

MONITORAMENTO DA ZONA NÃO SATURADA: UM ESTUDO DA HIDRÁULICA E HIDROQUÍMICA NA ESTAÇÃO EXPERIMENTAL DE URÂNIA, SÃO PAULO, BRASIL

Bertolo, Reginaldo A.¹ & Hirata, Ricardo C. A.²

Abstract - Groundwater geochemistry evolution through unsaturated zone has been studied at an experimental station in Urânia municipality, São Paulo State, Brazil. The aim of this publication is to present a brief description of the facility, installation procedures of the unsaturated zone monitoring equipment and water sampling. 12 tensiometers and 12 suction lysimeters were installed (from 0.5 to 9 m deep) in a large-diameter borehole of 1.5 m diameter and 10 m deep. Another 6 tensiometers and 6 suction lysimeters were installed, 3 m apart from the borehole, at 0.5 and 1.0 m depth from surface.

Tensiometer measurement and suction lysimeter sampling results have indicated a great lateral variability of capillary pressures, ion concentration and soil-pore water distribution. The causes of these variabilities have been related to natural soil heterogeneity (macropore effect), well construction problem and, mainly, deep root activities. The deep root activities are due to a mango tree located approximately 10 m from the borehole. During the dry season, the tensiometers located closer to the tree present an average capillary pressure of 500 mmHg, in opposition to 400 mmHg in tensiometers in the other side. The unsaturated-pore water quality also showed compositional variations related to the root activities. Higher concentrations of H^+ , HCO_3^- , CO_2 ($5,10E-07$ mol/L, $9,31E-04$ mol/L, $2,78E-02$ mol/L), and lower values of NO_3^- ($0,78E-04$ mol/L), in comparison to the concentrations of H^+ ($2,29E-07$ mol/L), HCO_3^- ($4,00E-04$ mol/L), CO_2 ($6,33E-03$ mol/L) and NO_3^- ($5,29E-04$ mol/L), have indicated that the root respiration increases the presence of CO_2 , with elevation of HCO_3^- , and H^+ . NO_3^- is used as nutrient by plants.

¹ Hidrogeólogo e doutorando pelo Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo. Caixa Postal 11348 CEP 05508-900, São Paulo, SP, Brasil. Fone 55.11.9970.3313. Fax 11.278.9107. Email: rebertolo@originet.com.br

² Professor do Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo. Caixa Postal 11348 CEP 05508-900, São Paulo, SP, Brasil. Fone 55.11.818.4230. Fax 55.11.818.4207. Email: rhirata@usp.br

1. APRESENTAÇÃO

A água da chuva ao infiltrar-se na zona não saturada sofre a primeira mais intensa modificação na sua composição química, decorrente das interações conjuntas da água com os minerais das rochas em processo de intemperismo, com o meio gasoso nos poros da zona não saturada, com a matéria orgânica e com o meio biótico, presentes principalmente nos primeiros metros de profundidade do solo.

O entendimento mais aprofundado desses mecanismos de interação da água da zona não saturada é, por sua vez, importante na determinação da vulnerabilidade natural de um aquífero à poluição, que pode ser definida como sendo uma interação entre o grau de acessibilidade hidráulica da zona não saturada à penetração de contaminantes e a capacidade de atenuação destes contaminantes pelos materiais da zona não saturada, como resultado de sua retenção física e reações químicas com as substâncias infiltradas (Foster & Hirata, 1988).

Tendo como meta final a execução de uma avaliação de detalhe do grau de vulnerabilidade natural de um ponto no Aquífero Adamantina, uma estação experimental de investigação da zona não saturada foi instalada na cidade de Urânia, situada 600 km a noroeste da cidade de São Paulo (Figura 1). A cidade foi escolhida para as pesquisas devido ao histórico de ocorrência de cromo de origem natural na água dos poços. Através dessa estação estão sendo obtidas informações sobre a hidráulica e sobre a evolução da composição química da água da zona não saturada.

A estação experimental consiste de um poço escavado de 11 metros de profundidade e revestido com anéis de concreto, onde foram instalados tensiômetros e lisímetros de sucção ao longo de sua parede. Por se tratar de uma técnica de monitoramento não usual para um estudo executado na escala de detalhe, este trabalho objetiva informar sobre os critérios de construção do poço, de instalação e de monitoramento dos equipamentos.

Neste trabalho são descritos e discutidos os critérios de locação da estação experimental, os trabalhos de perfuração, revestimento e acesso ao poço, e os procedimentos de instalação e pré-instalação dos equipamentos de monitoramento. São também discutidas as questões sobre as variabilidades de tensão capilar e de concentração iônica da água ao longo do perfil não saturado, bem como questões sobre representatividade de amostras de água coletadas.



Figura 1 – Localização do município de Urânia

2. CRITÉRIO DE LOCAÇÃO DA ESTAÇÃO

O principal critério para a locação do poço era de que este deveria estar situado sobre a zona de contribuição (ZOC) de um poço profundo da SABESP com histórico de ocorrência de elevados índices de cromo na sua água, já que a investigação da zona não saturada também objetiva avaliar as causas do aparecimento do cromo na água subterrânea. Desta forma, o local de execução do poço escavado deu-se ao lado do poço SABESP PP-06 e no interior da área cercada ao redor deste poço. Este local foi o escolhido por ser de propriedade da SABESP, o que facilita o monitoramento dos equipamentos por longos períodos, e por atender a questões de logística e segurança.

O método de monitoramento de tensão capilar e de coleta de amostras de água através de equipamentos instalados na parede de um poço escavado justifica-se pois previa-se que o nível d'água estaria abaixo dos 7 metros de profundidade, o que implicaria em dificuldades nas amostragens de água através dos lisímetros, caso estes estivessem instalados de forma tradicional, junto à superfície. A literatura internacional

registra trabalhos científicos que atestam a eficiência desta forma de monitoramento (Zilberbrand & Gvirtzman, 1996).

3. PERFURAÇÃO, REVESTIMENTO E ACESSO AO POÇO

O poço foi escavado manualmente no diâmetro médio de 1,75 metro e atingiu a profundidade de 11,0 metros, sendo que o nível d'água foi atingido a 9,78 metros. O diâmetro do poço foi determinado para permitir a instalação e monitoramento dos equipamentos. O critério utilizado para a interrupção da escavação foi o de se atingir um substrato que pudesse sustentar o peso dos tubos de revestimento, o que ocorreu a 11 metros, em um estrato de arenito duro. A Figura 2 apresenta os detalhes construtivos do poço.

A descrição do material perfurado dá conta de larga predominância de areias finas quartzosas mais ou menos siltosas ao longo do perfil (Tabela 1).

TABELA 1 – DESCRIÇÃO DO MATERIAL DE PERFURAÇÃO

Profundidade (m)	Material	Descrição
0,0 – 0,35	Aterro	Areia fina siltosa vermelha homogênea
0,35 – 1,20	Solo – Horizonte A	Areia fina siltosa marrom escuro com matéria orgânica, raízes e muitos macroporos verticais (canais)
1,20 – 4,50	Solo – Horizonte B	Areia fina siltosa de marrom escuro no topo para claro e vermelho na base, com raízes e com macroporos verticais diminuindo em intensidade e tamanho do topo para a base.
4,50 – 10,50	Manto de Intemperismo – Horizonte C	Areia fina siltosa com clastos dispersos de caulim e níveis de areia fina a média bem selecionada. Cor dos níveis alterados variando de vermelho no topo para vermelho escuro na base. Macroporos verticais de origem animal ou vegetal eventualmente ausentes a partir dos 7 metros.
10,50 – 11,20		Arenito duro silicificado
11,20 – 11,50	Sedimento	Arenito fino a médio, branco

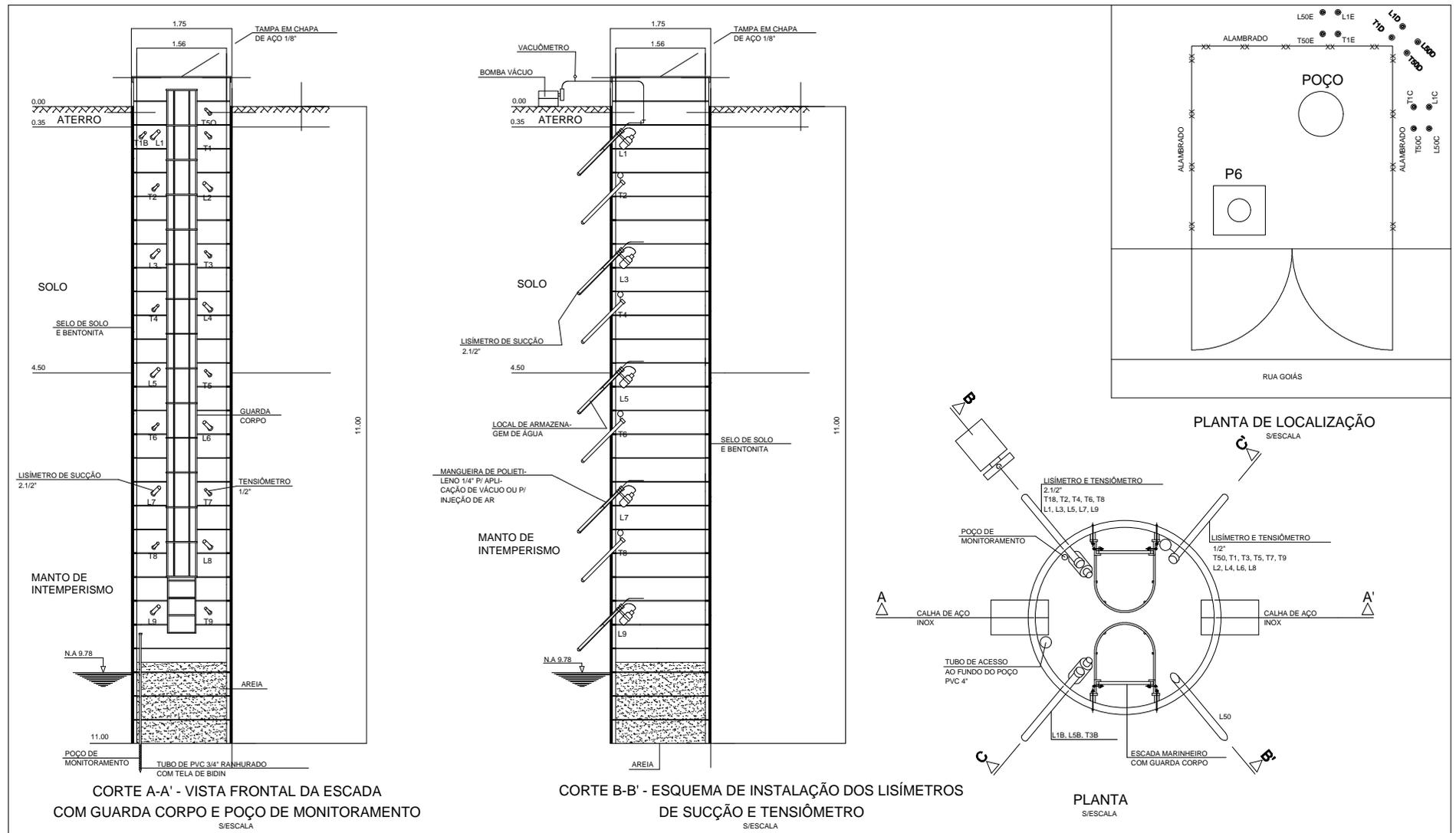


Figura 2 – Estação experimental de investigação da zona não saturada - Urânia – SP.

Durante a perfuração, foram coletadas 13 amostras de solo deformadas para análise granulométrica, análise química (plasma) e análise mineralógica, através de difração de raio X e microscopia óptica e eletrônica. Estas visam estudar a geoquímica de intemperismo. Outras 7 amostras de solo indeformado foram coletadas para a determinação, em laboratório, dos parâmetros condutividade hidráulica saturada (vertical e horizontal), densidade aparente, porosidade total e as curvas de tensão matricial *versus* umidade. Estes ensaios objetivam modelar o fluxo de água na zona não saturada.

No revestimento do poço foram utilizados anéis de concreto armado e reforçado de 1,62 metro de diâmetro externo. O último anel possui uma elevação de 0,5 metro da superfície do solo, para a colocação da tampa (Figura 2 – Corte A-A'). O espaço anelar entre a parede da perfuração e o anel de revestimento no trecho acima do nível d'água foi preenchido com uma mistura de bentonita e o próprio solo perfurado. Este procedimento promove a impermeabilização da parede do poço, evitando que a água da zona não saturada possa entrar no poço através do espaço existente entre um anel e outro, o que causaria interferências nas leituras dos tensiômetros e perdas de água de amostragem dos lisímetros de sucção. Abaixo do nível d'água, o preenchimento do espaço anelar se deu com o próprio material da perfuração.

O acesso ao interior do poço se dá através de duas escadas de ferro com guarda corpo de 9,5 metros de comprimento cada, situadas uma oposta à outra. A boca do poço é fechada por uma tampa em chapa de ferro redonda de 1/8" de espessura e 1,68 metro de diâmetro (Figura 2).

O fundo do poço abaixo do nível d'água foi aterrado com areia grossa limpa desde os 11,0 até 9,6 metros. O aterramento justifica-se para garantir a não contaminação direta do aquífero freático durante o manuseio dos equipamentos instalados no poço.

4. INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE MONITORAMENTO

No interior do poço escavado foram instalados os equipamentos para a coleta de amostras (lisímetros de sucção) e para o monitoramento da tensão matricial da zona não saturada (tensiômetros). A água do aquífero freático também pode ser amostrada, através de um poço de monitoramento no fundo da obra.

Apresenta-se a seguir uma descrição técnica dos equipamentos instalados, bem como do procedimento de pré-instalação e de instalação.

4.1. POÇO DE MONITORAMENTO

O poço de monitoramento do aquífero freático é constituído por um tubo de PVC branco de ¾" com ponteira, 2,5 metros de comprimento e 0,5 metro de seção filtrante envolta por uma manta de bidim. Após os trabalhos de escavação, foi realizado um furo de sondagem de 0,5 metro de profundidade em uma das surgências do poço, dentro do qual foi colocada a seção filtrante do poço de monitoramento, que atingiu a profundidade total de 11,5 metros (Figura 2, Corte A-A').

4.2. TENSÍOMETROS

O tensiômetro é uma cápsula de cerâmica conectada a um vacuômetro através de um tubo de PVC com água. A cápsula de cerâmica, enterrada no solo até a profundidade desejada, transmite a tensão da água do solo para o vacuômetro. O monitoramento do tensiômetro objetiva a obtenção da componente de pressão de fluido do solo, que corresponde à medida da tensão negativa da água do solo, e que, transformada em carga de pressão e somada à carga de elevação, fornece o dado de carga hidráulica de determinado ponto.

O tensiômetro utilizado compreende uma cápsula de cerâmica porosa de ½" por 6 cm de comprimento conectada a um tubo de PVC de ½" por 1 metro de comprimento com tampa rosqueável (Figura 2). Um vacuômetro analógico foi instalado na extremidade do tubo, sendo possível a obtenção de leituras variando de 0 a -760 mmHg e precisão de 20 mmHg.

O procedimento de pré-instalação consistiu no preenchimento total do tubo do tensiômetro com água destilada e fervida e, portanto, isenta de gases dissolvidos, cuja presença promove o surgimento de bolhas de ar no interior no tensiômetro, provocando imprecisões nas leituras das medidas de tensão superficial (ASTM, 1996).

Doze tensiômetros foram instalados no poço, tendo uma inclinação de 45° em relação à parede do revestimento do poço, sendo que as cápsulas porosas situam-se no interior do material escavado, distando cerca de 60 cm da parede do revestimento do poço. Os tensiômetros foram instalados nas posições C', B e C do poço (Figura 2 – planta e perfis). Na posição C', foram instalados os tensiômetros T50, T1, T3, T5, T7 e T9 nas profundidades de 0,5, 1, 3, 5, 7 e 9 metros; na posição B foram instalados os tensiômetros T1B, T2, T4, T6 e T8 nas profundidades de 1, 2, 4, 6 e 8 metros; e na posição C foi instalado o tensiômetro T3B na profundidade de 3 metros.

O método de instalação dos tensiômetros consistiu na quebra da parede do anel do revestimento e a perfuração do solo com um trado manual de ½" de forma helicoidal,

especialmente fabricado para a instalação deste tipo de equipamento. Após a perfuração até a profundidade desejada, foi injetada uma mistura do material perfurado com água destilada, formando uma calda bem mole no furo. O tensiômetro foi cuidadosamente empurrado para dentro do furo até a profundidade final. Este procedimento visa assegurar que a cápsula porosa esteja toda em contato com o solo, a fim de garantir a existência de conexão hidráulica entre a cápsula e o material do solo. Após a colocação do tensiômetro, foi realizado o preenchimento do furo do anel do revestimento com uma pasta de bentonita pura e feito o acabamento final com cimento.

Outros 6 tensiômetros foram instalados em superfície e na área externa do poço, conforme localização na Figura 2 (planta de localização), sendo três a 0,5 metro e outros três a 1 metro de profundidade (tensiômetros T50C, T50D, T50E, T1C, T1D e T1E). O objetivo foi investigar a variação lateral da tensão matricial no solo provocada pela presença de vegetação e de heterogeneidades da estrutura do solo superficial, bem como a possível influência do material de aterro existente ao redor do poço.

4.3. CALHAS DE AÇO INOXIDÁVEL

Duas calhas de aço inoxidável foram instaladas na parede do poço nas profundidades de 1 e 3 metros, situadas uma oposta à outra, de forma a ser possível calcular o volume de água que se infiltra no solo (Figura 2 - Planta). As calhas possuem formato em V, com 30 cm de largura e 50 cm de comprimento e um tubo para a drenagem da água que cai sobre a calha ligado a uma garrafa amostradora. A instalação compreendeu a quebra da parede de concreto do anel do revestimento e a cravação do aparelho no solo, com uma ligeira inclinação voltada para o tubo de drenagem.

4.4. LISÍMETROS DE SUÇÃO COM CÁPSULA POROSA

Lisímetro de sucção é utilizado para a amostragem de água da zona não saturada e consiste de uma cápsula porosa de cerâmica conectada ao corpo de um tubo. De forma geral, as amostras de água são obtidas através da aplicação de vácuo no interior do amostrador, que induz a entrada da água da zona não saturada através da cápsula porosa, sendo armazenada no interior do corpo do tubo. Posteriormente, a água armazenada no interior do tubo é coletada em garrafas de amostragem através da depressurização do sistema e da aplicação de ar sob pressão no interior do tubo.

O lisímetro utilizado possui uma cápsula de cerâmica porosa de 2½" por 6 cm de comprimento conectada a um tubo de PVC de 2½" por 1 metro de comprimento com tampa.

Todos os lisímetros instalados passaram por dois tipos de procedimentos de pré-instalação realizados em laboratório, de acordo com adaptação de norma da ASTM (1996). O primeiro procedimento consistiu na descontaminação das cápsulas porosas e o segundo, aos testes de vazamentos dos equipamentos.

A descontaminação das cápsulas porosas é um procedimento importante pois estas podem ter sido contaminadas durante a fabricação. O método de descontaminação consiste em passar uma solução de ácido clorídrico 1N através da seção porosa por 24 horas, seguida de enxágüe com água destilada, até que a condutividade elétrica da água que sai das cápsulas apresentar valor semelhante ao da água destilada utilizada. A norma ASTM (1996) recomenda a utilização de ácido clorídrico 8N, porém a cola das conexões do lisímetro é corroída quando se utiliza o ácido nestas concentrações.

Outro procedimento foi o teste de vácuo para evitar vazamentos de ar durante o processo de amostragem da água. O teste consistiu na aplicação de 650 mmHg de sucção no interior do aparelho e monitoramento desta sucção aplicada em função do tempo. Verificou-se ser freqüente a ocorrência de vazamentos principalmente na cola da junção entre a cápsula e o corpo do tubo dos lisímetros de sucção.

Doze lisímetros de sucção foram instalados no poço, cada qual tendo uma inclinação de 45° em relação à parede do revestimento do poço, sendo que as cápsulas porosas situavam-se no interior do material escavado e distandos cerca de 0,60 metro da parede do revestimento do poço. Segundo Zilberbrand & Gvirtzman (1996), quando as cápsulas porosas dos lisímetros de sucção e dos tensiômetros são instaladas a distância horizontal de mais de 0,5 metro da parede do revestimento, não ocorrem interferências significativas da parede do poço nos resultados.

Os lisímetros de sucção foram instalados nas posições B, C', B' e C do poço (Figura 2). Na posição B, foram instalados os lisímetros L1, L3, L5, L7 e L9 nas profundidades de 1, 3, 5, 7 e 9 metros; na posição C' foram instalados os lisímetros L2, L4, L6 e L8 nas profundidades de 2, 4, 6 e 8 metros; na posição B' foi instalado o lisímetro T50 na profundidade de 0,5 metro; e na posição C foram instalados os lisímetros L1B e L5B nas profundidades de 1 e 5 metros. Os lisímetros foram colocados de forma intercalada nas posições B e C' (e não exatamente um sob o outro numa única fila), devido à probabilidade de haver interferências entre os cones de sucção, o que diminuiria o volume de água amostrada, já naturalmente escasso em lisímetros.

O método de instalação dos lisímetros é semelhante ao descrito para a instalação dos tensiômetros, utilizando-se, porém, de um trado manual de 2.1/2" para a perfuração. Ao contrário do sugerido em ASTM (1996), porém, a perfuração não foi realizada num

diâmetro maior que o do lisímetro para que pudesse ser possível a utilização de pó de sílica, que é utilizada para melhorar o contato hidráulico entre a parede da perfuração e a cápsula porosa. Isto implicaria na realização de uma perfuração muito larga na parede do revestimento.

Outros 6 lisímetros de sucção foram instalados em superfície e na área externa do poço, conforme localização na Figura 2 (planta de localização), sendo três instalados a 0,5 metro e outros três a 1 metro de profundidade (lisímetros L50C, L50D, L50E, L1C, L1D e L1E). A instalação destes lisímetros objetivou complementar a investigação da variação lateral da qualidade da água do solo, bem como a influência do material de aterro existente ao redor do poço sobre a qualidade da água do solo nestas profundidades.

5. MONITORAMENTO DE TENSÍÔMETROS

Os dados de pressão de fluido obtidos dos tensiômetros vem sendo monitorados na frequência mínima de duas vezes por semana desde maio/1999. Esta frequência torna-se diária após a ocorrência de chuvas. As leituras são feitas sempre na mesma hora do dia, a fim de se evitar os efeitos da variação da temperatura ambiente, que interfere na pressão de fluido do solo.

As leituras de pressão de fluido são transformadas em medidas de carga de pressão do ponto. Estes valores são somados à carga de elevação, obtendo-se a carga hidráulica do ponto em relação ao nível do mar ou de outro *datum*.

Os dados obtidos permitem verificar a ocorrência de variabilidades de carga hidráulica na zona não saturada no espaço e no tempo. A Figura 3 ilustra a variabilidade da carga hidráulica no sentido vertical (profundidade de colocação dos tensiômetros) em três situações de tempo.

Observa-se que, no geral, há uma queda nos valores de carga hidráulica de maio/99 para janeiro/2000, denotando os efeitos da estação seca, que também refletem na posição do nível d'água, que se aprofundou em torno de 1,5 metro no período. Os efeitos da seca são intensos, verificando-se valores de pressão de fluido da ordem de -620 mmHg (-8 metro de coluna d'água) na maior parte dos tensiômetros ao longo da estação seca.

Em maio/99, os potenciais são sempre de infiltração no sentido do aquífero freático. Em janeiro/2000, porém, a situação é de pico de seca a partir dos 2 metros de profundidade, sendo, porém, verificada uma frente de molhamento situada a 1 metro de profundidade. Os potenciais nesta data indicam, entretanto, fluxos descendentes até 7

metros e fluxos ascendentes a partir do nível d'água do aquífero freático. Esta situação de existir uma “zona de descarga” na profundidade de 7 metros está provavelmente ligada à ocorrência de ação de vegetação com raízes profundas.

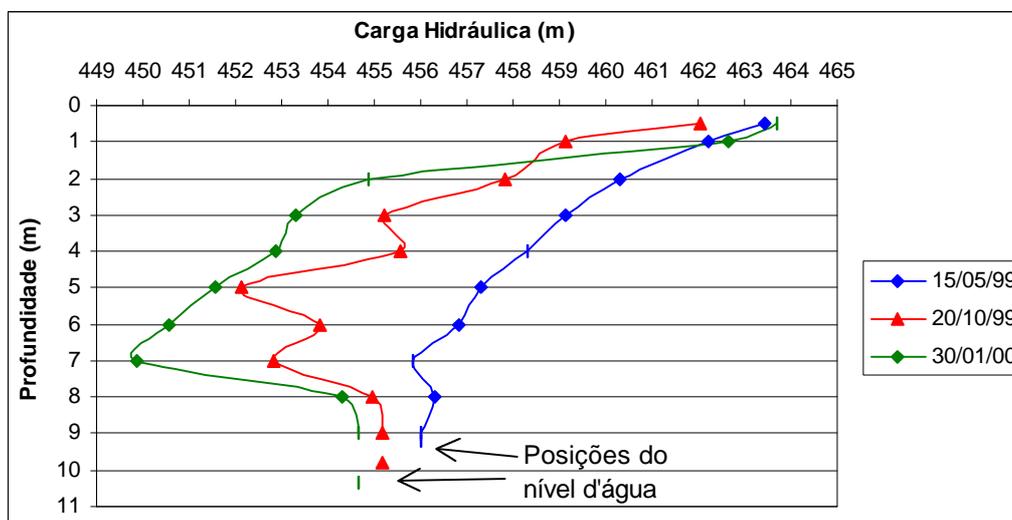


Figura 3 –Variação da carga hidráulica no sentido vertical em função do tempo.

Ainda na Figura 3, é possível observar a ocorrência de variação lateral da carga hidráulica através da leitura dos dados de outubro/99. Nota-se que os valores de carga hidráulica dos tensiômetros T1, T3, T5 e T7 apresentam valores relativamente mais baixos que os dos tensiômetros T2, T4 e T6, formando um *zig-zague* no gráfico. Estes dois grupos de tensiômetros, coincidentemente, situam-se nas posições C' e B do poço, respectivamente (Figura 2 – planta), o que fez ocorrer que um lado do poço (posição C') estivesse menos úmido que o outro (posição B). Isto provavelmente deve-se à ação de vegetação com raízes profundas, com maior densidade de ocorrência na posição C' do poço.

A variação lateral de carga hidráulica é também observada comparando-se os dados obtidos em tensiômetros situados na mesma profundidade (Tabela 2). Observa-se que os tensiômetros de dentro do poço situados a 0,5 e 1 metro de profundidade (T50, T1 e T1B), apresentam valores médios mais elevados de carga hidráulica e menores valores de desvio padrão que os demais na mesma profundidade situados externamente. Isto é explicado pela ocorrência da capa de 0,35 metro de material de aterro menos permeável sobre os tensiômetros do poço, que faz reter mais a umidade e retardar a resposta destes tensiômetros à infiltração de água após os eventos de chuva.

Tabela 2. Média de carga hidráulica em tensiômetros de mesma profundidade – período de agosto/99 a janeiro/00

Profundidade	Tensiômetro*	Carga Hidráulica média no período (m)	Desvio Padrão (m)
50 cm	T50	462,24	1,11
	T50C	460,52	2,46
	T50D	461,10	1,79
	T50E	458,07	2,31
1 m	T1	459,83	1,79
	T1B	459,17	1,09
	T1C	457,00	2,38
	T1D	457,60	2,09
	T1E	455,66	1,09
3 m	T3	454,52	1,50
	T3B	456,40	1,54

* Os tensiômetros T50, T1, T1B, T3 e T3B situam-se dentro do poço. Os demais situam-se na área externa, instalados na superfície (Figura 2).

Os tensiômetros externos T50E e T1E apresentam valores de carga hidráulica mais baixos devido à ação de raízes. O mesmo se aplica aos tensiômetros T3 e T3B que se situam dentro do poço, mas em direções opostas (posições C' e C, respectivamente). A posição C é a que mais se encontra protegida da ação das raízes profundas, o que explica a carga hidráulica mais baixa no tensiômetro T3.

As ações das raízes vivas e do material de aterro não são os únicos fatores que promovem variação nos valores de carga hidráulica. A própria heterogeneidade do solo natural e a ocorrência de macroporos verticais promove variações nos valores de carga hidráulica. Exemplo disso é a calha C3, situada a 3 metros de profundidade, que em janeiro/2000 apresentou um volume de 150 mL de água no recipiente de coleta seis dias após a ocorrência de uma chuva, quando todos os tensiômetros indicavam condições de seca intensa em todas as profundidades entre 2 e 7 metros de profundidade. Isto se explica pela existência de macroporos e/ou fraturas que permitem a rápida infiltração da água de percolação.

6. COLETA DE AMOSTRAS DE ÁGUA EM LISÍMETROS

Três campanhas de amostragem de água dos lisímetros de sucção foram realizadas até o momento (abril e agosto/99 e janeiro/2000). O método de coleta consiste em se aplicar uma sucção de 650 mmHg em cada lisímetro de sucção e proceder a coleta da amostra após, em média, 48 horas. Das amostras coletadas, são obtidos em campo os parâmetros temperatura, pH, Eh, condutividade elétrica e alcalinidade parcial e total, e dependendo da disponibilidade de volume de amostra, os parâmetros nitrato, nitrito,

amônio, ferro II e cromo hexavalente, através de kits de campo. As amostras são também filtradas e preservadas para análises em laboratório, onde são obtidos os cátions e ânions maiores, metais pesados, alumínio, sílica e carbono orgânico dissolvido. O volume mínimo necessário de amostra para a análise nos laboratórios soma 160 mL, sendo 50 mL apenas para a análise de sílica.

No geral, obtém-se pequenos volumes de água, principalmente nos lisímetros instalados até 7 metros de profundidade. Os volumes são bem maiores (>1000 mL) nos lisímetros próximos da franja capilar (L8 e L9). A média de volumes obtida dos lisímetros instalados de 1 a 7 metros dentro do poço foi de 139 mL (abril/99), 110 mL (agosto/99) e 36 mL (janeiro/2000), enquanto que a pressão de fluido, como era de se esperar com a predominância da estação seca, diminuiu de -140 mmHg (abril/99) para -487 mmHg (janeiro/2000), o que explica a queda no volume de água amostrada no período. Como os volumes são pequenos, muitas vezes recorre-se à diluição da amostra obtida para ser possível a análise de alguns parâmetros no laboratório, principalmente a sílica.

Além da ação da estação seca, outros fatores atuam na disponibilidade de água para amostragem, tal como o contato hidráulico entre o solo e a cápsula de porcelana, a variação de condutividade hidráulica do solo e a ocorrência de raízes. O lisímetro L5 é um exemplo da questão do contato hidráulico entre a cápsula e o solo, já que foi necessário instalá-lo por duas vezes, sendo que na primeira o volume máximo amostrado foi de 30 mL (abril/99) e, após a reinstalação em outra perfuração ao lado da primeira, o volume de amostragem deste lisímetro chegou a 270 mL (agosto/99).

A ocorrência de macroporos também interfere no volume de amostragem pois, na amostragem de janeiro/2000, foi possível coletar 28 mL de água do lisímetro L5B, quando todos os lisímetros vizinhos, de 2 a 7 metros e incluindo o L5, apresentaram-se secos e todos os tensiômetros nestas profundidades apresentavam leituras de pressão de fluido ao redor de -600 mmHg.

A ocorrência de raízes também interfere no volume disponível de amostras pois, tomando-se a campanha de agosto/99 como exemplo, observou-se que o volume médio das amostras dos lisímetros ímpares instalados na posição B (L1, L3, L5 e L7 – Figura 2) é quase quatro vezes maior (157 mL) que o volume médio das amostras dos lisímetros pares instalados na posição C' (L2, L4 e L6 – 40 mL). Isto é concordante com as correlações entre carga hidráulica (gráfico da Figura 3) e ação de vegetação com raízes profundas.

Também foram observadas variações laterais da qualidade da água dos lisímetros instalados nas posições B (L1, L3, L5 e L7) e C (L2, L4 e L6). A Figura 4 apresenta os

resultados de concentrações de HCO_3^- , H^+ , CO_2 e NO_3^- da campanha de agosto/99. Observa-se um padrão em *zigzag* parecido com o da Figura 3, sendo que os lisímetros pares apresentam, com exceção do NO_3^- , concentrações das espécies mencionadas relativamente maiores que os lisímetros ímpares, confirmando, mais uma vez, a ação das raízes profundas, cuja respiração faz aumentar a concentração de CO_2 que, por sua vez, é responsável pelo aumento da concentração de HCO_3^- e do H^+ . As concentrações menores de NO_3^- nos lisímetros L4 e L6 em relação aos lisímetros L5 e L7 também devem estar ligadas à ocorrência de raízes e o uso do nitrogênio como nutriente.

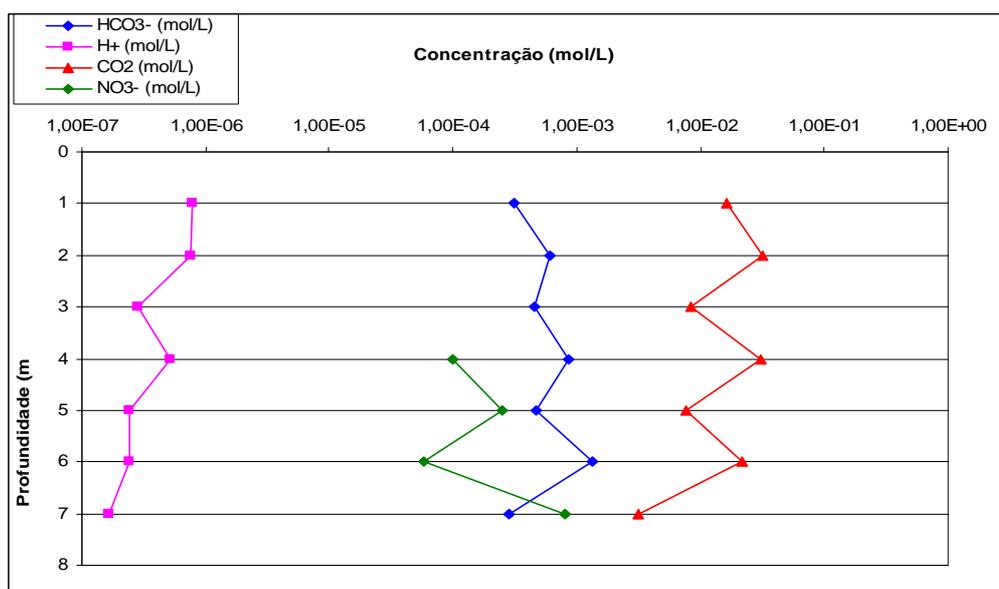


Figura 4 – Variação das concentrações de HCO_3^- , H^+ , CO_2 e NO_3^- na água dos lisímetros em função da profundidade - campanha de agosto/99

Além das variações laterais de composição química entre os lisímetros instalados nas posições B e C', os pares de lisímetros instalados a 1 metro (L1 e L1B) e 5 metros (L1 e L5B) também apresentaram variações na composição química da água. A água do lisímetro L1 é nitrada cálcica (0,94 meq/L NO_3^- e 0,92 meq/L Ca^{++}) e a água do lisímetro L1B é bicarbonatada-nitrada cálcica (2,85 meq/L HCO_3^- , 1,38 meq/L NO_3^- e 3,74 meq/L Ca^{++}), além de possuir valores de pH e condutividade elétrica mais elevados que o L1. As concentrações mais elevadas de HCO_3^- e de Ca^{++} no lisímetro L1B tem provavelmente origem no material de preenchimento do espaço anelar entre a perfuração e o anel de revestimento, que nesta profundidade contém cimento adicionado na mistura solo/bentonita. O carbonato de cálcio do cimento deve estar sofrendo dissolução e enriquecendo a água com HCO_3^- e Ca^{++} neste ponto.

A água do lisímetro L5 é bicarbonatada-nitratada cálcica-magnésiana (0,47 meq/L HCO_3^- , 0,25 meq/L NO_3^- , 0,36 meq/L Ca^{++} e 0,28 meq/L Mg^{++}), enquanto que a água do lisímetro L5B é nitratada-bicarbonatada sódica (0,61 meq/L NO_3^- , 0,24 meq/L HCO_3^- e 0,78 meq/L Na^+). As concentrações mais elevadas de nitrato e sódio no lisímetro L5B, além da mais elevada concentração iônica no lisímetro L1B, indicam condições de contaminação da água mais intensas na posição C que na posição B, onde estão os lisímetros L1 e L5. A origem da contaminação do nitrato na água da zona não saturada ainda está, entretanto, sendo investigada.

7. CONCLUSÕES

O método de investigação da zona não saturada empregado nesta pesquisa tem apresentado resultados confiáveis, em que é possível determinar os fatores responsáveis pelas variações laterais de carga de pressão e de qualidade da água da zona não saturada.

Este método apresenta algumas vantagens comparativamente à instalação de tensiômetros e lisímetros em superfície, notadamente com relação: (1) à não necessidade de se executar furos profundos para a instalação dos equipamentos de monitoramento; (2) à possibilidade de se investigar a zona não saturada em profundidades superiores a 7 metros; (3) à facilidade de acesso ao interior do poço para a execução dos serviços de monitoramento e amostragem e (4) à possibilidade de se instalar vários instrumentos na mesma profundidade para a investigação das variações laterais de carga de pressão e de qualidade da água.

Independente do método de investigação da zona não saturada, entretanto, os procedimentos de pré-instalação dos lisímetros de sucção (testes de vácuo e descontaminação das cápsulas) e dos tensiômetros (preenchimento com água destilada isenta de gases) são importantes.

Neste trabalho, o monitoramento dos equipamentos e as amostragens realizadas até o momento possibilitaram identificar as principais causas das variações laterais da carga de pressão e da quantidade e qualidade das amostras de água, quais sejam: a heterogeneidade do solo natural com ocorrência de macroporos verticais, a ocorrência de uma camada de 35 cm de material de aterro ao redor do poço, o contato hidráulico entre o solo e a cápsula de porcelana dos lisímetros e, principalmente, a ação de vegetação com raízes profundas. Neste último caso, a presença de uma árvore situada no pomar do sítio vizinho a aproximadamente 10 metros de distância do poço é a responsável pelas variações de carga de pressão e de concentração iônica na água da zona não saturada.

Nota-se que, para um estudo realizado numa escala de micro-detalhe, vários são os fatores que atuam sobre os dados obtidos, muitos dos quais não previstos de antemão. De forma a poder minimizar os efeitos de variações laterais sobre a carga de pressão e sobre a concentração iônica da água, procurou-se eliminar os efeitos da ação das raízes profundas, através do sacrifício da árvore no final de janeiro/2000. Novos dados estão sendo produzidos a partir deste evento que irá possibilitar uma melhor avaliação da ação da vegetação deste porte sobre a quantidade e a qualidade da água da zona não saturada.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar agradecimentos à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo financiamento do projeto (processo 97/13879-6) e pela concessão de bolsa de doutoramento (processo 98/15340-0); e também à SABESP de Urânia e Jales, por fornecer estrutura para a execução das etapas de campo do projeto.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM Committee D-18 on Soil and Rock – 1996 - ASTM Standards on Ground Water and Vadose Zone Investigations: Drilling, Sampling, Well Installation and Abandonment Procedures. Designation D 4696-92: Standard Guide for Pore-Liquid Sampling from the Vadose Zone. ASTM Publication Code Number 03-418196-38. p. 68-98.

FOSTER, S. & HIRATA, R.C.A. - 1988. *Determinacion del Riesgo de Contaminación de aguas subterráneas: una metodología basada en datos existentes*. Centro Panamericano de Ingenieria Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), 81p. 1ª edición.

ZILBERBRAND, M.; & GVIRTZMAN, H. – 1996 – Monitoring of Water Flow and Solute Transport through the Unsaturated Zone Using a Large-Diameter Borehole. Ground Water, Vol. 34 n.1 – January-February 1996.