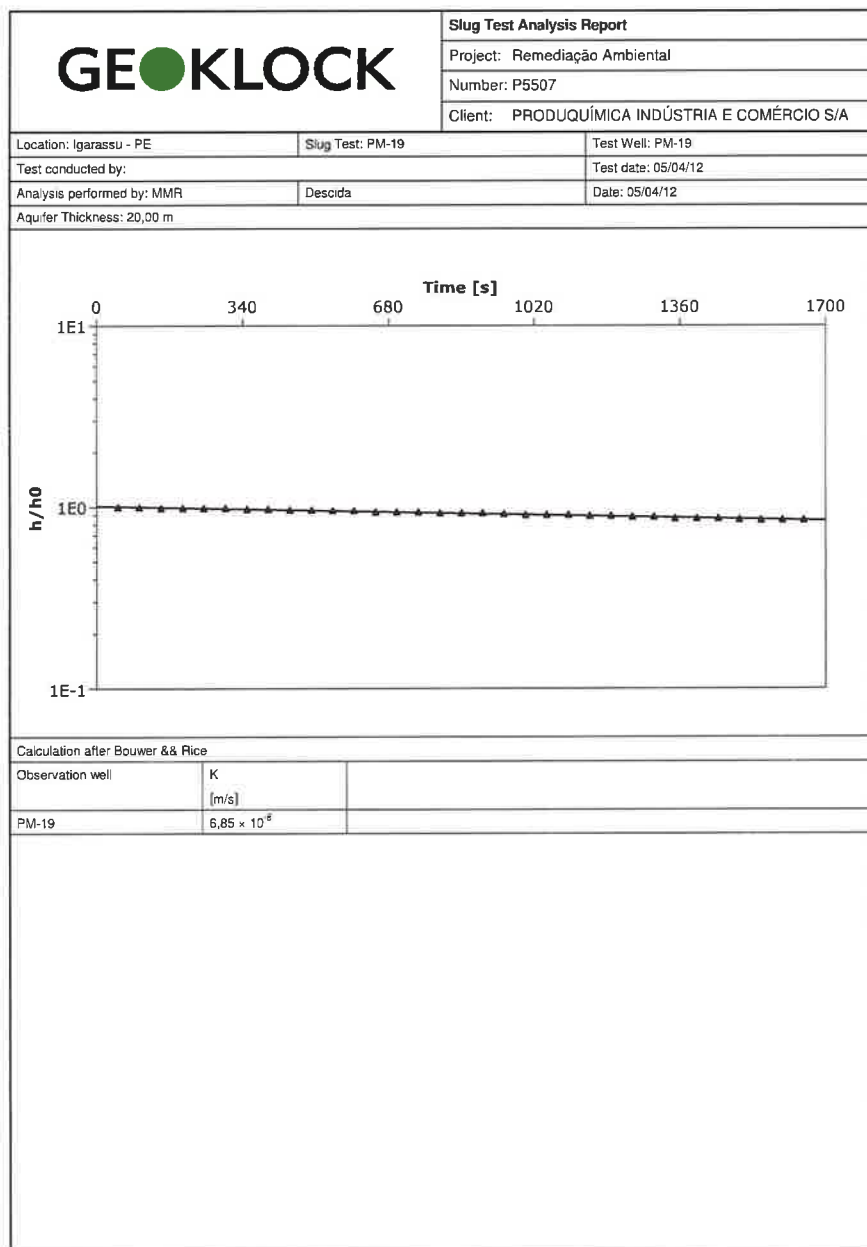


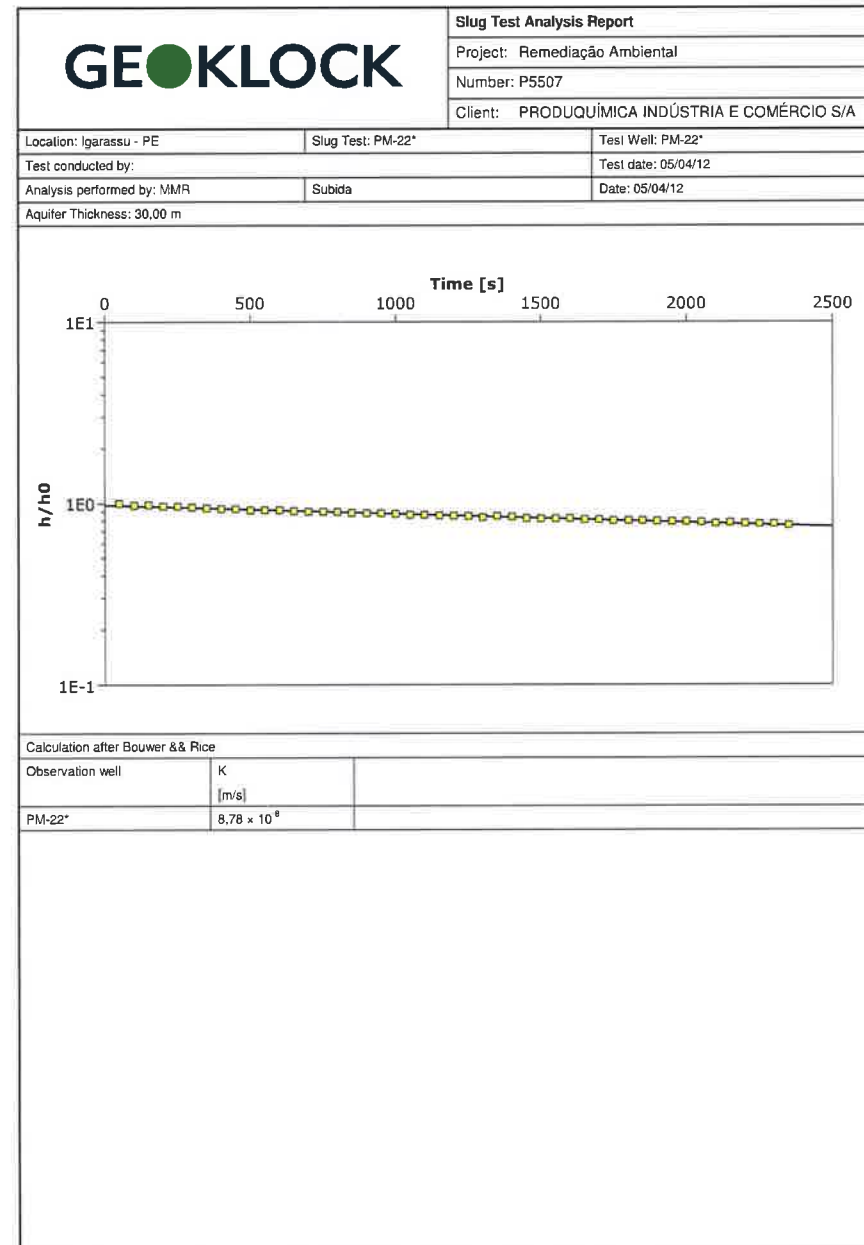
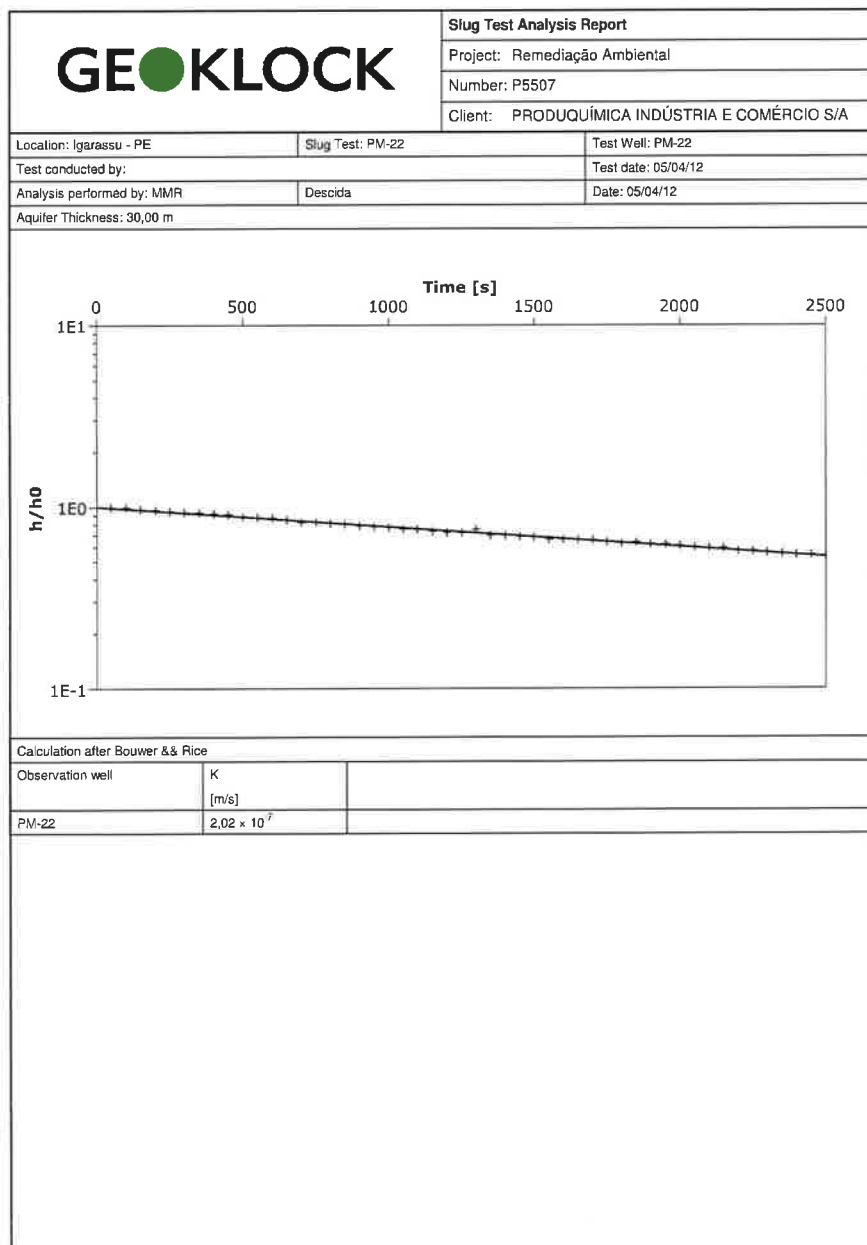


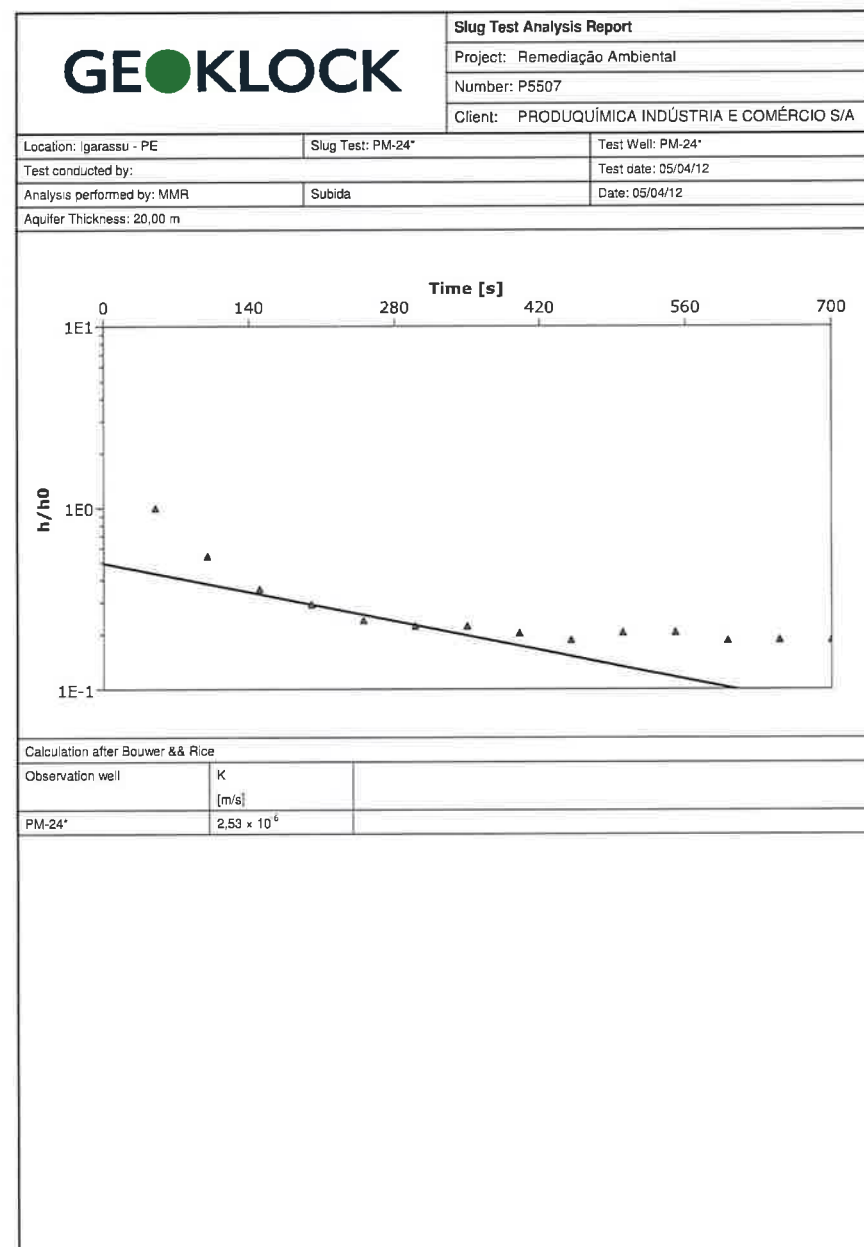
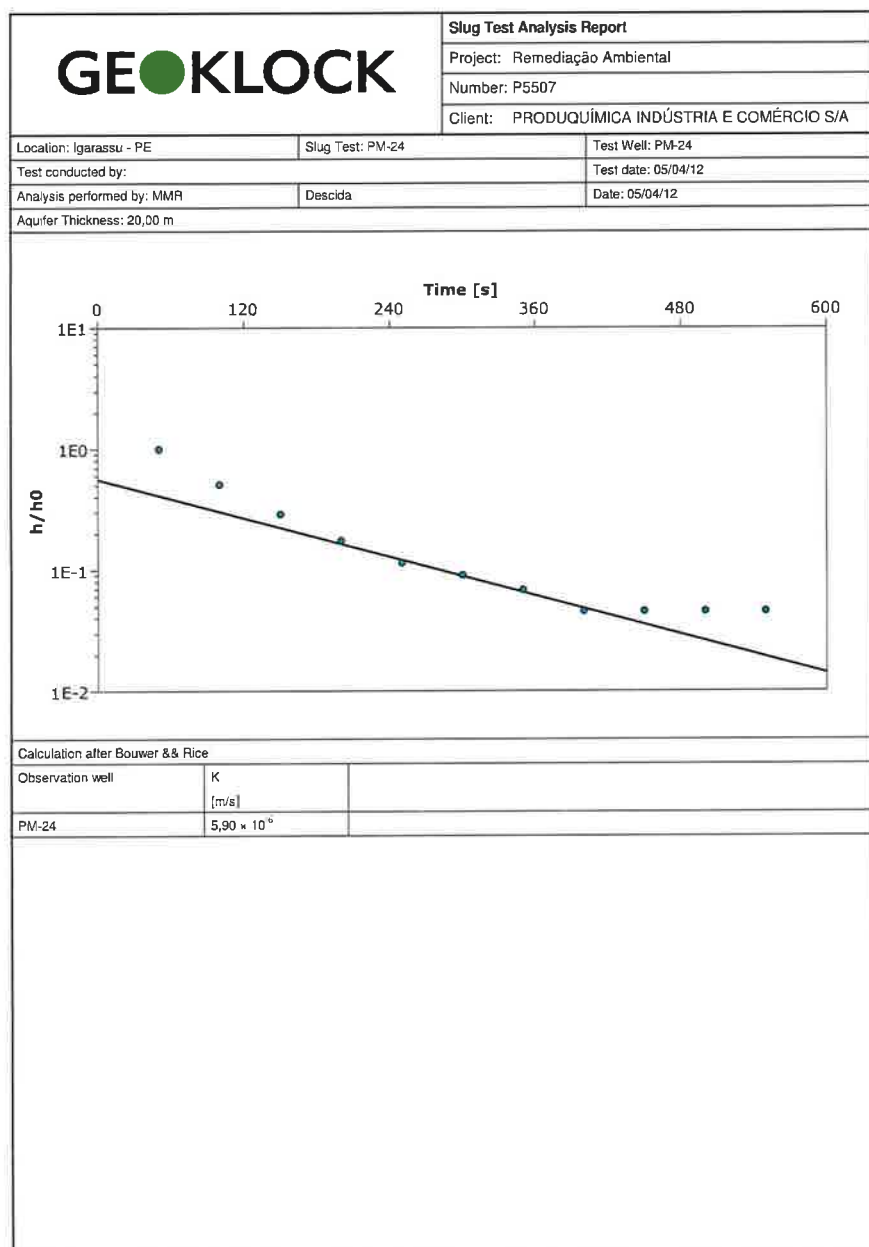


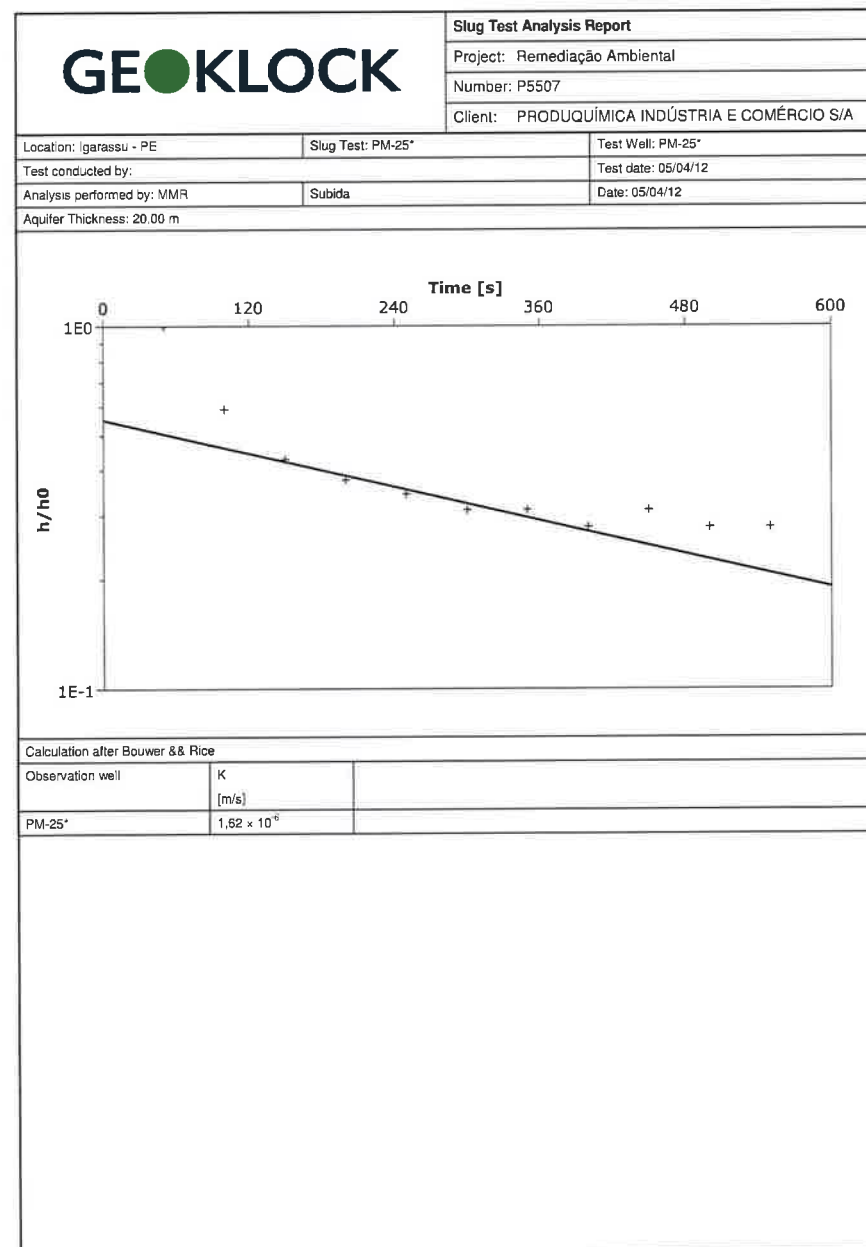
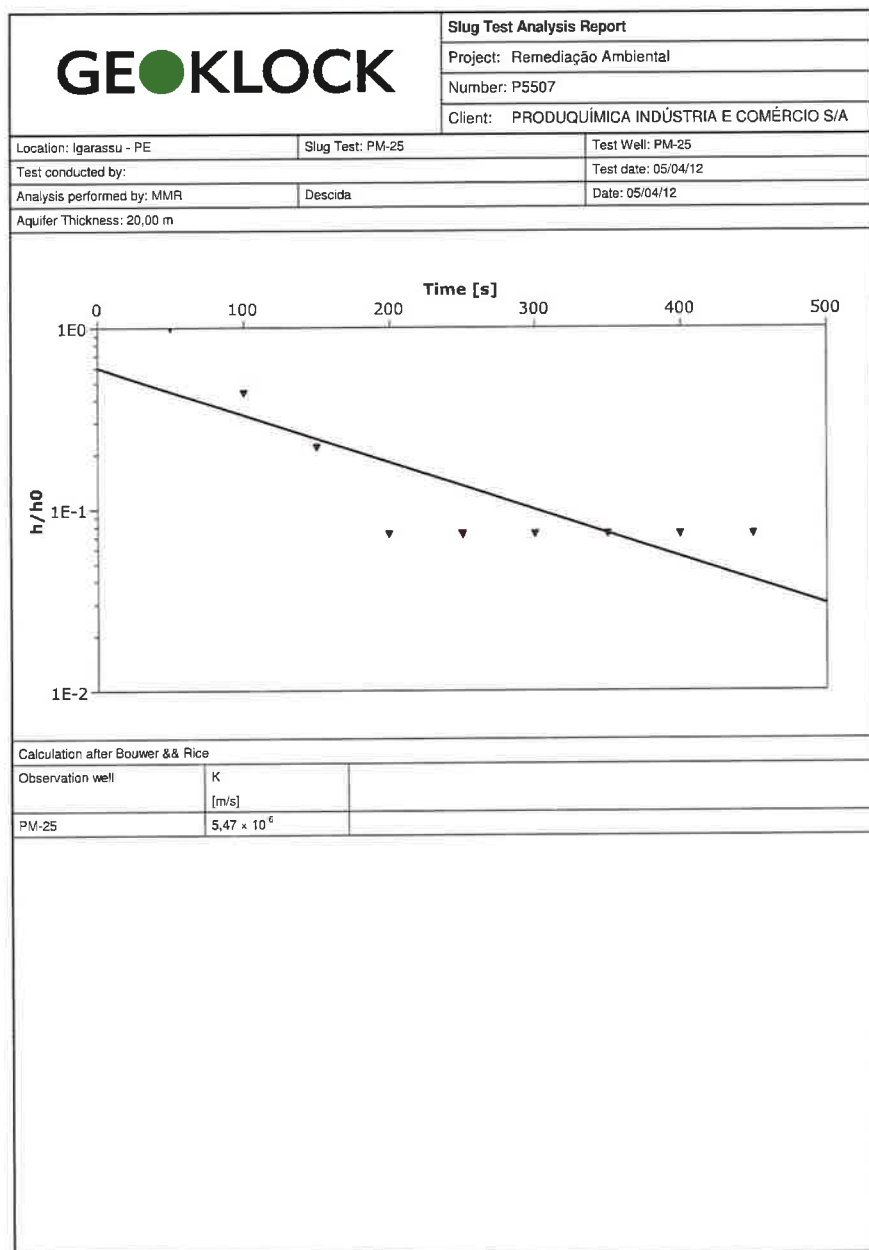


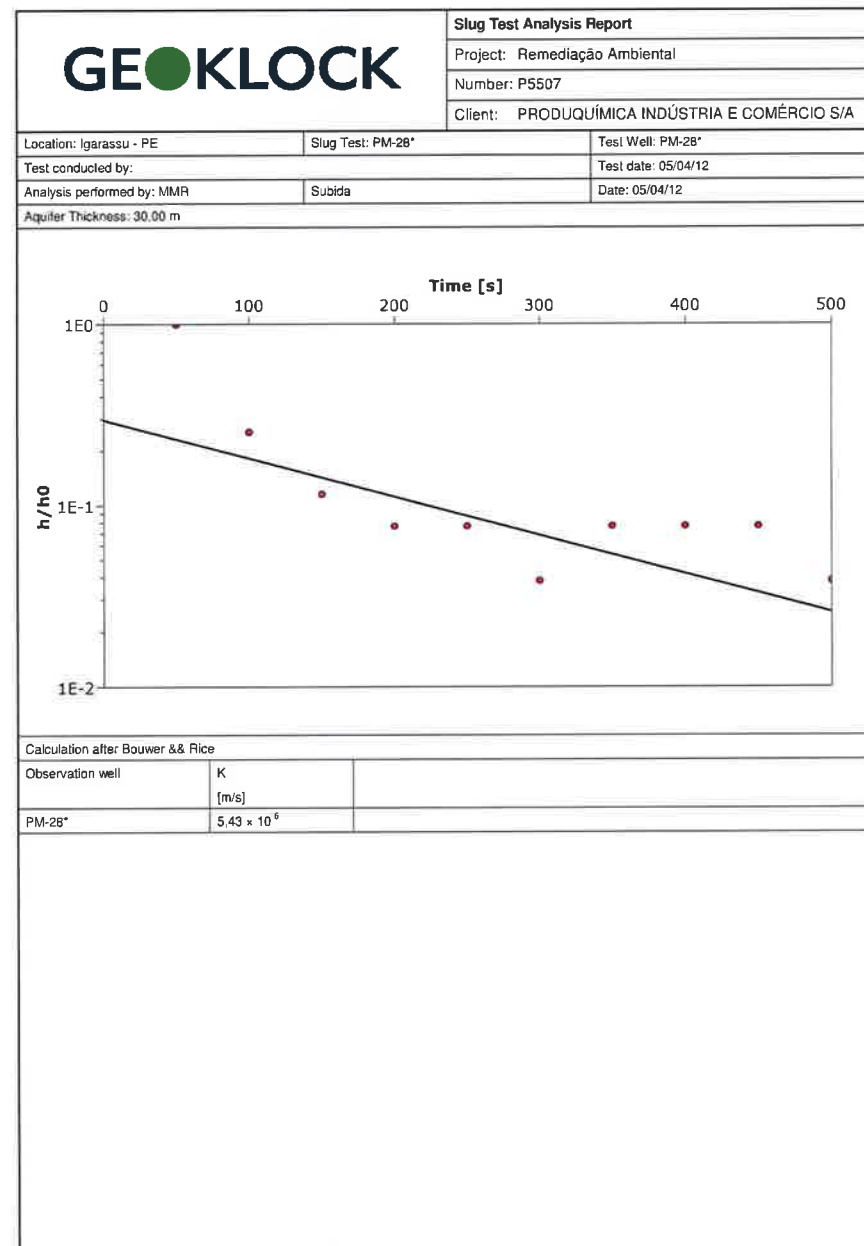
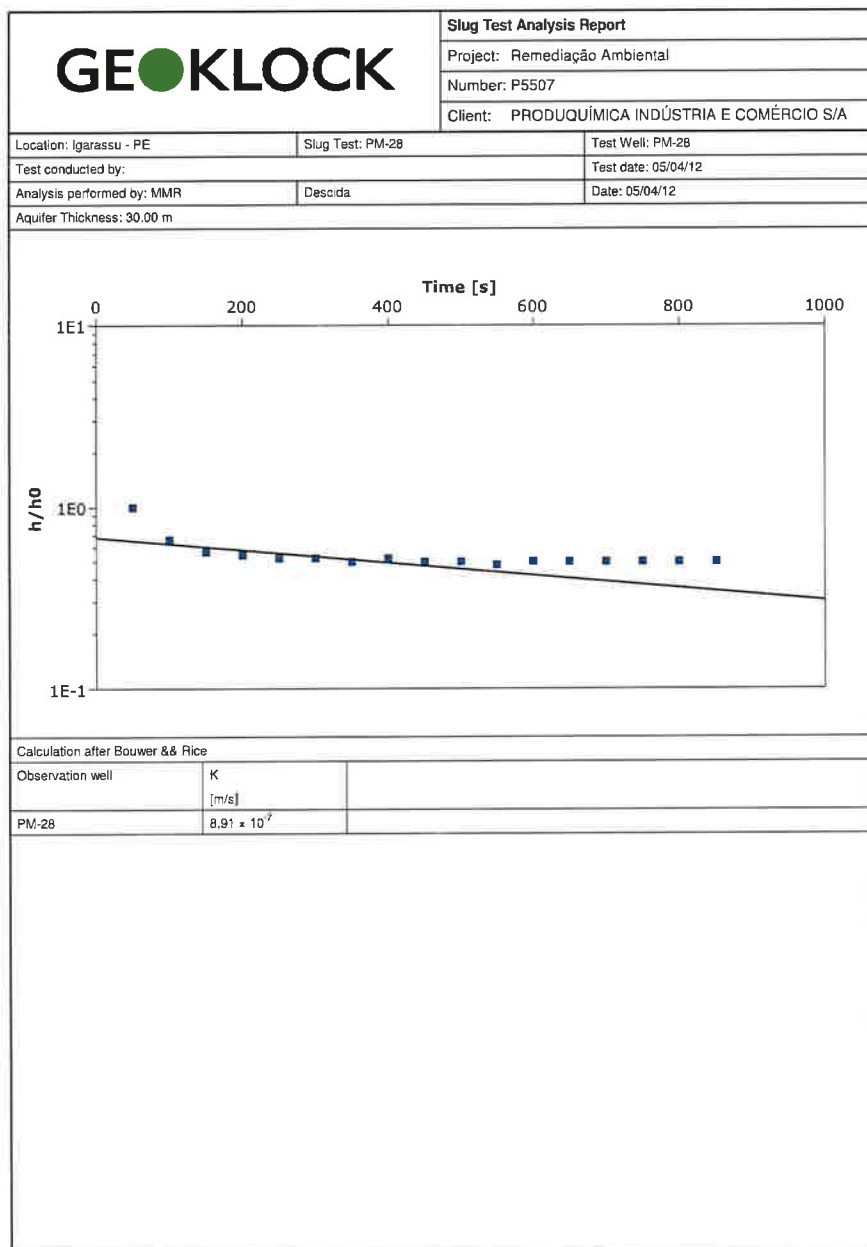


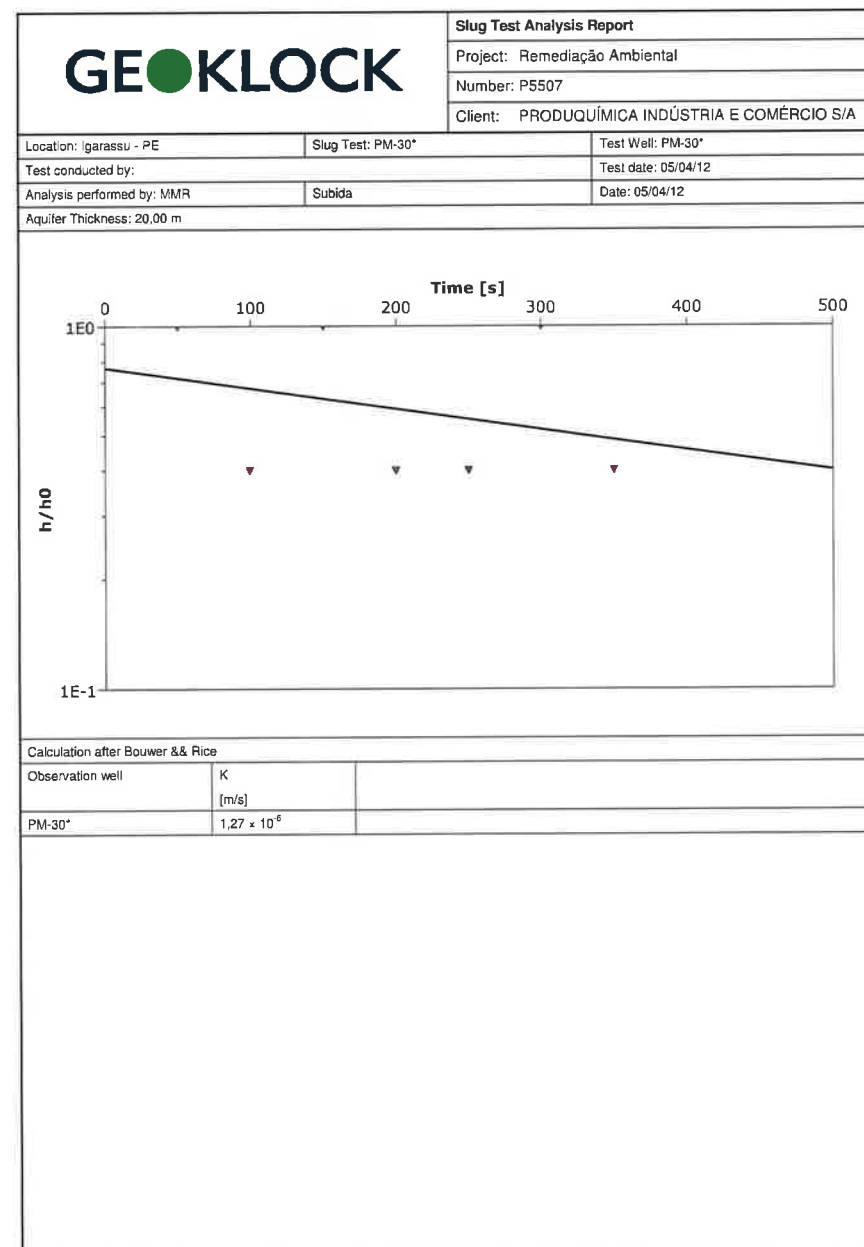
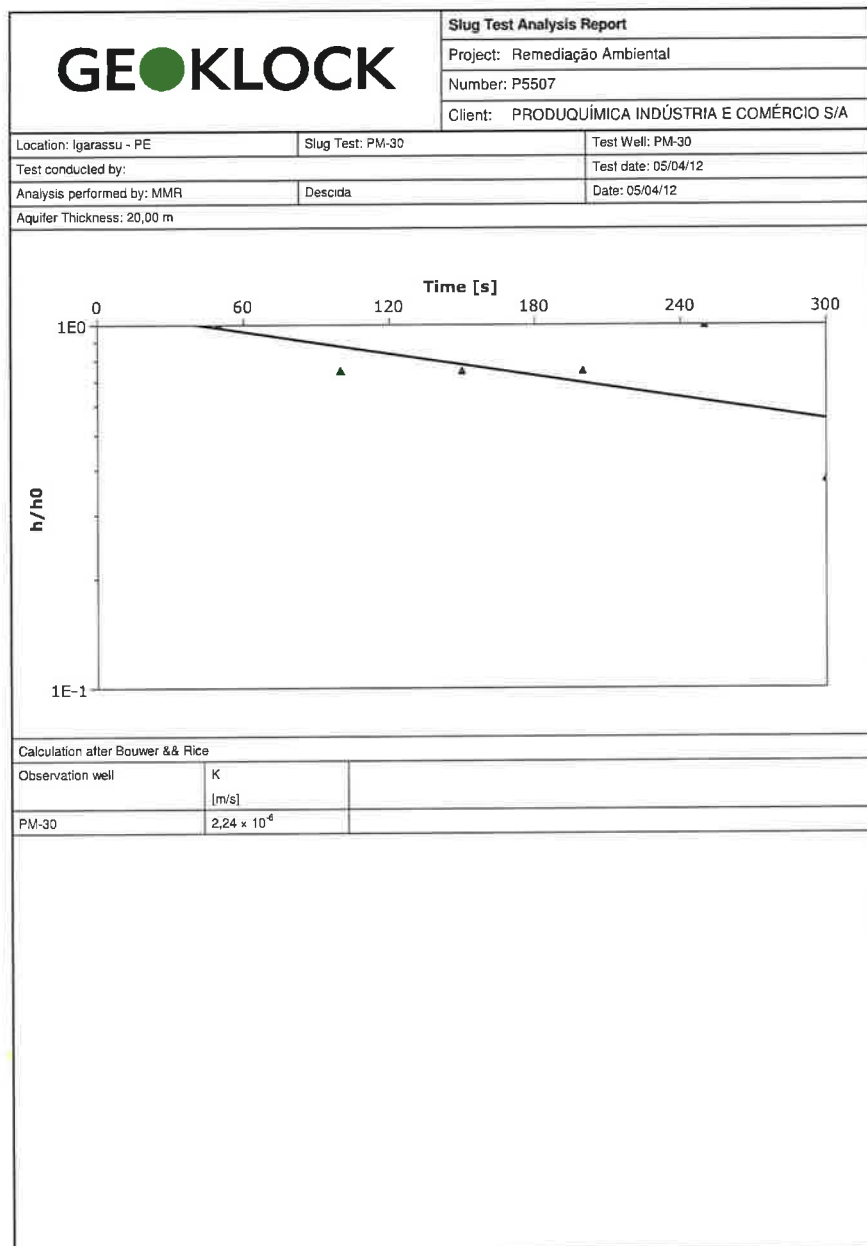


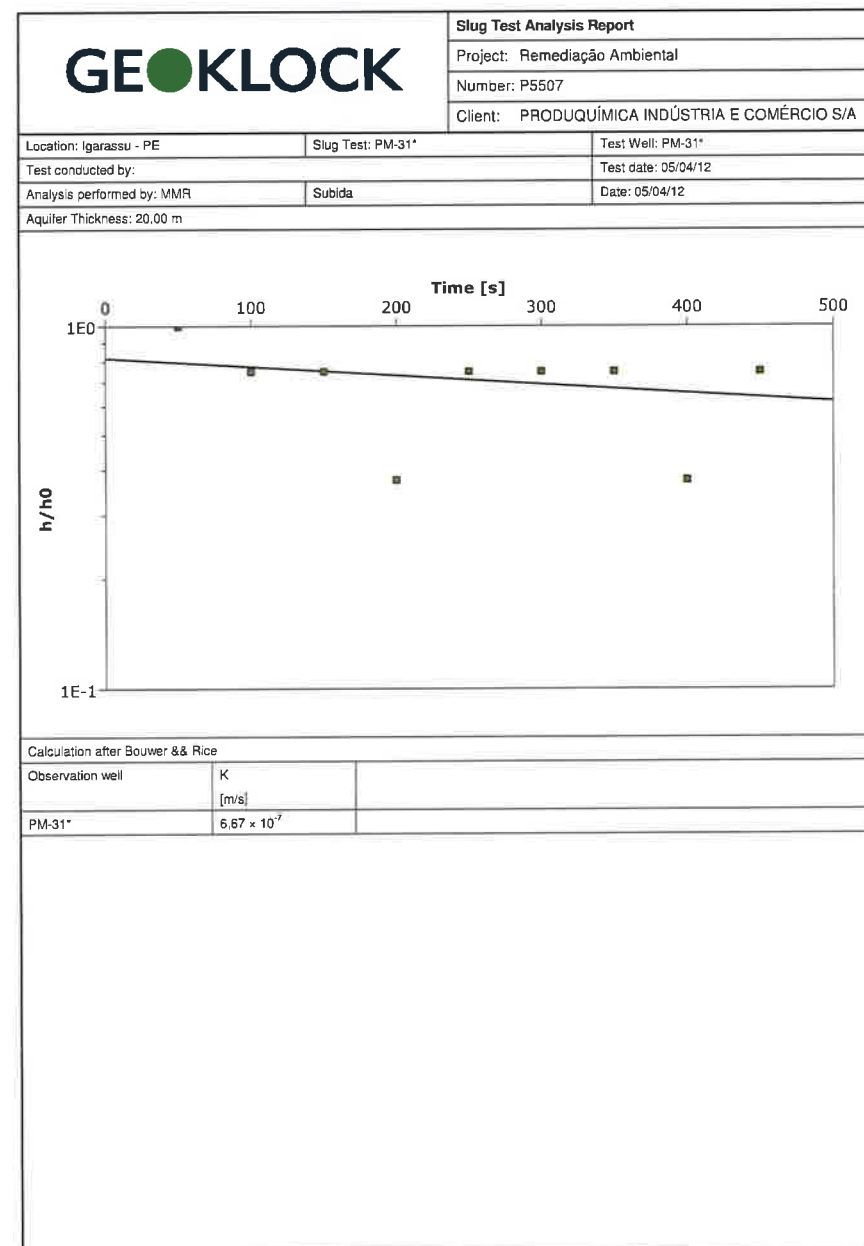
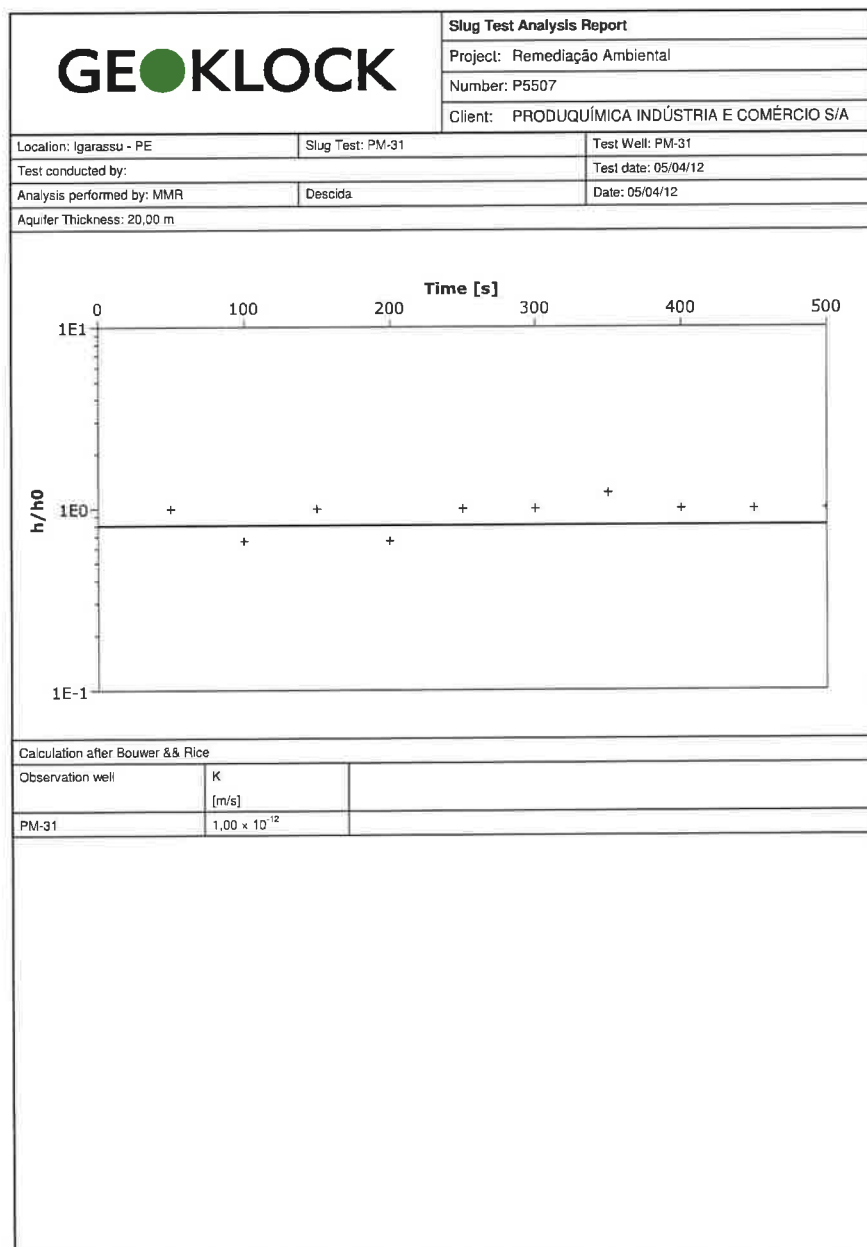




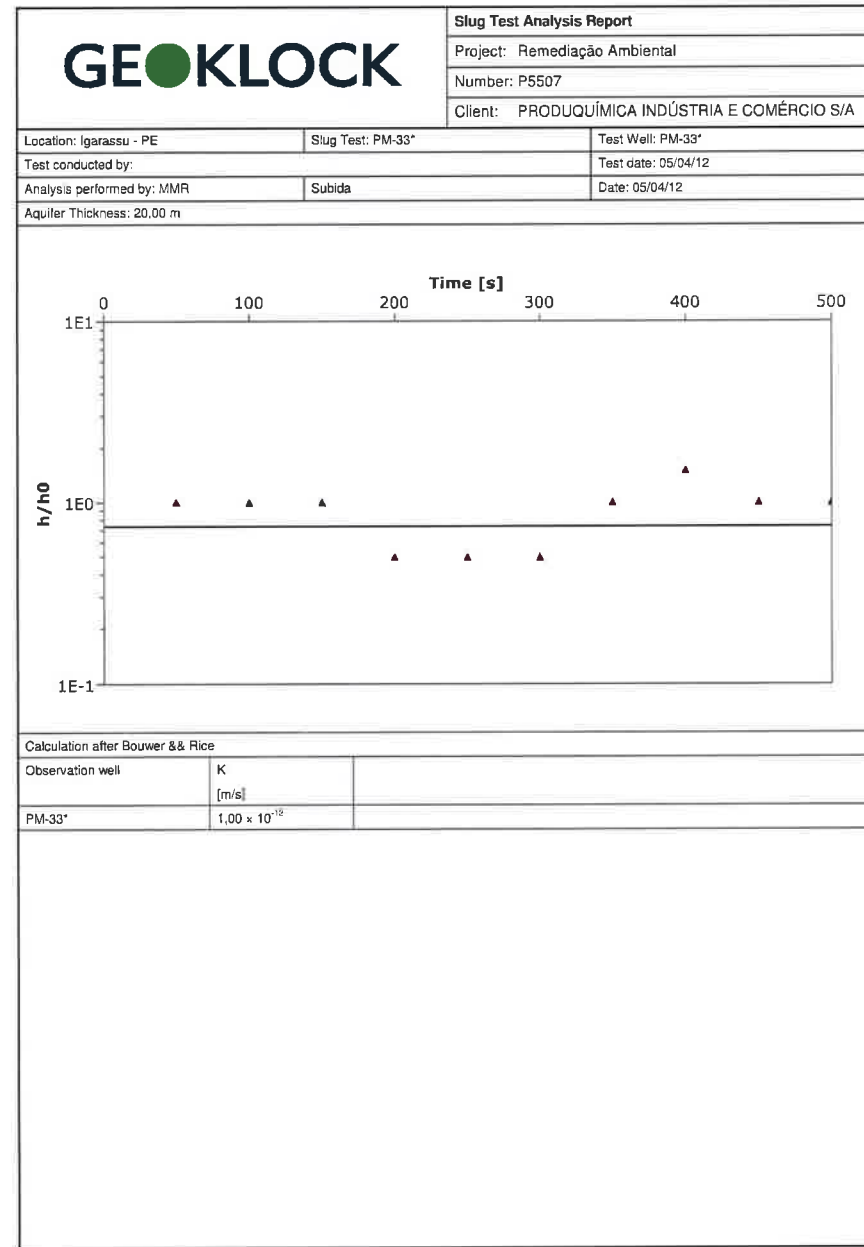
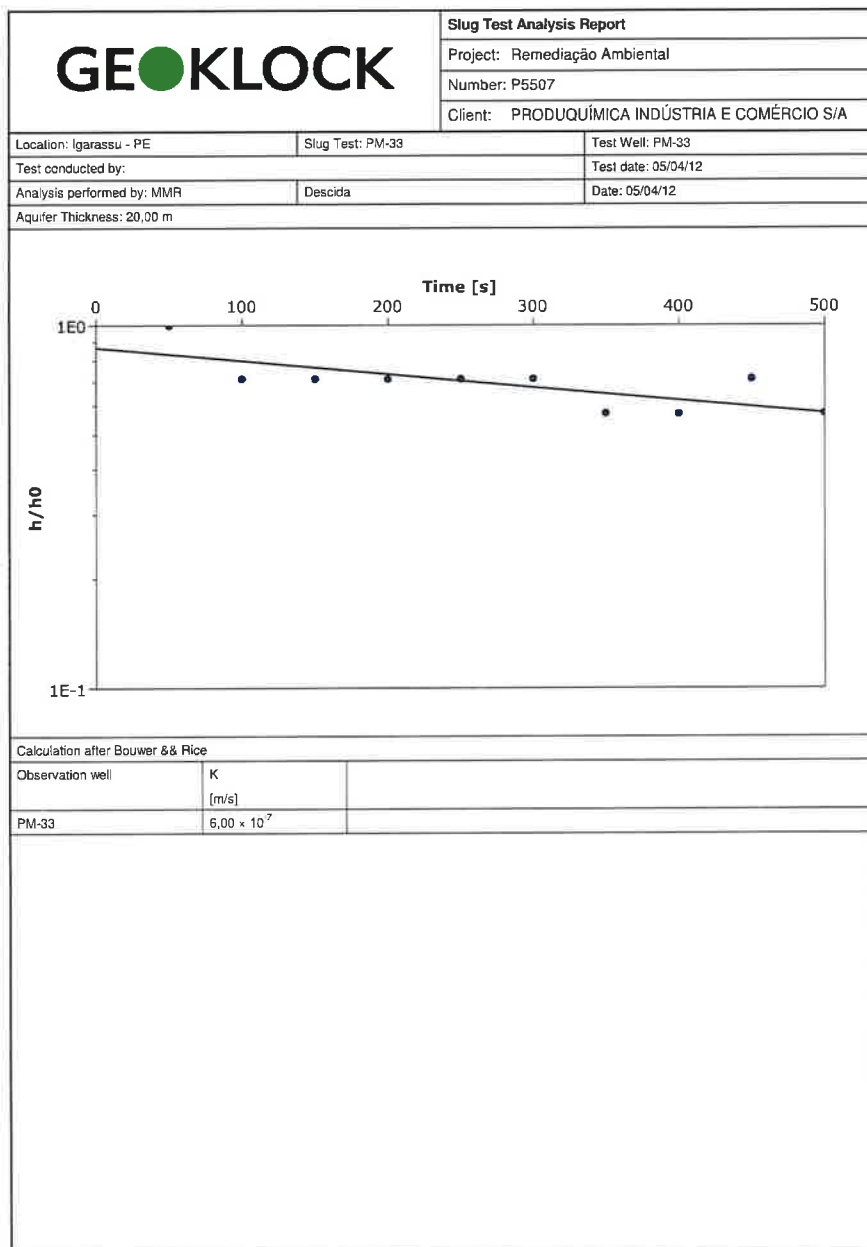


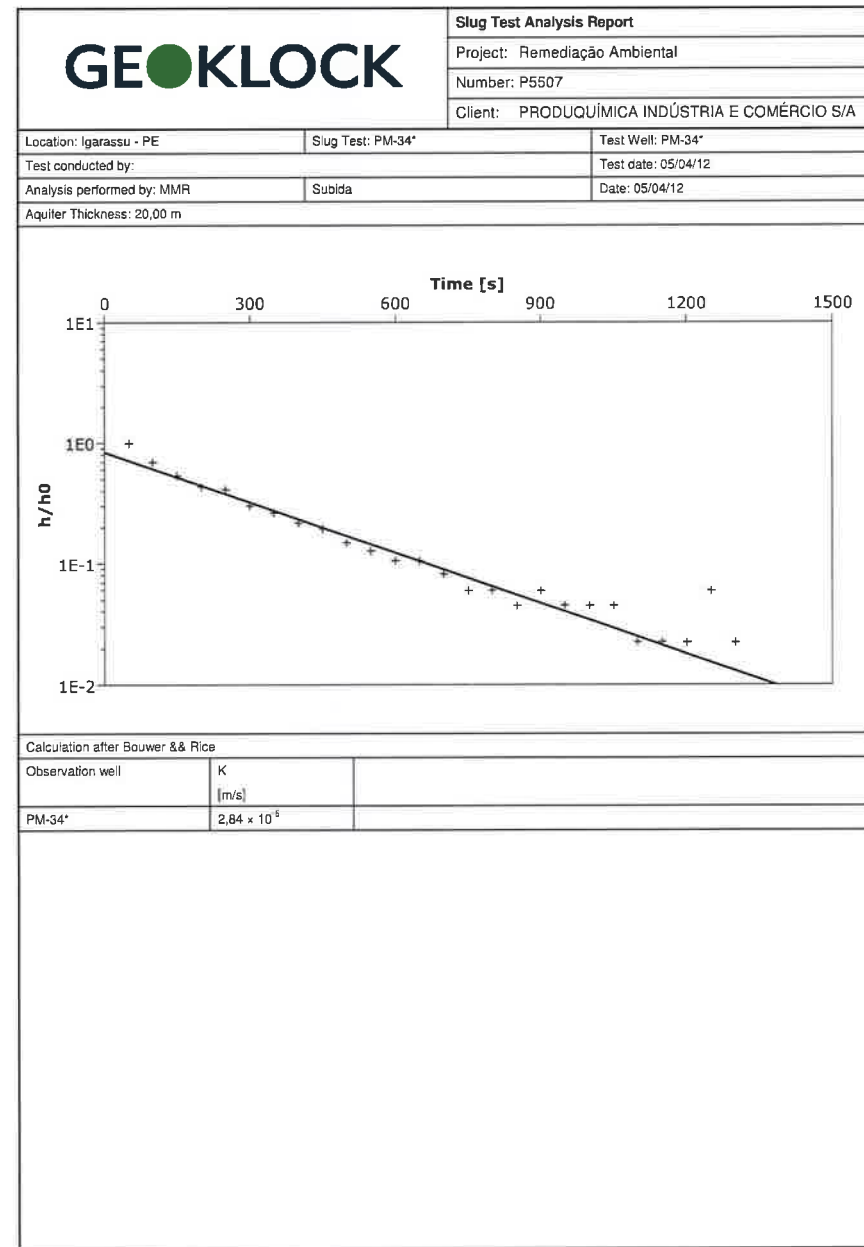
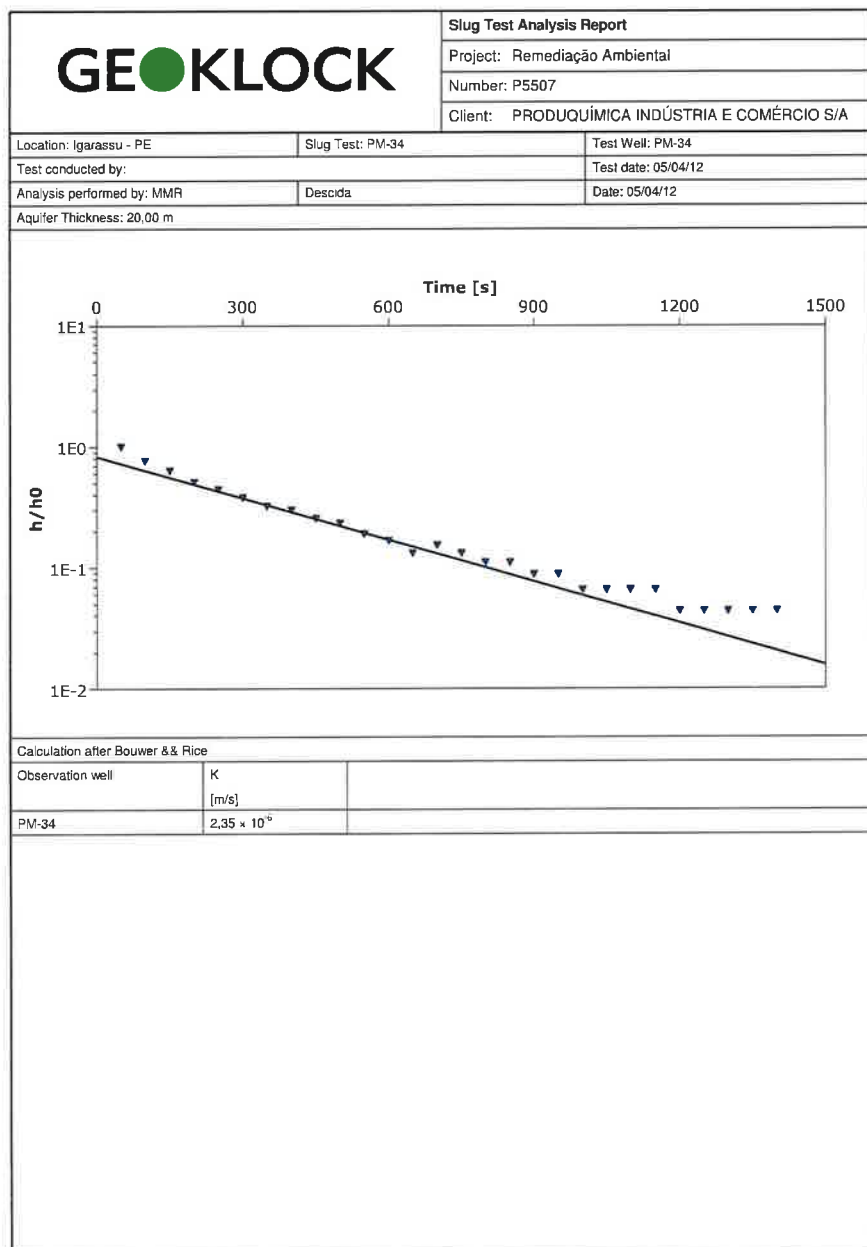


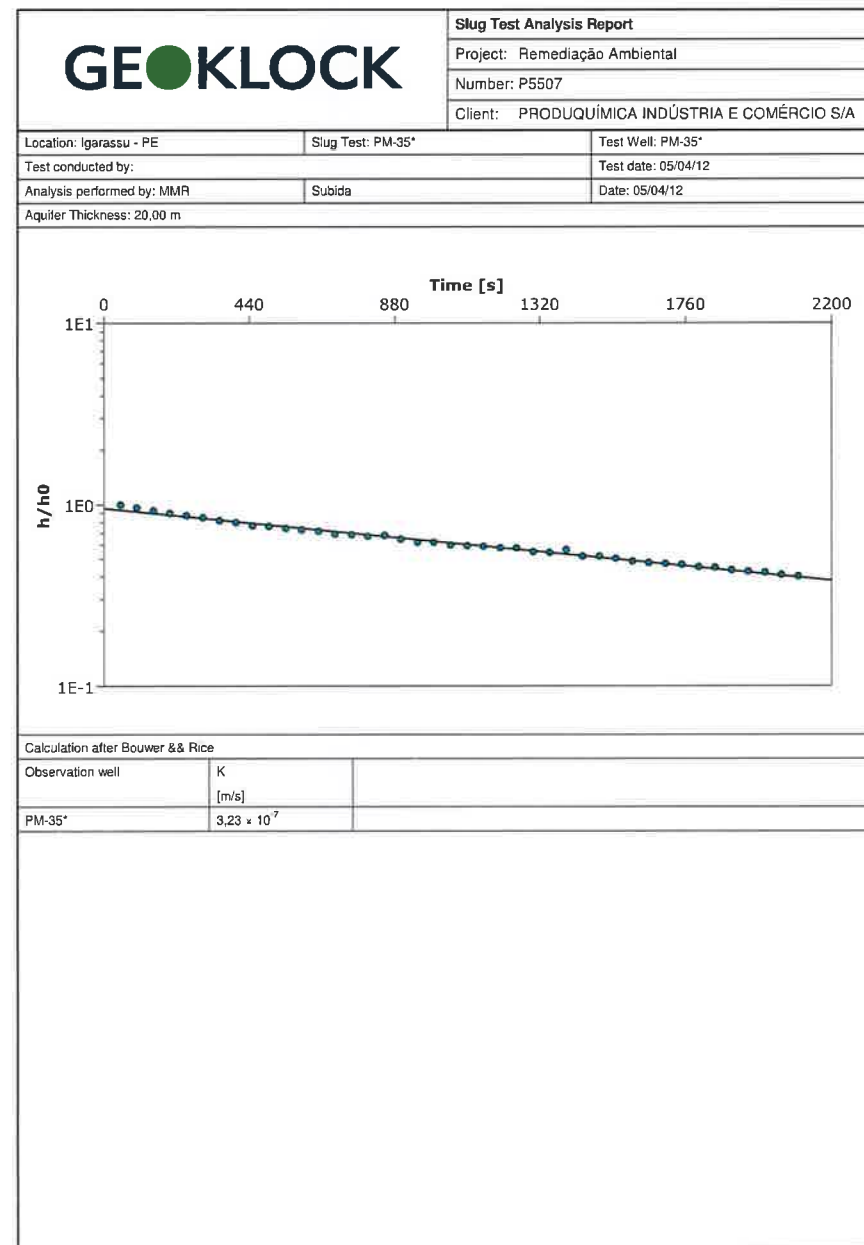
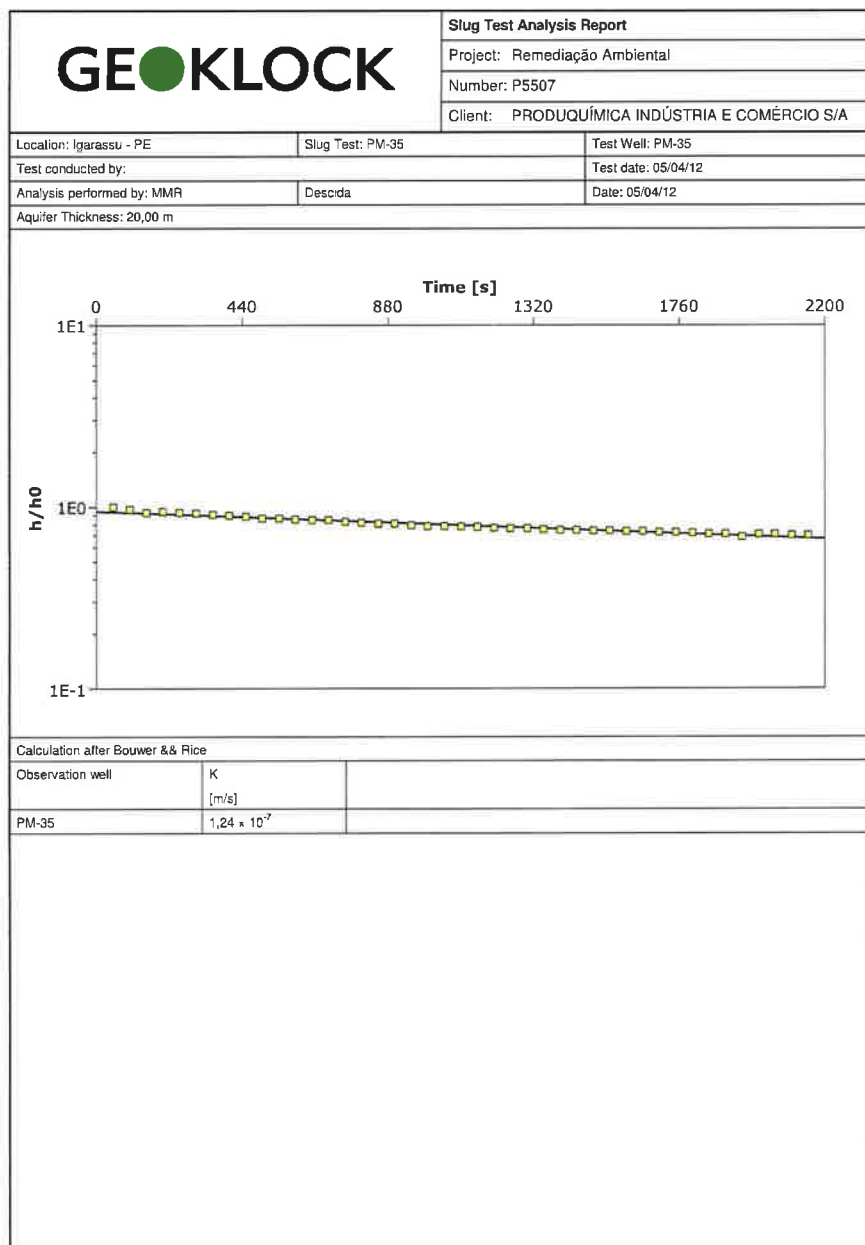


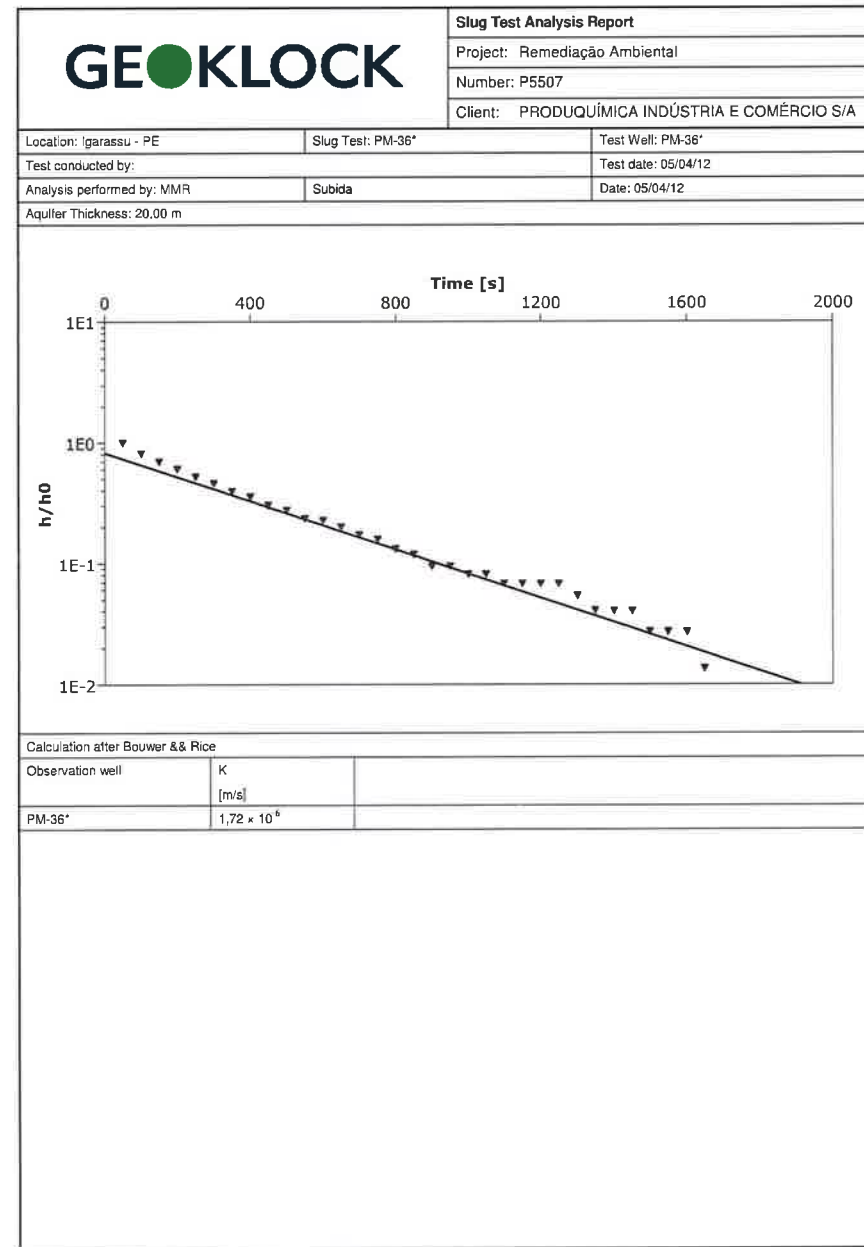
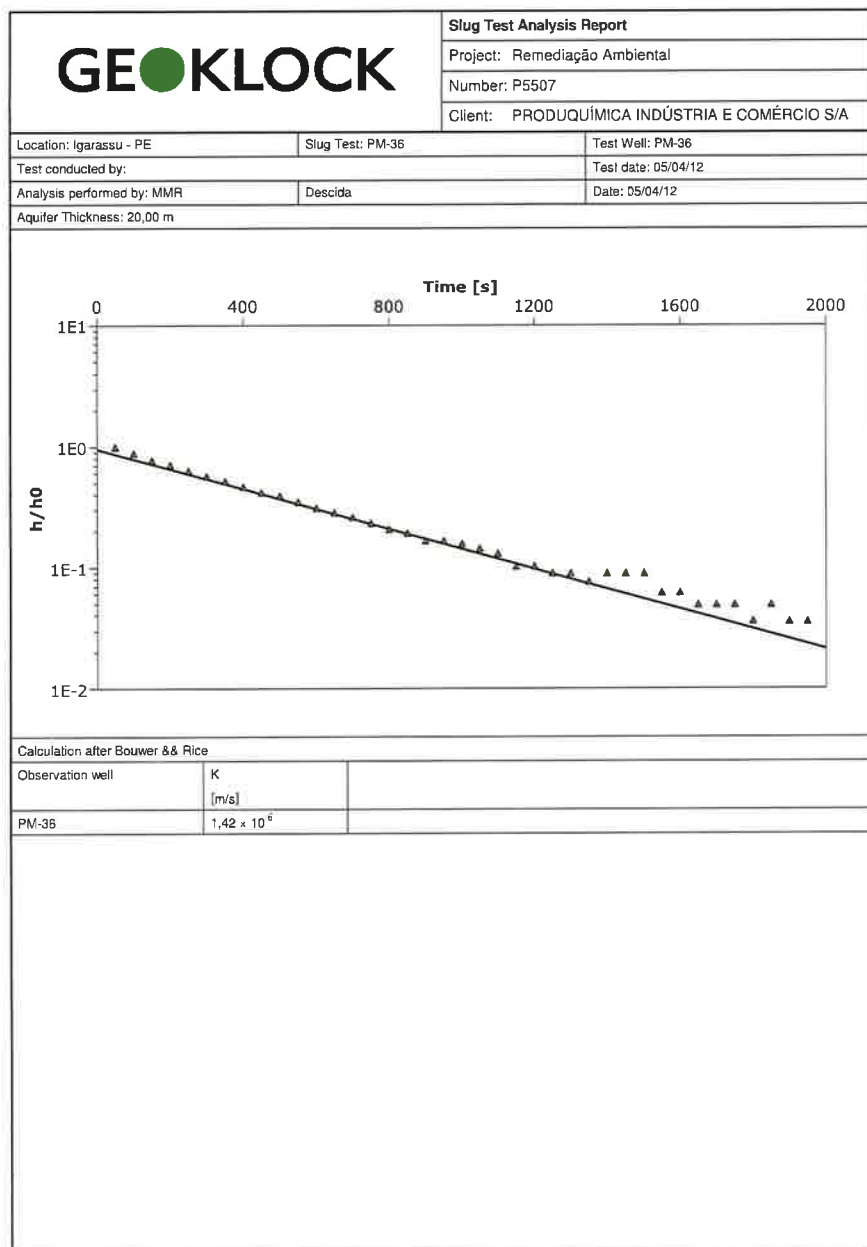


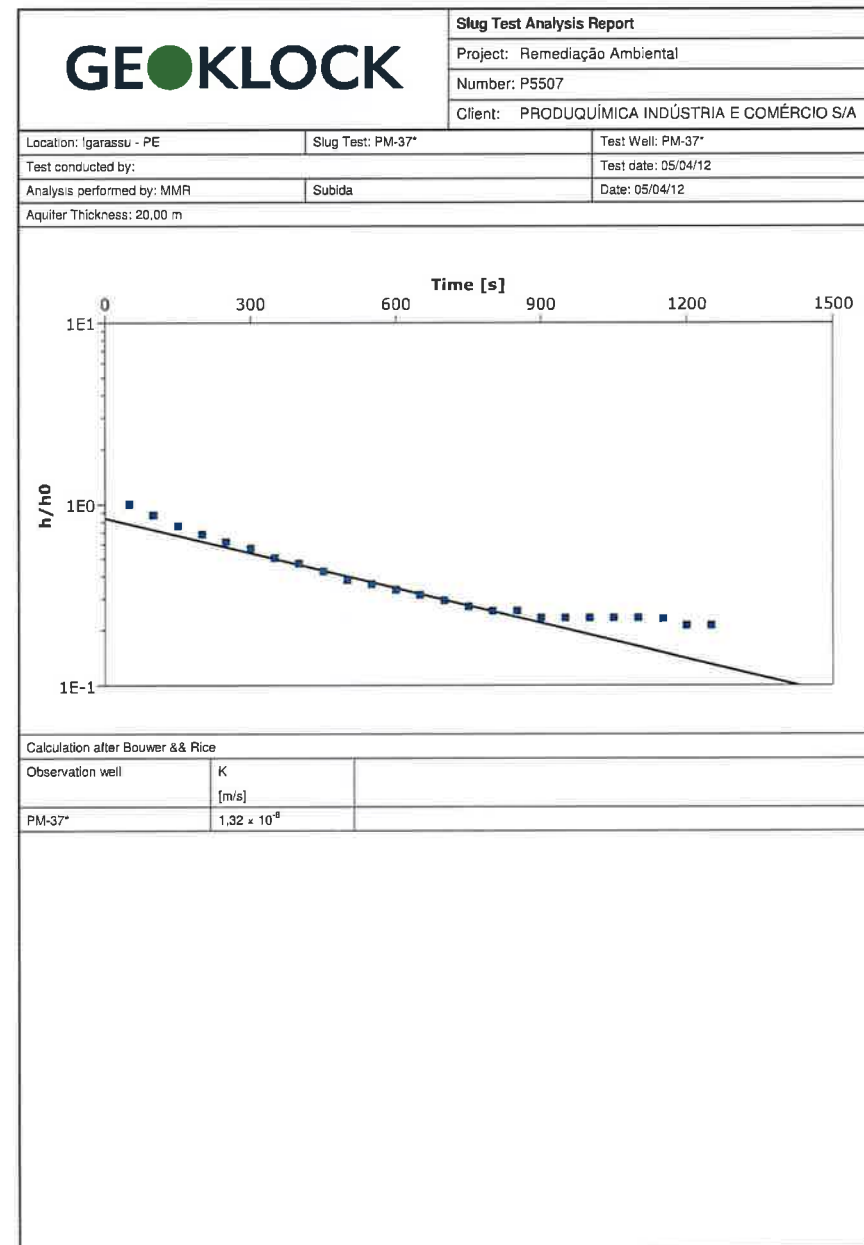
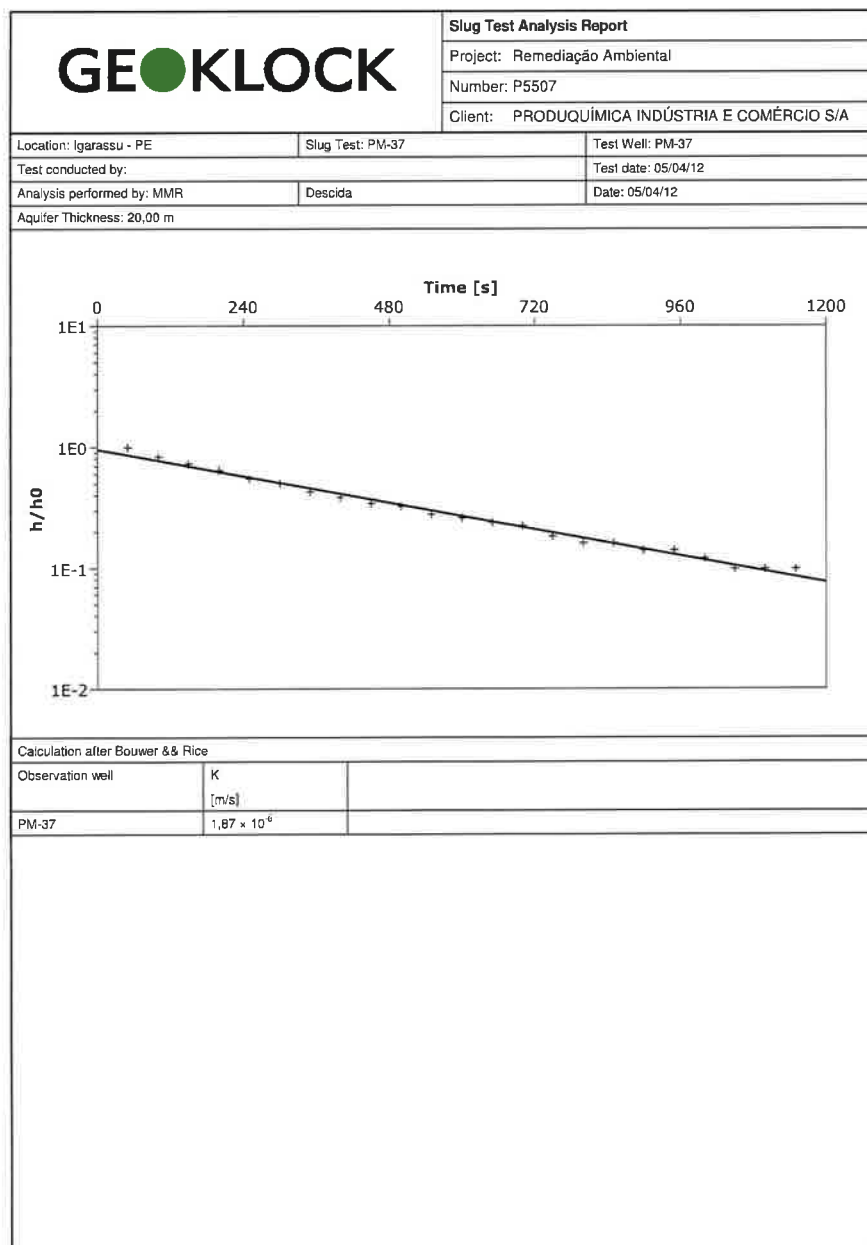


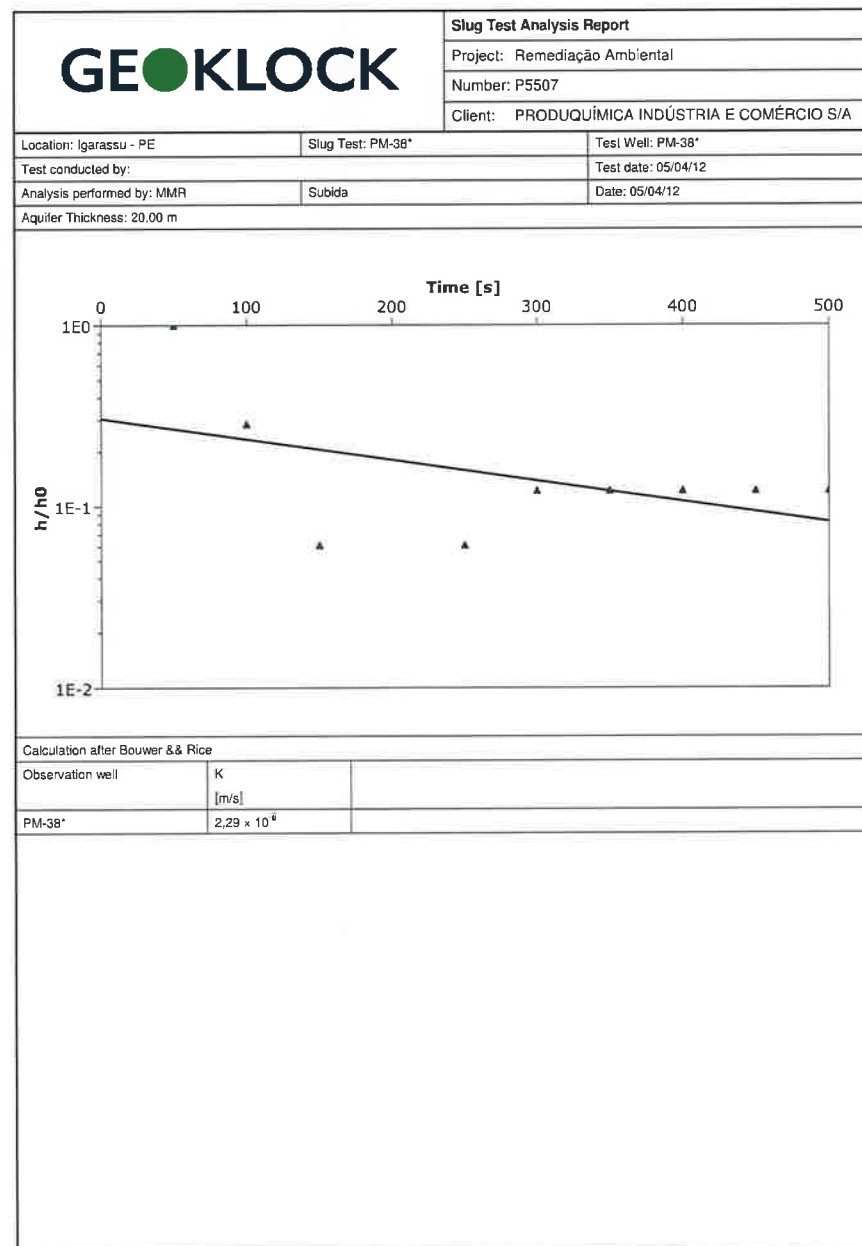
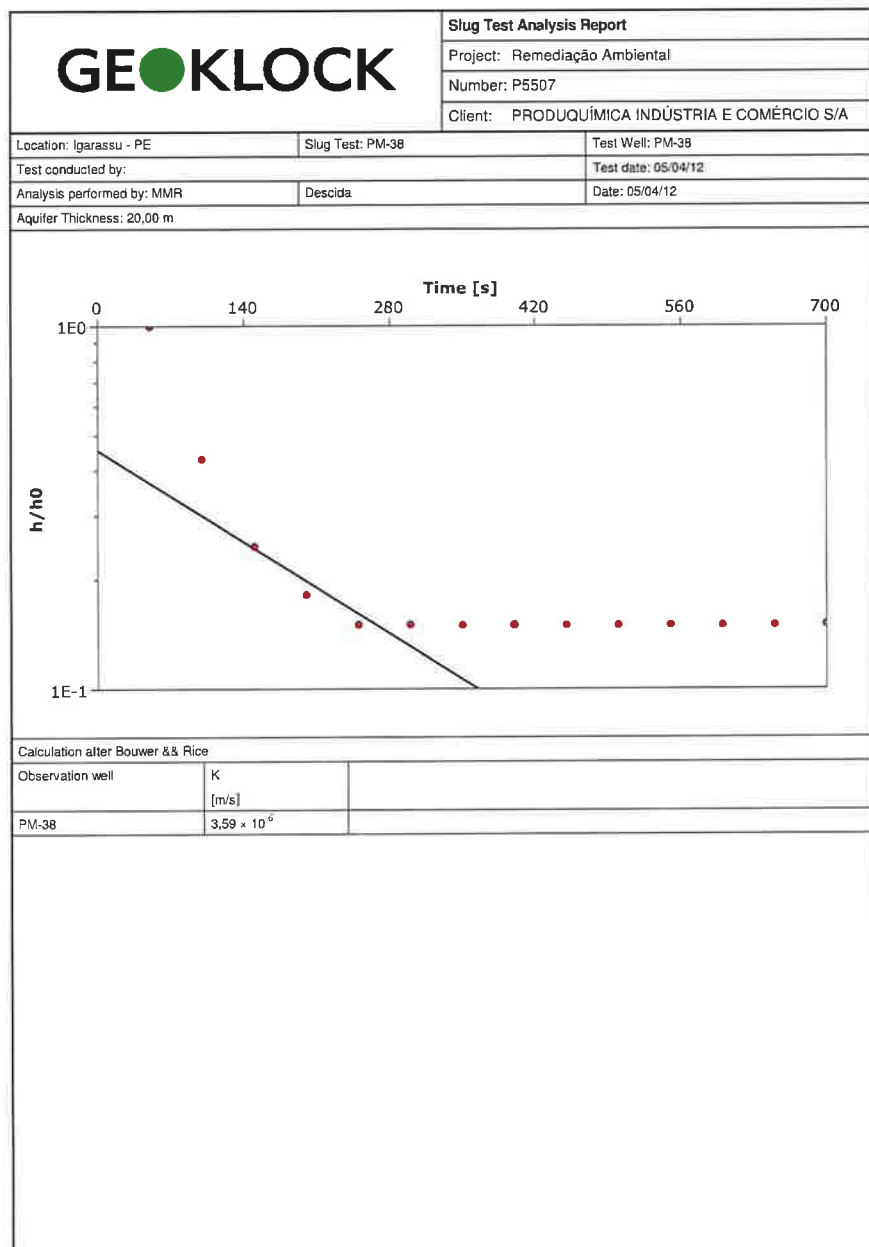


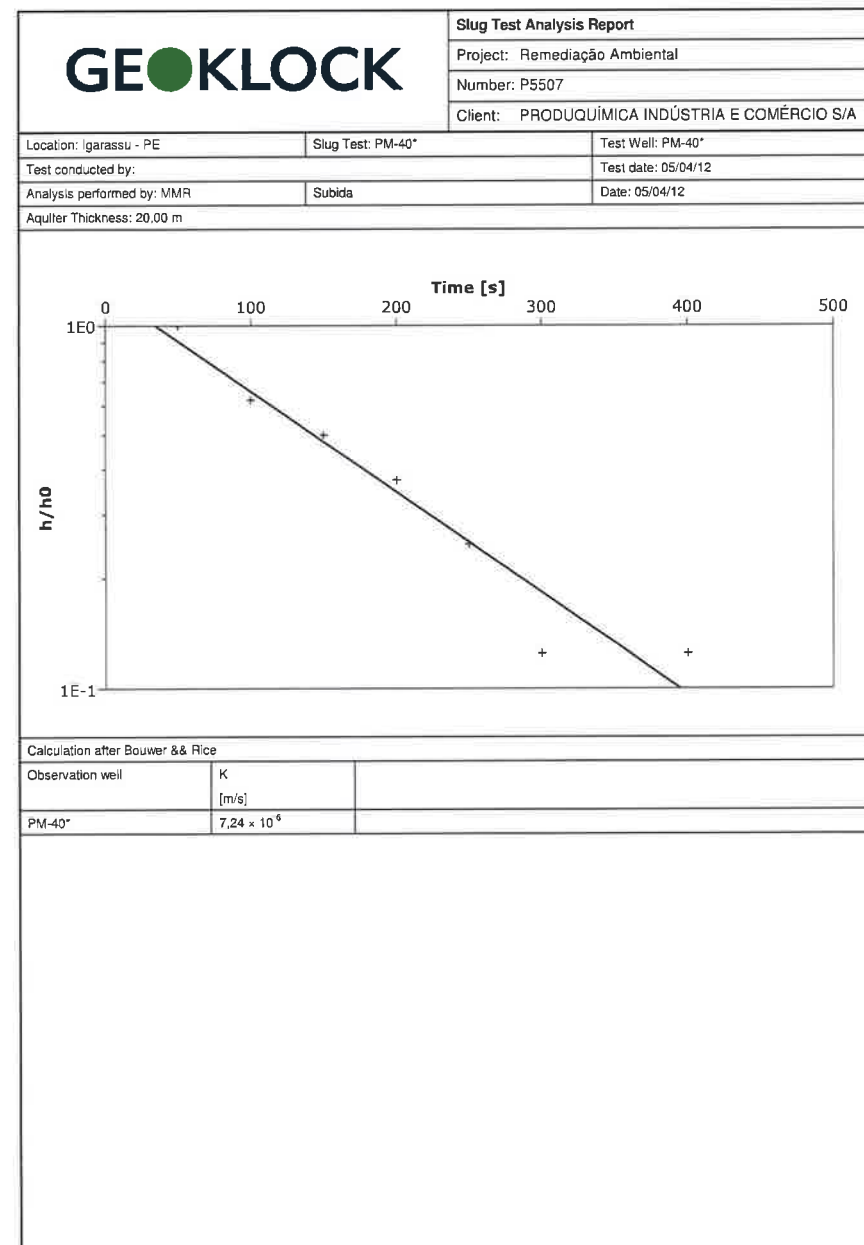
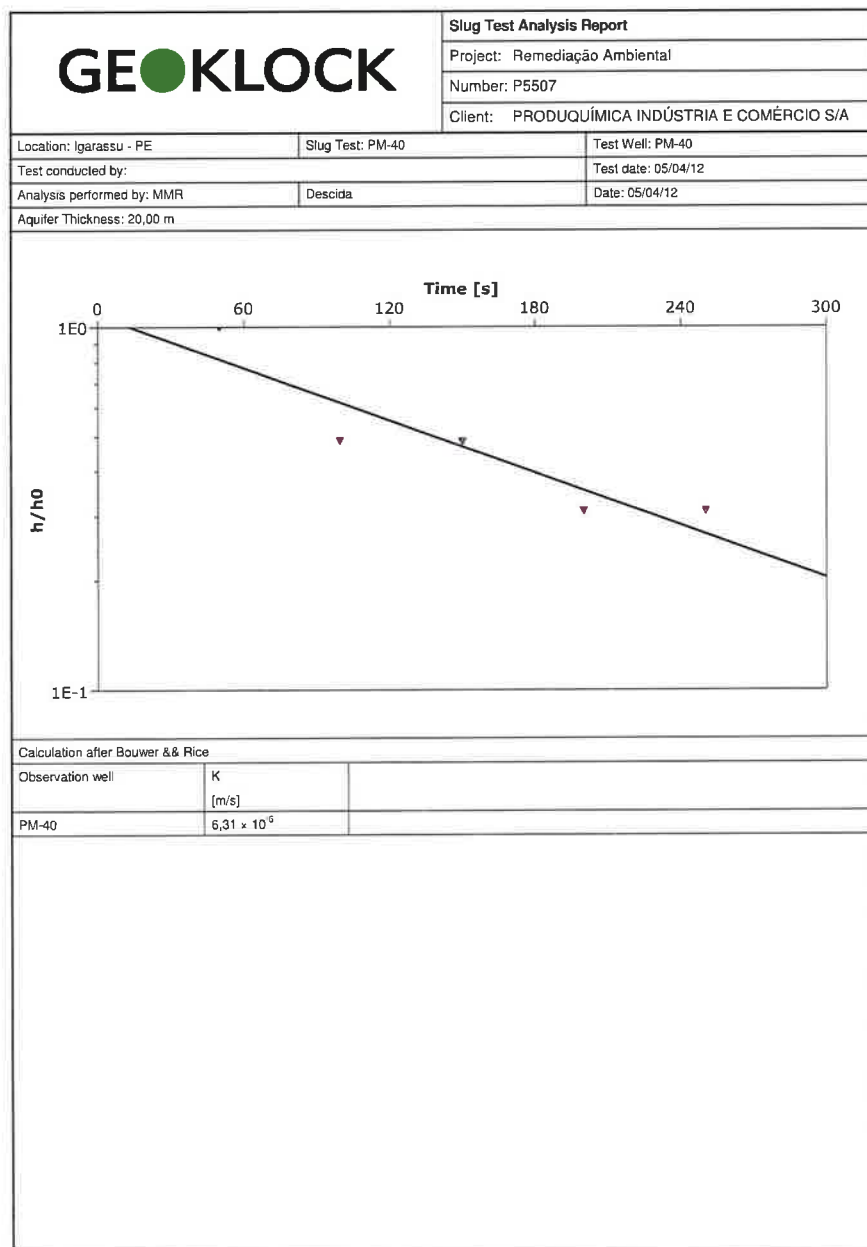












ANEXO 02 - Resultados Analíticos de Água Superficial - METAIS													
Parâmetro	Procedência		RIO (montante)		RIO (intermediário)		RIO (jusante)		AÇUDE		AÇUDE		Referência CONAMA 357/2005
	Amostra		RG-01		RG-02		RG-03		RG-04		RG-05		
	Campanha		fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	
	Unidade	LQ											
Alumínio	µg/L	10	682	7150	484	13100	595	27000	42	484	255	372	100
Antimônio	µg/L	2	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	5
Arsênio	µg/L	2	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	10
Bário	µg/L	10	770	187	93	180	96	150	< LQ	58	86	79	700
Boro	µg/L	10	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	500
Cádmio	µg/L	0,3	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	1
Chumbo	µg/L	2	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	10
Cobalto	µg/L	5	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	50
Cobre	µg/L	1	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	9
Cromo	µg/L	10	< LQ	< LQ	< LQ	15	< LQ	23	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	50
Ferro	µg/L	10	3400	8810	4200	13800	4000	18700	165	780	904	1160	300
Manganês	µg/L	10	149	456	206	395	202	224	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	100
Mercurío	µg/L	0,1	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,2
Molibdênio	µg/L	10	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	-
Níquel	µg/L	10	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	25
Prata	µg/L	5	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	10
Selênio	µg/L	1	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	10
Vanádio	µg/L	10	< LQ	22	< LQ	34	< LQ	50	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	100
Zinco	µg/L	10	< LQ	14	< LQ	25	< LQ	19	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	180

(1) Resolução CONAMA 357 - Março de 2005. Valores Máximos Permitidos (VPM) para Águas Doces - Classe II.

< LQ = Menor que o Limite de Quantificação

n.a. = Parâmetro Não Analisado

( - ) = Parâmetro Sem Padrão de Referência



Concentração Inferior ao Padrão de Referência



Concentração Acima do Padrão de Referência



ANEXO 02 - Resultados Analíticos de Água Subterrânea - METAIS																															
Parâmetro	Procedência		POÇOS PROFUNDOS																		CONTROLE DE QUALIDADE								CONAMA 420 Intervenção (1)	Screenings Levels EPA-2012 (2)	
	Amostra		PM-01		PM-02		PM-03		PM-04		PM-05		PM-06		PM-07		PM-29		PM-32		REPLICA PM-36	REPLICA PM-10	REPLICA PM-31	REPLICA PM-14	BRANCO CAMPO	BRANCO EQUIP.	BRANCO CAMPO	BRANCO EQUIP.			
	Campanha		fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12		ago/12		fev/12		ago/12				
	Unidade	LQ																													
Alumínio	µg/L	10	<LO	50.200	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	23	24	73	<LO	79	<LO	<LO	24	<LO	24	19	118	32	10.000	25.200	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	3.500	37.000
Antimônio	µg/L	5	<LO	86	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	5	15
Arsênio	µg/L	10	<LO	56	<LO	<LO	<LO	17	<LO	<LO	<LO	20	<LO	<LO	<LO	26	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	10	0,05
Bário	µg/L	10	<LO	39	<LO	46	<LO	79	64	103	40	51	<LO	470	<LO	60	37	82	49	39	<LO	130	280	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	700	7.300
Boro	µg/L	10	<LO	178	293	316	<LO	53	274	395	<LO	43	<LO	268	<LO	299	<LO	40	<LO	61	<LO	70	34	303	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	500	7.300
Cádmio	µg/L	5	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	5	18
Chumbo	µg/L	10	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	73,0	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	10	-
Cobalto	µg/L	5	<LO	<LO	40	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	70	11
Cobre	µg/L	10	<LO	na	<LO	na	<LO	na	<LO	na	<LO	na	<LO	na	<LO	na	<LO	na	<LO	na	<LO	135	46	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	2.000	1.500
Cromo	µg/L	10	<LO	57	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	50	-
Ferro	µg/L	10	<LO	2.790	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	5.950	<LO	37	1.740	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	64	<LO	<LO	117	2.030	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	2.450	26.000
Manganês	µg/L	10	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	224	<LO	<LO	50	<LO	<LO	<LO	<LO	50	13	88	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	400	880
Mercurio	µg/L	1	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	43,1	na	na	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	1	0,57
Molibdênio	µg/L	10	<LO	59	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	70	180	
Níquel	µg/L	10	<LO	55	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	150	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	20	-
Prata	µg/L	10	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	50	180	
Selênio	µg/L	10	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	10	180	
Vanádio	µg/L	10	<LO	1.100	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	1.570	<LO	<LO	<LO	<LO	-	78	
Zinco	µg/L	10	<LO	741	<LO	32	<LO	29	<LO	<LO	57	16	<LO	<LO	<LO	28	<LO	49	<LO	16	25	72	64	811	<LO	<LO	<LO	<LO	1.050	11.000	

(1): Resolução CONAMA n420, Dezembro/2009

(2) EPA-ORNL 2012

Concentração Inferior ao Padrão de Referência

Concentração Acima do Padrão de Referência

< LO = Menor que o Limite de Quantificação

n.a. = Parâmetro Não Analisado

( - ) = Parâmetro sem padrão de referência

## ANEXO 02 - Resultados Analíticos de Água Subterrânea - METAIS

Parâmetro	Procedência		POÇOS RASOS																																CONAMA 420 Intervenção (1)	Screenings Levels EPA-2012 (2)
	Amostra		PM-08		PM-09		PM-10		PM-11		PM-12		PM-13		PM-14		PM-15		PM-16		PM-17		PM-18		PM-19		PM-20		PM-21		PM-22					
	Campanha		fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12	fev/12	ago/12				
	Unidade	LQ																																		
Alumínio	µg/L	10	32	n.a.	<LO	n.a.	<LO	32	<LO	67	<LO	18	<LO	<LO	406	22.700	<LO	#####	<LO	<LO	<LO	39.100	<LO	47.300	165	<LO	149	86	59	46	10.600	2.150	3.500	37.000		
Antimônio	µg/L	5	<LO	n.a.	<LO	n.a.	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	164	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	16	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	17	<LO	<LO	5	15		
Arsênio	µg/L	10	<LO	n.a.	<LO	n.a.	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	169	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	48	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	10	0,05		
Bário	µg/L	10	58	n.a.	47	n.a.	<LO	130	<LO	<LO	52	<LO	44	<LO	<LO	139	111	<LO	<LO	115	<LO	323	988	197	21	<LO	30	<LO	45	700	7.300					
Boro	µg/L	10	<LO	n.a.	<LO	n.a.	<LO	66	<LO	24	<LO	13	<LO	<LO	287	<LO	1.260	<LO	24	<LO	103	<LO	256	<LO	36	39	79	<LO	37	<LO	20	500	7.300			
Cádmio	µg/L	5	<LO	n.a.	<LO	n.a.	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	10	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	5	18		
Chumbo	µg/L	10	<LO	n.a.	<LO	n.a.	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	10	-	
Cobalto	µg/L	5	<LO	n.a.	<LO	n.a.	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	35	10	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	70	11	
Cobre	µg/L	10	<LO	n.a.	<LO	n.a.	<LO	135	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	2.000	1.500	
Cromo	µg/L	10	<LO	n.a.	<LO	n.a.	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	50	-	
Ferro	µg/L	10	11.500	n.a.	127	n.a.	<LO	<LO	<LO	1.270	1.400	7.980	10.000	142	<LO	1.820	<LO	<LO	807	442	<LO	161	<LO	<LO	29	<LO	277	259	<LO	<LO	5.230	<LO	2.450	26.000		
Manganês	µg/L	10	72	n.a.	<LO	n.a.	<LO	13	<LO	43	<LO	114	28	<LO	<LO	<LO	915	1.040	967	1.110	<LO	<LO	7	<LO	76	8.36	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	16	<LO	400	880
Mercurio	µg/L	1	<LO	n.a.	<LO	n.a.	51	43,3	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	1.040	967	1.110	<LO	<LO	7	<LO	76	8.36	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	19	<LO	1	0,57
Molibdênio	µg/L	10	<LO	n.a.	<LO	n.a.	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	139	<LO	<LO	<LO	<LO	68	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	70	180
Níquel	µg/L	10	<LO	n.a.	<LO	n.a.	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	130	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	132	<LO	23	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	20	-
Prata	µg/L	10	<LO	n.a.	<LO	n.a.	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	50	180
Selênio	µg/L	10	<LO	n.a.	<LO	n.a.	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	233	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	10	180
Vanádio	µg/L	10	<LO	n.a.	<LO	n.a.	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	1.400	<LO	13.800	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	1.800	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	-	78
Zinco	µg/L	10	<LO	n.a.	51	n.a.	<LO	74	<LO	79	<LO	54	25	<LO	663	<LO	<LO	<LO	31	<LO	294	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	35	<LO	47	194	18	1.050	11.000			

[illegible]

(1): Resolução CONAMA n420. Dezembro/2009

(2) EPA-ORNL, 2012

☐ Concentração Inferior ao Padrão de Referência

 Concentração Acima do Padrão de Referência

< LQ = Menor que o Limite de Quantificação

n.a. = Parâmetro Não Analisado

( - ) = Parâmetro sem padrão de referência

## ANEXO 03 - GRÁFICOS DE ESTABILIDADE (pH x Eh)

Diagramas Eh-pH obtidos no *Geological Surveu of Japan - Atlas of Eh-pH diagrams - 2005*

