

ESTUDO HIDROGEOLÓGICO E HIDROGEOQUÍMICO DA ÁREA LOCALIZADA ENTRE O DEPÓSITO DE LIXO METROPOLITANO DE BELÉM (AURÁ) E O LAGO ÁGUA PRETA

V.E. Bahia, N. Fenzl*, G. Piratoba Morales**

Centro de Pós-graduação em Geologia e Geociências. Universidade Federal do Pará, UFPA
Campus Universitário do Guamá.

Rua Augusto Corrêa, 01. CEP 66075 -110. Caixa Postal 479. Belém, Pará – Brasil
e-mail: *vbahia@ufpa.br, *norbert@ufpa.br, **gundy_morales@yahoo.com.br

Recebido em janeiro de 2006, aprovado para publicação em outubro de 2006

ABSTRACT

The Metropolitan Waste Deposit (Aurá) is located only 1.4 km distant from the Agua Preta (Black Water) Lake, the main source of water supply for the population of Belém (capital of the State of Pará). This fact raised a number of speculations about a possible contamination of the Agua Preta Lake and the aquifers of the area. The main goal of the present study is the hydrogeologic characterization of the area located between the Metropolitan Waste Deposit of Belem (Aura) and the Agua Preta Lake, in order to determine the possible contamination of the local aquifers and the Agua Preta Lake. The hydrogeologic analysis of the area showed a hydraulic gradient of approximately 0.011% and an effective porosity of 28%, the hydraulic conductivity between $4,01 \times 10^{-3}$ e $3,16 \times 10^{-4}$ cm/s shows that the velocity of the groundwater flows is approximately 20.03 m/year, in the east-west and east-south direction. The concentrations of the main indicator of contamination (pH, electric conductivity, alkalinity, ammonia, nitrate, chloride, sodium, calcium, magnesium and potassium) in the groundwater samples collected from the monitoring wells, did not show significant influence of the waste deposit or the local aquifers.

RESUMO

O fato de o Lago Água Preta, principal manancial de abastecimento de água da população residencial da Região Metropolitana de Belém (PA), se encontrar localizado a apenas 1,4 Km do Depósito de Resíduos do Aurá, tem levantado diversas especulações sobre sua possível contaminação em decorrência da proximidade entre ambos. O presente estudo teve como objetivo principal a caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica da área localizada entre o referido depósito de resíduos e o lago, no sentido de determinar a possível influência de seus contaminantes sobre os recursos hídricos subterrâneos da área de estudo, avaliando a possibilidade de os mesmos virem a influenciar no manancial de abastecimento de Belém. Na análise hidrogeológica da área, obteve-se um gradiente hidráulico de aproximadamente 0,011, com valores de porosidade efetiva de 28%, condutividade hidráulica entre $4,01 \times 10^{-3}$ e $3,16 \times 10^{-4}$ cm/s, mostrando que os fluxos subterrâneos se deslocam a uma velocidade de aproximadamente 20,03 m/ano, direcionados no sentido leste-oeste e leste-sul. Os resultados analíticos obtidos com os principais traçadores de chorume (pH, condutividade elétrica, alcalinidade, amônia, nitrato, cloreto, sódio, cálcio, magnésio e potássio) realizados nas amostras de água subterrâneas coletadas nos poços de monitoramento, refletiram características ambientais dos recursos hídricos da área, não evidenciando contaminação por chorume nos mesmos.

INTRODUÇÃO

O Depósito de Lixo Metropolitano de Belém, localizado em Santana do Aurá, foi criado em 1991 e devido a problemas financeiros, seu projeto inicial que incluía uma usina de incineração, uma usina de reciclagem e compostagem e um aterro sanitário não foram viabilizados, tornando o aterro um lixão ao longo dos anos, o qual recebe em torno de 1000 toneladas/dia de resíduos.

O fato do Lago Água Preta, o principal manancial de abastecimento de água da população residencial da Região Metropolitana de Belém, se encontrar localizado a apenas 1,4 km do “Lixão do Aurá”, tem levantado diversas especulações decorrente de sua possível contaminação pela proximidade existente entre ambos. Devido a isso, o presente estudo na área de hidrogeologia e hidrogeoquímica, enfocou uma investigação sobre o estágio atual de deslocamento do fluxo de chorume oriundo do Depósito de Lixo Metropolitano do Município de Belém em direção ao Lago Água Preta, através de uma análise mais aprofundada dos recursos hídricos subterrâneos da área em questão.

ÁREA DE ESTUDO

A Grande Belém abrange os municípios de Belém, que tem como principais distritos Icoaraci e Mosqueiro; Ananindeua e parte de Benevides. O município de Ananindeua é contíguo ao de Belém e possui uma área aproximada de 485 km².

O estudo foi realizado em uma área de 2,56 x 10⁶ m², situada na localidade de Santana do Aurá, no município de Ananindeua, entre o Depósito do Aurá e o Lago Água Preta. Na sua porção central encontram-se extensas áreas pertencentes ao Ministério da Defesa (Exército) e à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA. Ao Sul encontram-se áreas de baixadas cobertas com densa

vegetação que se estendem até o Rio Guamá; a Leste a área limita-se com o Depósito de Resíduos Sólidos do Aurá e a Oeste está o Lago Água Preta. O acesso principal à área é feito por estrada que a corta no sentido norte-sul.

Geologia Local

Predominam na área de estudo, solos do tipo Latossolo Amarelo, seguido do Concrecionário Laterítico, Glay pouco húmico, Podzol Hidromórfico e Areias Quartzosas (Vieira & Santos, 1987) (Figura 1).

A análise dos sedimentos retirados de 5 poços de monitoramento instalados na área de estudo mostra que a subsuperfície local, até a profundidade média de 20m, é essencialmente argilosa. Nos poços encontraram-se argilas de coloração marrom esverdeada, argilas variegadas com concreções ferruginosas (mais abundantes) e cinza esbranquiçadas com tons avermelhados. Intercaladas nas argilas ocorrem pacotes de areia média a fina, quase sempre de espessuras inferiores a 2 metros (Bahia, 2003).

Hidrologia

Os principais aquíferos da Região Metropolitana de Belém são constituídos pelos sedimentos clásticos arenosos do Quaternário e do Grupo Barreiras, que se estendem em geral até profundidades inferiores a 50m. Abaixo de 50m encontram-se aquíferos importantes representados por sedimentos arenosos e calcíferos da Formação Pirabas. A Figura 2 mostra o mapa hidrogeológico da Região Metropolitana de Belém e uma descrição das características físicas dos aquíferos presentes, conforme apresentado por Matta (2002).

Características do Lixo de Belém

O lixo da cidade de Belém é composto principalmente de matéria orgânica (58% do total) e o teor de material reciclável, papel, papelão, plásticos, metais e vidros se encontram em torno de 36%. Seus resíduos sólidos são compostos em sua grande maioria, por lixo público e lixo domiciliar (Tabela 1).

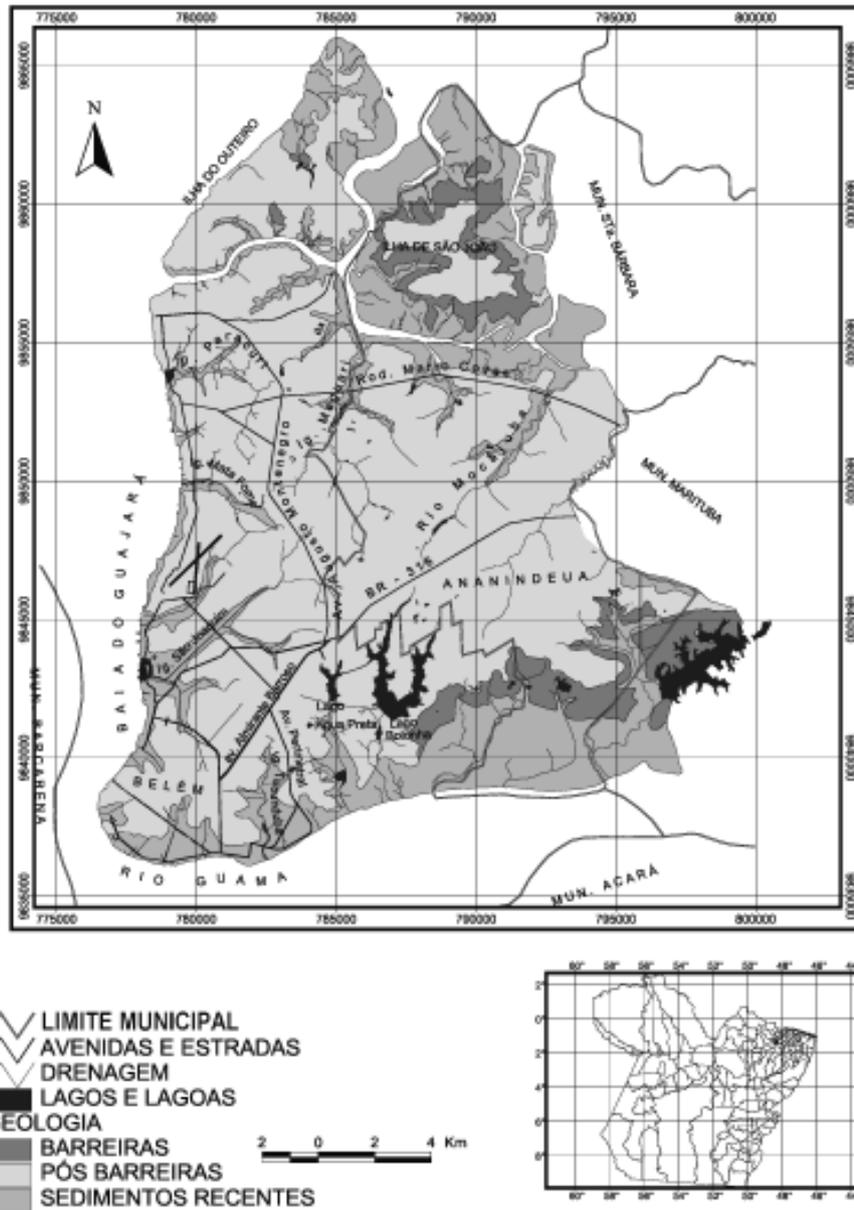


Figura 1: Mapa geológico da Região Metropolitana de Belém (Matta, 2002).

METODOLOGIA

Instalação dos poços de monitoramento

Foram instalados cinco poços de monitoramento na área de estudo (Figura 2). Na construção dos mesmos, foram seguidas as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1997). O nível de profundidade de cada poço foi determinado pela superfície do lençol freático e os filtros foram instalados na espessura total do aquífero.

Foram coletadas amostras de sedimentos a cada metro perfurado ou de acordo com

mudanças litológicas, objetivando a construção dos perfis litológicos dos furos e as análises hidrogeológicas.

Determinação de gradiente hidráulico ("h/L)

O gradiente hidráulico é calculado mediante levantamento topográfico do terreno, em conjunto com a variação do nível estático dos dois poços de monitoramento escolhidos previamente, assim como a distância existente entre eles, que pode ser obtida direta ou indiretamente em mapas.

De posse dos valores referentes à diferença de altura e distância entre os poços de monitoramento, efetua-se o seu cálculo com a equação (1):

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (1)$$

onde: i = gradiente hidráulico; Dh/L = gradiente hidráulico; h_1 = carga hidráulica no poço de referência 1; h_2 = carga hidráulica no poço de referência 2; L = distância entre poço de referência 1 e poço de referência 2.

Ensaio de bombeamento para se determinar a condutividade hidráulica (K)

O ensaio de bombeamento se tornou um método eficiente para se obter os parâmetros de condutividade hidráulica (K), transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S). Com os valores obtidos nos ensaios, há possibilidade de compará-los com os valores obtidos a partir da análise granulométrica.

Foram realizados ensaios de bombeamento em cinco poços de monitoramento existentes na área de estudo, a fim de se obter os valores referentes à condutividade hidráulica e transmissividade (vazão da água que escoar através de uma área unitária por um metro de camada saturada quando o gradiente hidráulico é igual a 1).

Dois ensaios foram realizados em setembro/2002 e os demais em outubro/2002. No decorrer dos ensaios, o rebaixamento dos poços foi monitorado e medido periodicamente com medidor eletro-sonoro, mediante uma vazão constante controlada por períodos de tempo iguais. Os valores coletados foram inseridos no programa computacional Aquifer Test, que utiliza o Método de Jacob (1966) para estimar os valores referentes à condutividade hidráulica.

A equação de Jacob (1966) estabelece que ao se bombear um poço instalado em um aquífero de espessura saturada conhecida (b), com uma vazão constante (Q), pode se obter o valor da transmissividade (T) e através deste valor obter-se o valor da condutividade hidráulica (K).

Coleta de amostras

Foi realizada uma campanha de coleta de água no sistema hídrico subterrâneo, visando obter resultados que indicassem a influência do deslocamento do chorume na área de estudo.

Foram coletadas amostras em todos os poços de monitoramento, onde foram quantificados os parâmetros físico-químicos considerados traçadores de chorume, tais como: pH, condutividade elétrica, alcalinidade, amônia, nitrato, cloreto, sódio, cálcio, magnésio e potássio.

A campanha de coleta de amostragem foi realizada na época de seca, mais precisamente no mês de outubro.

Tabela 1: Participação percentual dos diferentes tipos de lixo da cidade de Belém.

Tipos de lixo cidade de Belém		Composição gravimétrica de lixo de Belém	
		Componentes	% peso (base úmida)
Lixo público	43,73%	Matéria orgânica	58
Lixo domiciliar	33,75	Papel e papelão	14
Lixo de feiras/mercados	3,67%	Plásticos finos e grossos	18
Lixo Industrial/comercial	0,45%	Metais	2
Lixo hospitalar	0,38%	Têxteis, couro e borracha	4
Outros	18,02%	Vidro, terra e pedra	2
		Madeira	1
		Outros	1
TOTAL	100 %	TOTAL	100%

Fonte: PMB (1997).

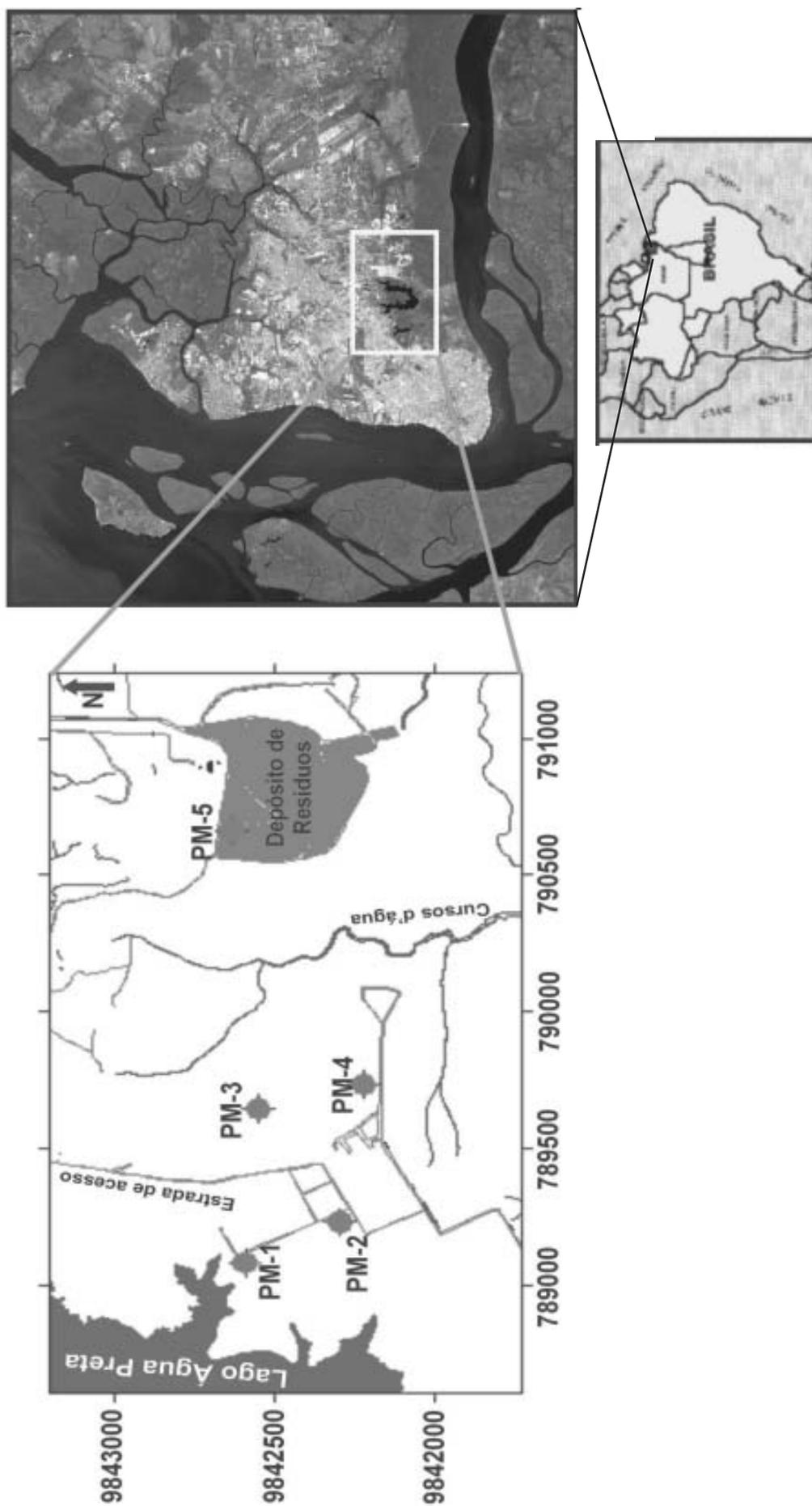


Figura 2: Localização dos poços de monitoramento na área de estudo.

A coleta de água subterrânea através dos poços de monitoramento ocorreu após os mesmos sofrerem um bombeamento prévio, a fim de se garantir a retirada de no mínimo 3 a 4 vezes o volume da coluna de água. Para a coleta utilizou-se um amostrador de PVC e frascos de armazenamento com volumes apropriados.

As amostras de sedimentos foram obtidas de calhas de perfis por ocasião da instalação dos cinco poços de monitoramento (PM-1, PM-2, PM-3, PM-4 e PM-5) que foram construídos na área de estudo. Tais amostras foram retiradas em intervalos variáveis (m), levando-se em consideração as mudanças litológicas ocorrentes. Depois de recolhidas foram devidamente armazenadas em sacos plásticos, identificadas quanto à sua profundidade e transportadas até o laboratório.

Determinação da porosidade (h)

A taxa de acúmulo da água subterrânea depende da natureza e extensão da porosidade primária e secundária nos solos ou rochas. A porosidade é justamente a quantidade em volume de poros vazios ou cheios (líquidos) nos solos e nas rochas. Dá-se o nome de porosidade de uma rocha à relação existente entre o volume dos poros e o volume total, relação esta expressa em porcentagem ou fração decimal (Equação 2 e 3).

$$\eta = \frac{V_v}{V_t} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{V_v}{V_t} * 100 \quad (3)$$

onde: V_v = volume de vazios; V_t = volume total.

O ensaio de porosidade foi realizado utilizando-se amostras deformadas de calhas de perfis de poços construídos no local de estudo utilizando-se o método do picnômetro e através de testemunhos de amostras indeformadas coletadas com cilindro metálico.

Para as amostras deformadas utilizou-se em laboratório dois picnômetros, previamente aferidos, que após serem preenchidos com as

devidas amostras, foram devidamente pesados. Após tal procedimento, em cada picnômetro foi adicionado água até a saturação completa das amostras e novamente pesado. De posse dos valores obtidos com as respectivas pesagens, determinou-se a porosidade de todas as amostras selecionadas mediante a Equação 3.

Para as amostras não deformadas (V_t), um volume conhecido foi submerso em água durante 12 horas. Posteriormente a amostra foi pesada (P_t) e colocada em estufa a 105°C durante 24 horas, resfriada e pesada novamente (P_r) (Equação 4).

$$V_t = P_t - P_r \quad (4)$$

onde: P_t = peso total da amostra saturada com água; P_r = peso real da amostra após 24 horas na estufa a 105°C; V_t = volume total da amostra.

Velocidade Real e Aparente dos fluxos subterrâneos

Do ponto de vista teórico, as forças de movimento dos fluxos ou força hidráulica é a soma da elevação da água e a razão entre a pressão do fluido pelo peso da coluna de água.

A descarga (Q) da água subterrânea pode ser definida como o produto da área da seção transversal ao fluxo (A), o gradiente hidráulico (I) e a condutividade hidráulica (K) ou $Q = K.I.A$ (Equação 5) em que Q representa uma taxa de fluxo volumétrico (por exemplo m^3/dia).

$$T = K * b \quad (5)$$

onde: T = Coeficiente de Transmissividade; b = espessura saturada do aquífero; K = Condutividade Hidráulica.

Esta experiência explicou o comportamento do fluxo laminar na zona saturada e passou a ser conhecida como Lei de Darcy.

Dividindo-se ambos os membros da Equação (5) e substituindo-se a expressão do gradiente hidráulico (Equação 1), chega-se à Equação (6).

$$V = K \frac{\Delta H}{\Delta X} \quad (6)$$

onde: V = velocidade aparente de escoamento;
 K = condutividade hidráulica; $\frac{\Delta H}{\Delta X}$ = gradiente hidráulico.

A velocidade real de escoamento do fluxo de água subterrânea pode ser determinada com a modificação da referida lei em função da porosidade do meio, o que permitiria calcular o deslocamento de poluentes com maior mobilidade geoquímica através das águas subterrâneas (Fetter, 1994) (Equação 7).

$$V_r = \frac{V}{\eta} \quad (7)$$

onde: V_r = velocidade real; h = porosidade efetiva; V = velocidade aparente.

Medição de níveis estáticos dos poços de monitoramento

A determinação dos níveis estáticos nos poços de monitoramento, visa fundamentalmente, a análise do comportamento do lençol freático mediante oscilações hidrometeorológicas durante o decorrer de um determinado período. As medições da variação de profundidade das águas subterrâneas foram obtidas quinzenalmente usando-se um medidor de nível com sinal eletro-sonoro.

Análises químicas em águas subterrâneas

Nas amostras de águas subterrâneas coletadas, foram analisados os parâmetros considerados como traçadores de chorume, tais como: pH, Condutividade elétrica, Alcalinidade total, Oxigênio Consumido, Sódio (Na^+), Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}), Potássio (K^+), Cloreto (Cl^-), Sulfato (SO_4^{2-}), Nitrato (NO_3^-), Nitrito (NO_2^-), Nitrogênio amoniacal (NH_4), Ferro (Fe) e Demanda Química de Oxigênio (DQO). A metodologia usada na determinação dos parâmetros traçadores de chorume está relacionada na Tabela 2.

Os resultados analíticos foram sistematizados e plotados em Diagrama Triangular de Piper, que permite relacionar como mínimo seis (6) dos parâmetros quantificados, visando encontrar similaridade ou diferenças nas amostras de água subterrânea coletadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Perfil litológico dos poços de monitoramento

Os cinco poços de monitoramento instalados na área, foram construídos com base nas normas NBR 13895/1997 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), cujos perfis litológicos e técnicos são apresentados através da Figura 3.

Comportamento do lençol freático

No presente estudo foram executadas dez medidas de nível estático em cada piezômetro, entre os meses de julho e dezembro de 2002, sendo associados os dados obtidos no mês de outubro ao período seco e os do mês de dezembro como período chuvoso, visto que são os que representam menor e maior precipitação respectivamente, dentro do período de medidas.

Percebe-se que a variação da profundidade do lençol freático em todos os piezômetros apresentaram um comportamento atípico, pois não indicaram nenhuma influência pela precipitação pluviométrica, o que indica que os mesmos se comportam como área de recarga das águas subterrâneas e que provavelmente estão sofrendo influência de dois poços domésticos localizados na área de estudo e que são bombeados periodicamente.

O poço de monitoramento PM-1, situado próximo ao Lago Água Preta, não apresentou variações importantes (Figura 4a).

No entanto, o poço de monitoramento PM-2, também situado próximo ao lago, exibiu a mesma tendência da maioria dos poços, mas em comparação com os demais, demonstrou sofrer uma maior influência em seu nível, provavelmente por ser o que se encontra mais próximo de um dos poços domésticos bombeados (Figura 4b).

O poço PM-3 se comportou como o quarto mais raso e apresentou variações quase inexistentes, similar ao poço PM-4, que apesar de ser considerado o mais raso da bateria de poços, também apresentou variações

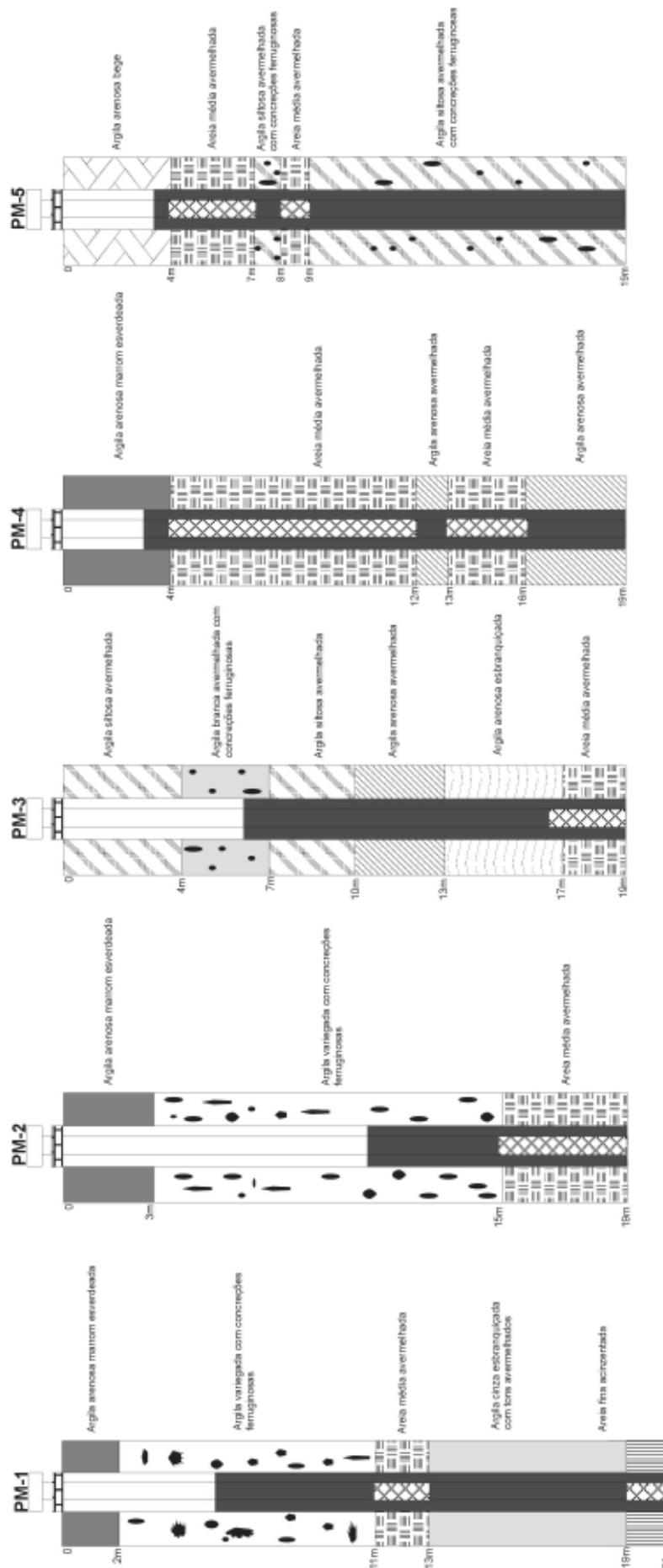


Figura 3: Perfil litológico dos poços de monitoramento (m).

Tabela 2: Metodologia usada na determinação dos parâmetros traçadores de chorume.

ITEM	PARAMETRO	METODOLOGIA
1	pH	Potenciométrico pH-metro digital
2	Condutividade	Elétrico – condutímetro de campo.
3	Alcalinidade total	Volumétrico, segundo <i>Standard Methods</i> APHA-AWWA-WPCF (1980).
4	Oxigênio consumido	Volumétrico, segundo <i>Standard Methods</i> APHA-AWWA-WPCF (1980).
5	Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ , Fe	Espectrometria de Emissão Atômica Seqüencial por Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-AES).
6	Cl ⁻	Volumétrico, segundo <i>Standard Methods</i> APHA-AWWA-WPCF (1980).
7	SO ₄ ²⁻	Turbidimétrico, segundo <i>Standard Methods</i> APHA-AWWA-WPCF, (1980).
8	NO ₃ ⁻	Redução quantitativa (Wood <i>et al.</i> <i>apud</i> Aminot & Chaussepied, 1983).
9	NO ₂ ⁻	Volumétrico, segundo <i>Standard Methods</i> APHA-AWWA-WPCF (1980).
10	NH ₄ ⁺	Método do azul de indofenol, segundo Aminot & Chaussepied, (1983).
11	DQO	Oxidação com dicromato em meio ácido segundo <i>Standard Methods</i> APHA-AWWA-WPCF, (1980).

desprezíveis. Este fato se atribui provavelmente devido a estes dois poços se encontrarem localizados em uma zona intermediária de descarga e recarga (Figura 4c e d).

O poço de monitoramento PM-5, situado na área do Depósito de Lixo Metropolitano de Belém, não apresentou variações importantes, se comportando como a maioria dos demais poços de monitoramento (Figura 4e).

A variação sazonal da pluviosidade não interferiu na variação dos níveis estáticos de todos os poços de monitoramento e, apesar dos mesmos não apresentarem variações importantes, o comportamento similar apresentado por todos eles, sugeriu que os mesmos foram instalados provavelmente em um mesmo aquífero.

Estimativa da condutividade hidráulica

Foram executados ensaios de bombeamento nos cinco poços de monitoramento construídos na área de estudo. No decorrer dos ensaios, o rebaixamento dos poços foi monitorado e medido periodicamente através de medidor eletro-sonoro, mediante uma vazão constante controlada por períodos de tempo iguais.

Os valores coletados foram inseridos no programa computacional Aquifer Test, o qual

utilizou o Método de Jacob (1966) para estimar os valores referentes à condutividade hidráulica, cujos resultados se encontram associados às Figuras 5a, b, c, d e e.

Os valores de condutividade hidráulica obtidos com o referido método, se encontram compatíveis com o ambiente geológico encontrado na área (Fetter, 1994).

Determinação da porosidade

Os valores de porosidade foram estimados mediante a utilização de amostras deformadas e não deformadas que foram coletadas por ocasião da instalação dos poços de monitoramento.

Após o processo metodológico laboratorial, tanto as amostras deformadas quanto as de estrutura não deformadas apresentaram uma porosidade total de 28%. Tal valor corresponde aos valores associados à areia siltosa ou areia argilosa (Heath, 1989).

Os valores de porosidade efetiva apresentados abaixo (Tabela 3) correspondem aos valores de porosidade total obtido a partir dos dois métodos de análises realizadas nas amostras de solo em laboratório.

Analizando os valores de porosidade total obtidos pelos dois métodos aplicados em

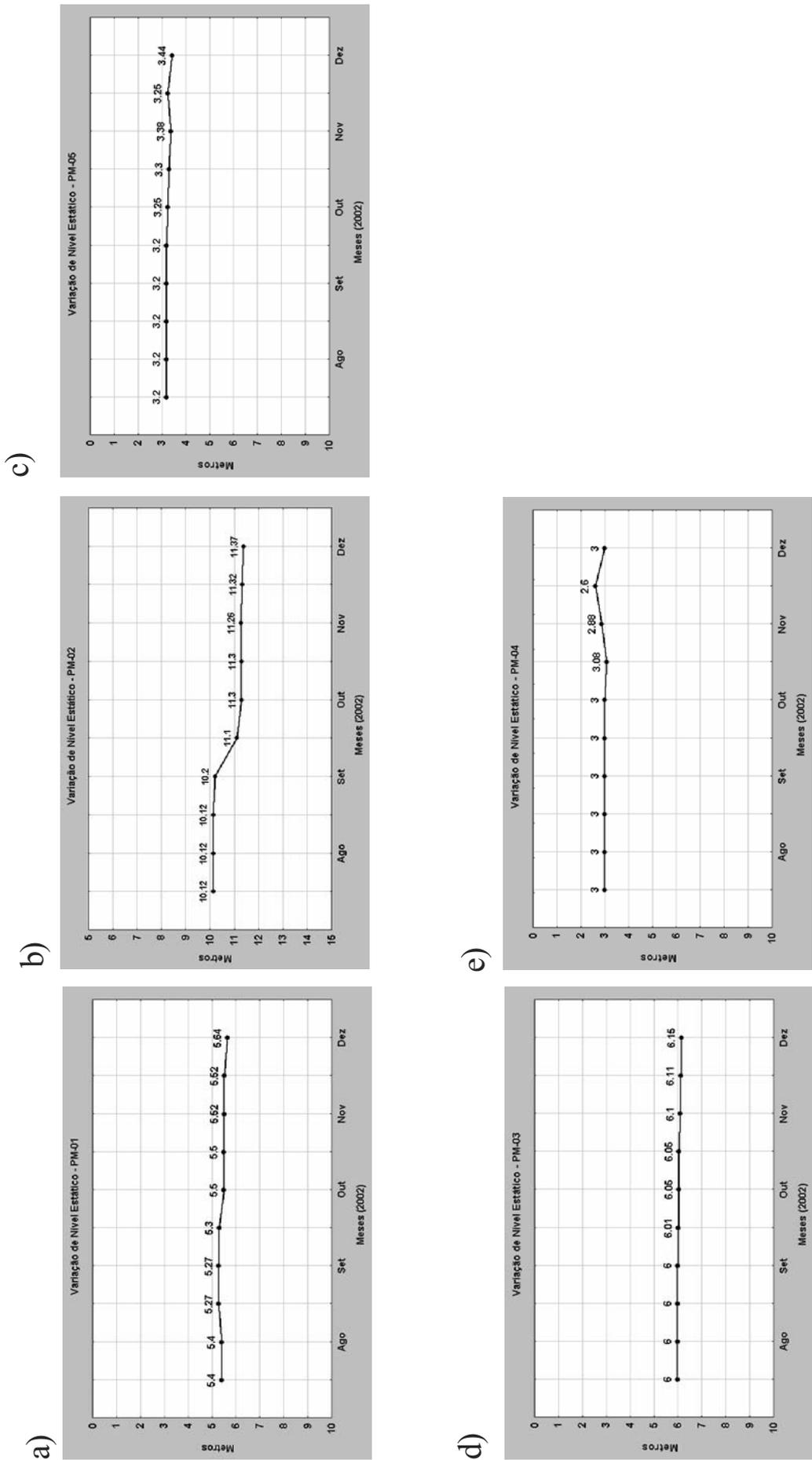


Figura 4: Variação de nível estático (PM-01, a), (PM-02, b), (PM-03, c), (PM-04, d) e (PM-05, e).

laboratório nas amostras de solos coletadas por ocasião da instalação dos poços de monitoramento, não verificou-se nenhuma variação na média percentual para os sedimentos da área estudada. Assim sendo, considerou-se a porosidade total como similar à porosidade efetiva.

Distribuição geométrica dos aquíferos

Os aquíferos localizados na área de estudo são do tipo confinado e se apresentam protegidos por uma camada de material argiloso. A Figura 6 mostra a distribuição geométrica dos aquíferos existentes na área.

Os aquíferos identificados no depósito de resíduos sólidos, são representados pelo aquífero A, que é formado por uma camada arenosa que se encontra protegido na sua parte superior por uma camada de argila arenosa com espessura de 4 metros e em sua parte inferior por uma lâmina de argila siltosa de aproximadamente 1 metro de espessura. Abaixo desta lâmina existe uma outra camada arenosa confinada que apresenta em sua camada inferior um pacote de argila siltosa com aproximadamente 10 metros de espessura.

As análises químicas realizadas nas águas desses aquíferos, mostraram que eles não estão sendo atingidos pelo deslocamento subterrâneo do chorume. Isto ocorre provavelmente pela não conexão dos aquíferos identificados com os que estão sendo atingidos ao sul da área do depósito de resíduos (Piratoba Morales, 2002).

Outros aquíferos detectados estão localizados à oeste e sudoeste da área de estudo. Estes aquíferos são formados por uma camada arenosa confinada, com sua parte superior apresentando camadas de argila que variam de marrom, variegada e siltosas avermelhadas, com espessuras de até 12m. Foi detectada uma camada arenosa confinada, identificada logo abaixo da primeira camada arenosa, com espessura em torno de 3m e separada da primeira camada apenas por uma lâmina de argila arenosa com aproximadamente 1 metro de espessura.

Gradiente hidráulico e velocidade dos fluxos subterrâneos

Foram calculados os gradientes entre todos os poços de monitoramento localizados na área e para efeito de cálculo obteve-se a média entre eles, tanto no período chuvoso, quanto no período seco. O gradiente hidráulico não apresentou alterações significativas no que se refere aos períodos, visto que o valor obtido de 0,011 m/m, ocorreu tanto para a época de chuvas como para a época de seca. Este fato deve estar relacionado à não flutuação do lençol freático, que não experimentou maiores mudanças.

Mediante os valores obtidos de porosidade, condutividade hidráulica e gradiente hidráulico, estimou-se a velocidade do fluxo da água na área.

Para efeito de cálculo, utilizou-se a média dos valores obtidos de condutividade hidráulica através dos ensaios de bombeamento nos cinco poços de monitoramento (Figuras 8a, b, c, d e e), cujo valor médio foi de $1,632 \times 10^{-5}$ m/s. Este valor, em conjunto com o valor de 28% de porosidade e o valor de 0,011 referente ao gradiente hidráulico da área, permitiu o cálculo da estimativa de velocidade dos fluxos (Equação 8).

$$V = K \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l * \eta} \quad (8)$$

onde: $K = 1,632 \times 10^{-5}$ m/s, $h = 0,28$ (28%), $V = (1,632 \times 10^{-5} \text{ m/s}) \times (0,011) / 0,28$ e $V = 6,36 \times 10^{-7} \text{ m/s} = 0,0549 \text{ m/dia} = 20,03 \text{ m/ano}$.

Assim sendo, a estimativa da velocidade dos fluxos laminares da água e dos poluentes de maior mobilidade geoquímica correspondeu a

Tabela 3: Valores representativos da porosidade efetiva para alguns materiais geológicos.

Litologia	Porosidade Efetiva (%)
Argila	1 – 10
Areia	10 – 30
Cascalho	15 – 30
Areia e cascalho	15 – 25
Arenito	5 – 15
Folhelho / Calcário	0,5 – 5

Fonte: Driscoll (1987)

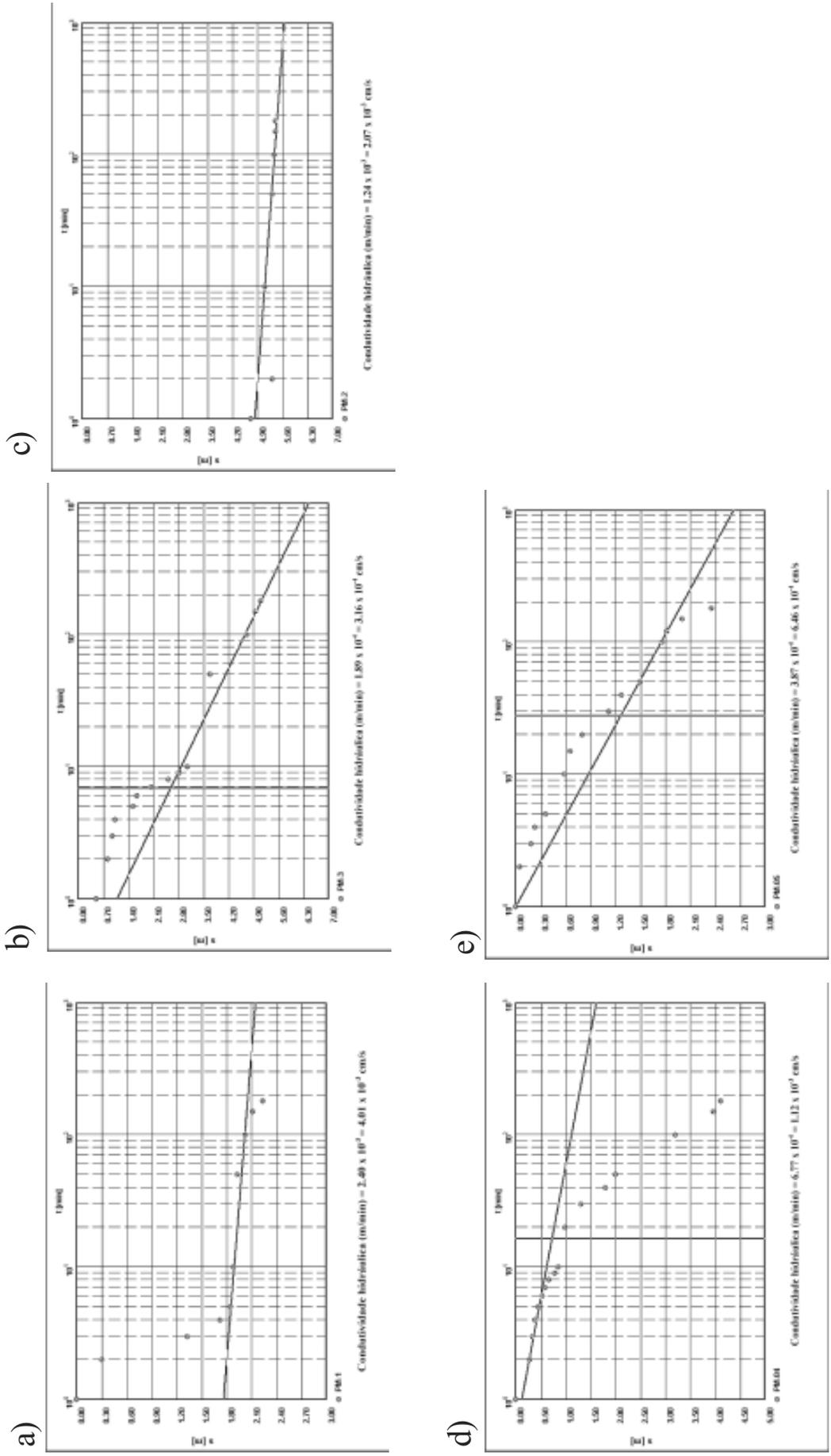


Figura 5: Evolução do rebaixamento do PM-01 (a), PM-02 (b), PM-03 (c), PM-04 (d) e PM-05 (e) em função do tempo de bombeamento (escala semi-logarítmica).

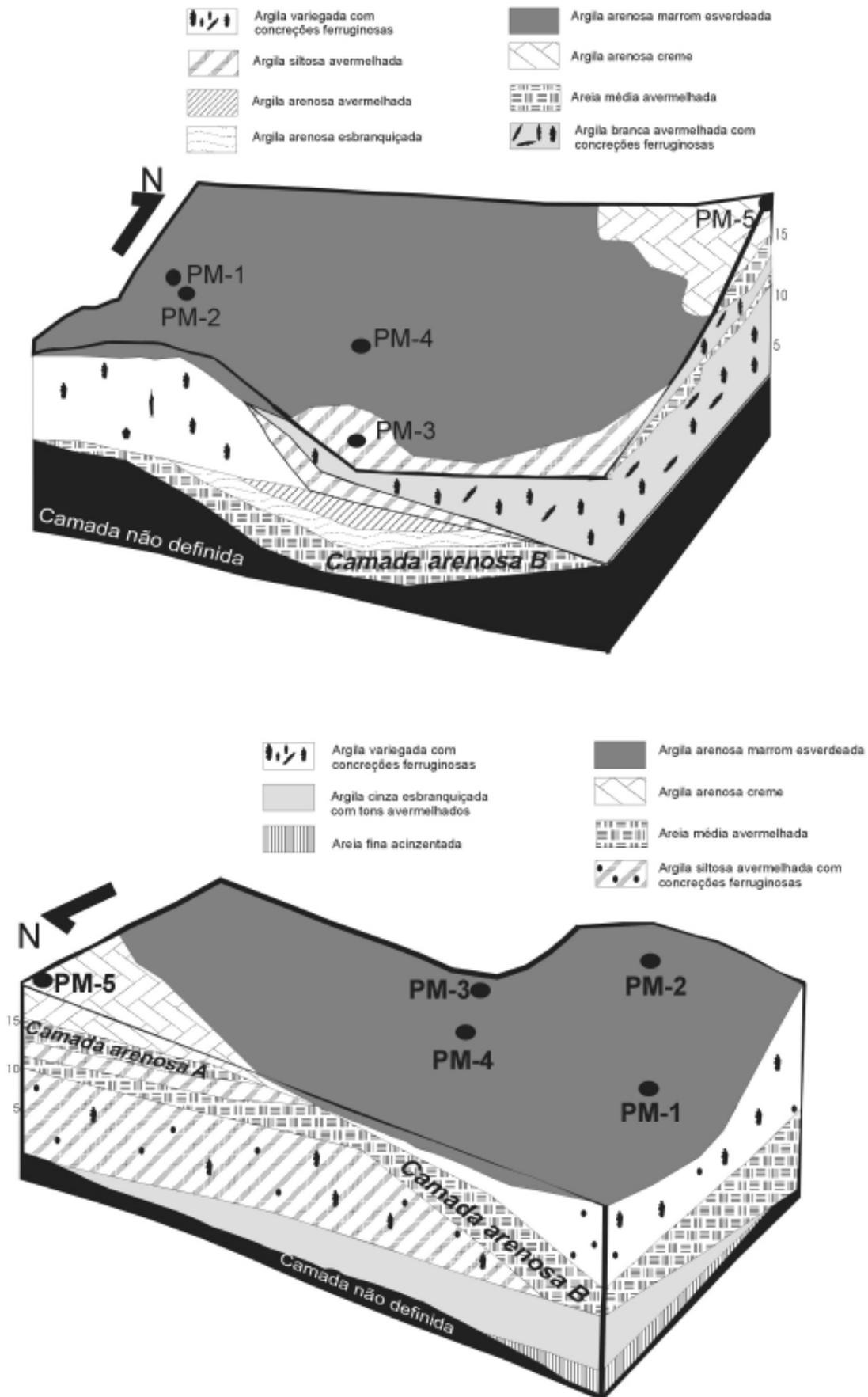


Figura 6: Visão geométrica frontal e lateral dos aquíferos da área de estudo.

20,03 m/ano. Levando-se em conta o início das operações do Depósito de Lixo Metropolitano de Belém em 1991, esses poluentes provavelmente já percorreram uma distância aproximada de 200,3 metros em direção ao sentido principal dos fluxos.

Com as informações obtidas através do levantamento topográfico executado na área, em conjunto com as medidas de profundidade do lençol freático correspondentes ao tempo de seca e de chuva, elaborou-se um modelo tridimensional visando simular o comportamento do lençol freático (Figura 7).

Os resultados hidrodinâmicos obtidos com os métodos diretos, indicaram que o fluxo subterrâneo segue na direção leste-oeste e leste-sul. No entanto, não há evidências de que os fluxos subterrâneos originados no depósito de resíduos se desloquem em direção ao lago, pois devem ser consideradas outras variáveis tais como a existência de outros poços e principalmente do igarapé Santo Antônio, que atua como um sistema drenante dos fluxos superficiais e subterrâneos na área, agindo como uma barreira natural e protetora, o que diminui a possibilidade de os aquíferos serem atingidos por fluxos superficiais e subterrâneos originados do local de descarga dos resíduos sólidos.

Deslocamento subterrâneo do efluente e seu efeito na hidrogeoquímica local

Os resultados analíticos dos diferentes parâmetros encontram-se relacionados na Tabela 4. Do ponto de vista geoquímico, os elementos que apresentaram as maiores concentrações foram os cátions K^+ e Na^+ e os ânions mais abundantes foram Cl^- e o SO_4^{2-} .

Os valores de concentração para DQO, com valores médios de 4,9 mg/l e desvio padrão de 3,44, apresentam pouca variação na maioria dos poços de monitoramento, o que ocorre provavelmente porque pertencem ao mesmo aquífero, ou seja, a mesma origem natural. Os maiores valores da DQO foram encontrados nas amostras de águas subterrâneas do poço de monitoramento PM-5, que está precisamente localizado dentro da área onde se encontram

depositados os resíduos sólidos da Região Metropolitana de Belém. A relação entre DQO e O.C mostra que as espécies inorgânicas encontram-se em maior quantidade que as espécies orgânicas, fato que evidencia pouca influência antropogênica caracterizada por elevadas cargas de matéria orgânica.

Os valores baixos de Condutividade (média de 34,10 $\mu S/cm$), evidenciam a presença de ambientes altamente lixiviados, possivelmente causados pela alta pluviosidade e temperaturas da região amazônica. Esses valores considerados baixos de Condutividade, é reflexo dos baixos valores de íons dissolvidos (Cl^- e SO_4^{2-}), que causam uma baixa carga iônica na solução. Os valores de Condutividade observados foram um pouco menores que os observados nos Igarapés Santo Antônio e Aurá na época de chuva com valores médios variando entre 58 e 70 $\mu S/cm$. Segundo Piratoba Morales (2002), os valores da condutividade elétrica se apresentam mais próximos dos valores medidos nos lago Água Preta que mostram valores médios variando entre 22 e 34 $\mu S/cm$.

Os compostos nitrogenados NO_2^- , NH_4^+ , NO_3^- (média de 0,05, 0,05 e 1,2 mg/l respectivamente) apresentaram baixa concentração, não ultrapassando os limites permitidos (CONAMA, 1986; WHO, 1993). Esta concentração pode significar a ausência de fontes antropogênicas próximas, sendo considerados como de origem natural. Em geral os valores de NO_3^- e NO_2^- observados foram maiores do que os observados no Igarapé Santo Antônio de Aurá, rio Aurá, rio Guamá e lago Água Preta, enquanto que os valores de NH_4^+ observado foram bem menores nas amostras de águas superficiais e do lago referenciado (Piratoba Morales, 2002).

A concentração de NO_3^- é maior do que NO_2^- , NH_4^+ , mostrando uma maior influência natural em relação com a antropogênica, fato que é refletida nos baixos valores de Oxigênio Consumido, mostrando baixa presença de matéria orgânica.

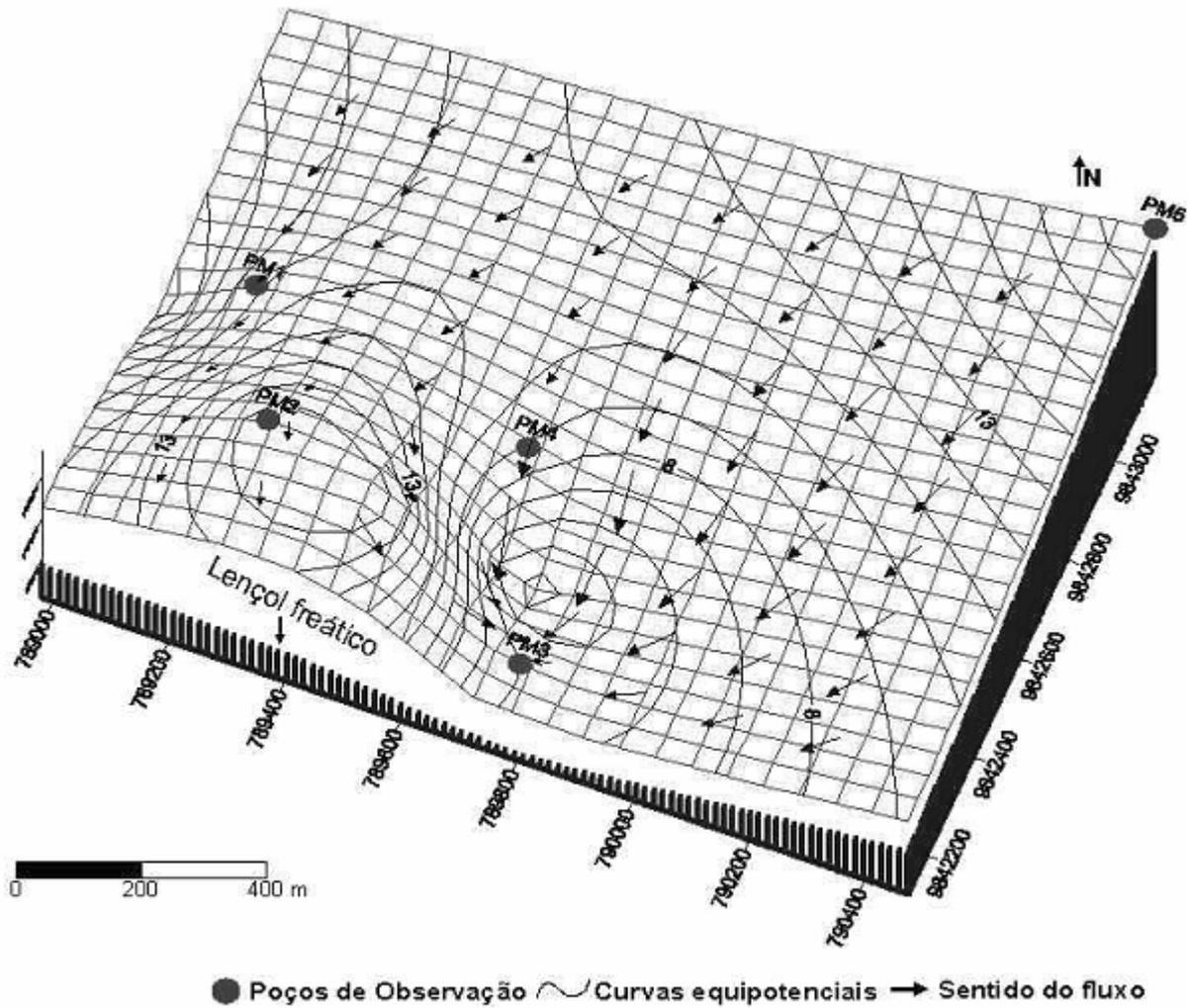


Figura 7: Modelo tridimensional do lençol freático e topografia.

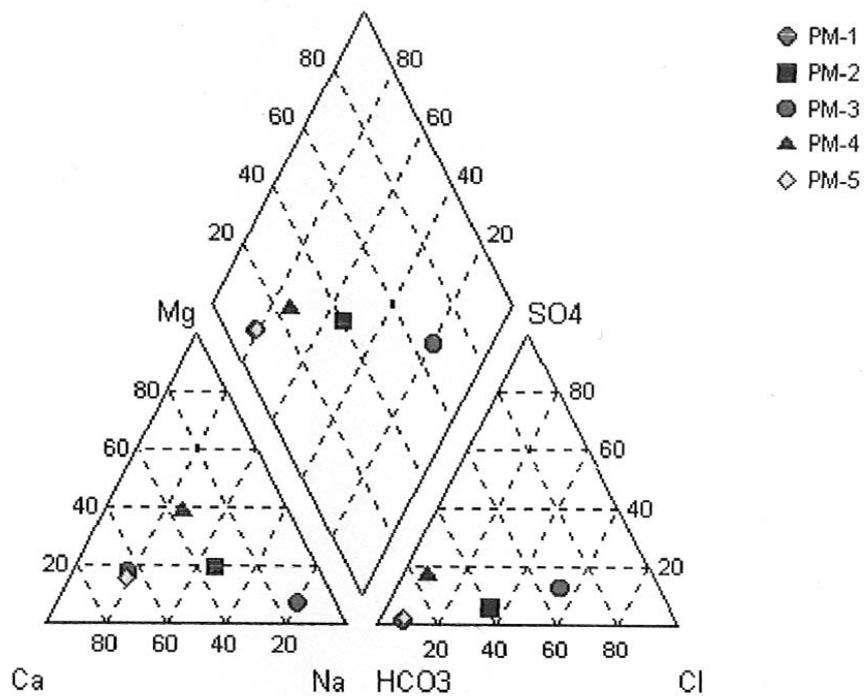


Figura 8: Diagrama de Piper que mostra o comportamento dos traçadores de chumbo (em Eqgrama).

Tabela 4: Concentração dos elementos nas amostras de água coletadas nos poços de monitoramento da área de estudo.

Parâmetro	PM-1	PM-2	PM-3	PM-4	PM-5	Média	*D. P
NO ₂ (mg/l)	0,05	0,03	0,01	0,13	0,01	0,05	0,05
NH ₄ (mg/l)	0,15	0,02	0,05	0,07	0,04	0,07	0,05
NO ₃ (mg/l)	1,06	1,12	0,47	3,07	2,98	1,74	1,20
Cl ⁻ (mg/l)	8,17	8,49	8,17	8,17	8,17	8,23	0,14
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	2,65	1,89	1,95	3,01	2,61	2,42	0,48
Na ⁺ (mg/l)	7,7	1,65	1,39	1,12	1,41	2,65	2,83
Mg ²⁺ (mg/l)	0,26	0,37	0,71	0,57	0,6	0,50	0,18
Ca ²⁺ (mg/l)	0,32	1,08	4,26	1,81	4,26	2,35	1,82
K ⁺ (mg/l)	0,3	0,47	1,09	0,86	0,7	0,68	0,31
DQO (mg/L)	4,6	4,6	5,6	4,7	11,2	4,9	3,44
Oxig.Cons. (mg/l)	0,46	0,95	1,37	0,32	4,36	1,49	1,66
Fe sol. (mg/l)	0,52	0,61	0,21	0,41	0,08	0,37	0,22
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /l)	8,61	25	155	46,6	154,5	77,94	71,40
Condutividade	28,6	31,4	45,9	32	32,6	34,10	6,77
pH	4	3,85	5	4,6	5,2	4,53	0,60
Temperatura	27,5	27,2	27,3	26,9	28,5	27,48	0,61

*D.P.: Desvio Padrão

Os valores de pH são ácidos, indicando que os elementos alcalinos (Na⁺, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺), de alta mobilidade geoquímica, foram lixiviados. Isto é comprovado pelos valores de alcalinidade relativamente baixos, apresentados pelos poços PM-1, PM-2 e PM-4. Esses elementos passam pelo processo de hidrólise, originando um pH ácido e fora dos padrões de qualidade legislados pelo CONAMA (1986) e WHO (1993). Os valores de pH na faixa ácida são similares com os valores de pH observados nos recursos hídricos superficiais da área e do lago Água Preta segundo os resultados de Piratoba Morales (2002).

Os valores obtidos com os diferentes parâmetros, foram plotados no programa computacional AquaChem, elaborando-se o gráfico de Piper (Figura 7d), sugerindo que as amostras de água são dos tipos bicarbonatadas, cálcicas e sódicas, mostrando uma influência das características geoquímicas da área.

CONCLUSÕES

Na análise da distribuição geométrica dos aquíferos, percebeu-se que o tipo de aquífero predominante na área é do tipo confinado, protegido com camadas de material argiloso que variam de 4 a 17 metros.

Ensaio de bombeamento realizados nos piezômetros construídos na área de estudo apresentaram valores de condutividade hidráulica entre $4,01 \times 10^{-3}$ a $3,16 \times 10^{-4}$ cm/s, valores de porosidade efetiva de aproximadamente 28%, valor médio do gradiente hidráulico de 0,011, mostrando que os fluxos subterrâneos se deslocam a uma velocidade de aproximadamente 20,03 m/ano. As características hidrogeológicas da área associados ao tempo de funcionamento do depósito de lixo, indicaram que uma eventual pluma de contaminação originada na área de depósito dos resíduos sólidos tardaria 70 anos para atingir o lago.

Os resultados hidrodinâmicos obtidos com os métodos diretos, indicaram que o fluxo subterrâneo segue na direção leste-oeste e leste-sul. No entanto, não há evidências de que os fluxos subterrâneos originados no depósito de resíduos se desloquem em direção ao Lago Água Preta.

Os resultados analíticos dos principais traçadores de chorume (pH, condutividade elétrica, alcalinidade, amônia, nitrato, cloreto, sódio, cálcio, magnésio e potássio), realizados nas amostras de água subterrâneas, coletadas nos piezômetros, refletiram características

naturais e ambientais dos recursos hídricos da área, não evidenciando deslocamento da pluma de contaminação na direção dos lagos.

Numa análise dos parâmetros geoquímicos em conjunto com o sentido dos fluxos subterrâneos, constatou-se que apesar dos fluxos se direcionarem para o lago Água Preta, não há indicadores de contaminação, visto que os resultados das análises de amostras de água do poço de monitoramento PM-4, localizado entre os poços PM-1 e PM-5, não mostraram evidência de poluição. Uma das razões que explica esta situação é a existência de outros poços ativos na área e principalmente

a presença do igarapé Santo Antônio, que atuam como sistema drenante dos fluxos superficiais e subterrâneos na área. Assim, o igarapé Santo Antônio parece atuar como um dreno natural e protetor, diminuindo a possibilidade dos aquíferos localizados mais à oeste da área de estudo, serem atingidos por fluxos superficiais e subterrâneos originados do Depósito do Aurá.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq – Conselho Nacional de Pesquisa, pelo financiamento do referido projeto de estudo através do Processo Nº 476923/01-8.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. (1997) Solo - Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem - Procedimento. Rio de Janeiro, NBR 13895, 21p.
- BAHIA, V. E. (2003) Estudo hidrogeológico da área localizada entre o Depósito de Lixo Metropolitano de Belém (Aurá) e o Lago Água Preta. Dissertação de Mestrado. Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 117 p.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). (1986) Resolução Nº 20. Ministério do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Diário Oficial República Federativa do Brasil, Poder Executivo., 11356p.
- DRISCOLL, G. (1987) Groundwater and Wells. 2ed. St. Paul: Johnson Division., 1088p.
- FETTER, C.W. (1994) Applied Hydrogeology. 3 ed. New Jersey., 691p.
- HEATH, R.C. (1989) Basic Ground-Water Hydrology. North Carolina., United States Geological Survey Water-Supply Paper 2220. 84p.
- JACOB, C.E. (1966) Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. Transactions Am. Geophysical Union., 36:95-100.
- MATTA, M.A. DA S. (2002) Fundamentos hidrogeológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos da Região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil. Tese de Doutorado. Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 292p.
- PIRATOBAMORALES, G. (2002) Avaliação ambiental dos recursos hídricos, solos e sedimentos na área de abrangência do Depósito de Resíduos Sólidos do Aurá. Tese de Doutorado. Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 220p.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE BELÉM. (1997) Projeto Técnico: Saneamento Ambiental do Complexo de Destino Final de Resíduos Sólidos do Aurá-Belém-PA., 340p.
- VIEIRA, L.S. & SANTOS, P.C.T. (1987) Amazônia: seus solos e recursos naturais. Agronômica Ceres., 416p.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION- WHO. (1993) Guidelines for drinking-water quality. Draft Manuscript, v. 1-2, p.1-8.

(Footnotes)

To whom the correspondence should be sent: vbahia@ufpa.br