

MONITORAMENTO HIDROGEOLÓGICO COMO FERRAMENTA DE AVALIAÇÃO À DEGRADAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS: ESTUDO REALIZADO NO ATERRO CONTROLADO DE LONDRINA – PR¹

Rodrigo Vitor Barbosa Sousa²
André Celligoi³

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi realizar um monitoramento hidrogeológico nas adjacências do aterro controlado de Londrina – PR. A metodologia utilizada baseou-se em duas principais etapas, quais sejam, utilização do permeâmetro Guelph, modelo 2800, a fim, de se determinar a condutividade hidráulica do solo em condição saturada, através de duas técnicas apropriadas para o aparelho; e quantificação da recarga do aquífero freático, com vistas a estimar o volume de água possivelmente degradado, devido à má disposição dos resíduos sólidos. Os resultados apontaram que a área apresenta uma condutividade hidráulica baixa com uma média entre as duas técnicas de $5,16 \times 10^{-4}$ cm/s. O volume da recarga foi calculado em 157403 m³/ano e a contribuição efetiva da chuva para a recarga foi de 1000 mm/ano. Os resultados alcançados mostraram-se satisfatórios e espera-se que esse trabalho auxilie no desenvolvimento de pesquisas futuras.

Palavras-chave: Lixão de Londrina, Monitoramento Hidrogeológico, Permeâmetro Guelph.

HYDROGEOLOGIC MONITORING FOR ASSESSMENT OF THE DEGRADATION HYDRIC RESOURCES: STUDY ACCOMPLISHED IN THE LANDFILL OF THE LONDRINA TOWN, PARANÁ STATE, BRAZIL

ABSTRACT

The aim of this work was to carry through a hydrogeologic monitoring in the landfill adjacencies of the Londrina town, Paraná state, Brazil. The used methodology was based on two main stages, which is, use of Guelph permeameter, model 2800, with the purpose of determinate the hydraulical conductivity of the soil in saturated condition, through two appropriate techniques for the device; and recharge quantification of freatic aquifer, with sights to value the possibly degraded water volume, due to bad disposal of the solid residues. The results had pointed that the area presents a slow hydraulical conductivity with an average between the two techniques of $5,16 \times 10^{-4}$ cm/s. The recharge volume was calculated in 157403 m³/year and the effective contribution of rain for the recharge was of 1000 mm/year. The reached results were satisfactory and it is expected that this work assists in the accomplishment of future researches.

Keywords: Landfill of Londrina, Hydrogeologic Monitoring, Guelph Permeameter.

¹ A realização dessa pesquisa deve-se a importante colaboração de Emília Akemi Fukada, geógrafa; Marcos Aparecido Gonçalves, agrônomo, ambos ex-estagiários do Laboratório de Geologia e Pedologia da Universidade Estadual de Londrina, pelo auxílio dado nas análises texturais das amostras de solo; e ao engenheiro Miguel Angel Alfaro Soto, técnico contratado pela Fundação para o Desenvolvimento da UNESP (FUNDUNESP), atuando atualmente no curso de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente UNESP – Rio Claro, pelas valiosíssimas explicações a respeito do funcionamento e manuseio do permeâmetro Guelph e pelas orientações no cálculo da condutividade hidráulica em condição saturada através das duas técnicas utilizadas.

² Geógrafo formado pela Universidade Estadual de Londrina - UEL. E-mail: ro_vitorgeo@yahoo.com.br.

³ Prof. Dr. Adjunto ao Departamento de Geociências da Universidade Estadual de Londrina - UEL. Endereço: Campus Universitário, Departamento de Geociências, Caixa Postal 6001, CEP: 86.051-990, Londrina – PR. E-mail: celligoi@uel.br.

INTRODUÇÃO

A água é um dos recursos naturais mais utilizados pela humanidade, tanto pelo fato de ser vital à nossa sobrevivência, quanto pelo fato de ser altamente empregada como matéria prima, principalmente nos setores primários e secundários da economia globalizada, assumindo a água subterrânea nesse contexto um grande destaque. Atualmente, os problemas sentidos pelo mundo, devido à agressão histórica da natureza, desde o pré-capitalismo e principalmente após a Primeira Revolução Industrial, são muitos. Entre eles, podem-se citar; o aumento do efeito estufa e do buraco da camada de ozônio; queimadas e desmatamento das florestas; desertificação ecológica; salinização do solo; poluição e contaminação das águas superficiais e subterrâneas, entre outros. É com relação a esse último item, principalmente a respeito das águas subterrâneas, que está direcionado o foco desse trabalho.

A prevenção ou a remediação de problemas relacionados à degradação dos recursos hídricos, não devem apenas ser direcionados às águas superficiais, visto serem os rios áreas de descarga do aquífero, acrescido do volume escoado e precipitado sobre o mesmo. Dessa forma, o monitoramento das águas subterrâneas torna-se ferramenta essencial para a gestão integrada dos recursos hídricos, visando o uso inteligente da água.

O objetivo desse estudo é apresentar um trabalho de monitoramento hidrogeológico do aquífero freático, cujo cerne, foi avaliar os impactos causados às águas subterrâneas e superficiais, adjacentes ao aterro controlado de Londrina – PR, localizado a sudeste do sítio urbano da cidade. Pelo fato do trabalho envolver várias etapas, os objetivos específicos podem ser resumidos da seguinte forma:

- Utilização do permeâmetro Guelph, modelo 2800; para a determinação da condutividade hidráulica do solo em condição saturada a 40 cm de profundidade.
- Utilização de duas técnicas próprias para o permeâmetro, técnica com duas alturas de carga e técnica com uma altura de carga, a fim, de comparar os resultados obtidos e a eficácia das técnicas;
- Determinar a recarga anual do aquífero na área de estudo, com vistas a estimar o volume real de água infiltrada no solo e possivelmente degradada, devido à má disposição dos resíduos sólidos. Para a determinação da recarga, houve a necessidade de medições periódicas do nível estático ou nível d'água em dez poços de monitoramento de água subterrânea (PM) localizados no aterro controlado de Londrina, ao longo do ano hidrológico out/2006 – set/2007.

Levando-se em consideração que a água é essencial para a manutenção da vida, o desenvolvimento desse trabalho justifica-se pelo fato da ocorrência de depósitos tecnogênicos, como o aterro controlado de Londrina, interferir diretamente no ciclo hidrológico, já que a percolação do chorume pelo solo afeta não apenas os aquíferos, mas também as águas superficiais.

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se a sudeste do sítio urbano da cidade de Londrina, tendo acesso pela estrada Água do Limoeiro e encontra-se no limite do perímetro de expansão urbana da cidade entre as coordenadas UTM leste-oeste 488940 – 489810 e norte-sul 7417715 – 7419083 (ver Figura 1). Segundo Fuscaldo (2001) a deposição de resíduos sólidos nesse local vem ocorrendo desde 1977, sendo sua área estimada em 192.640 m².

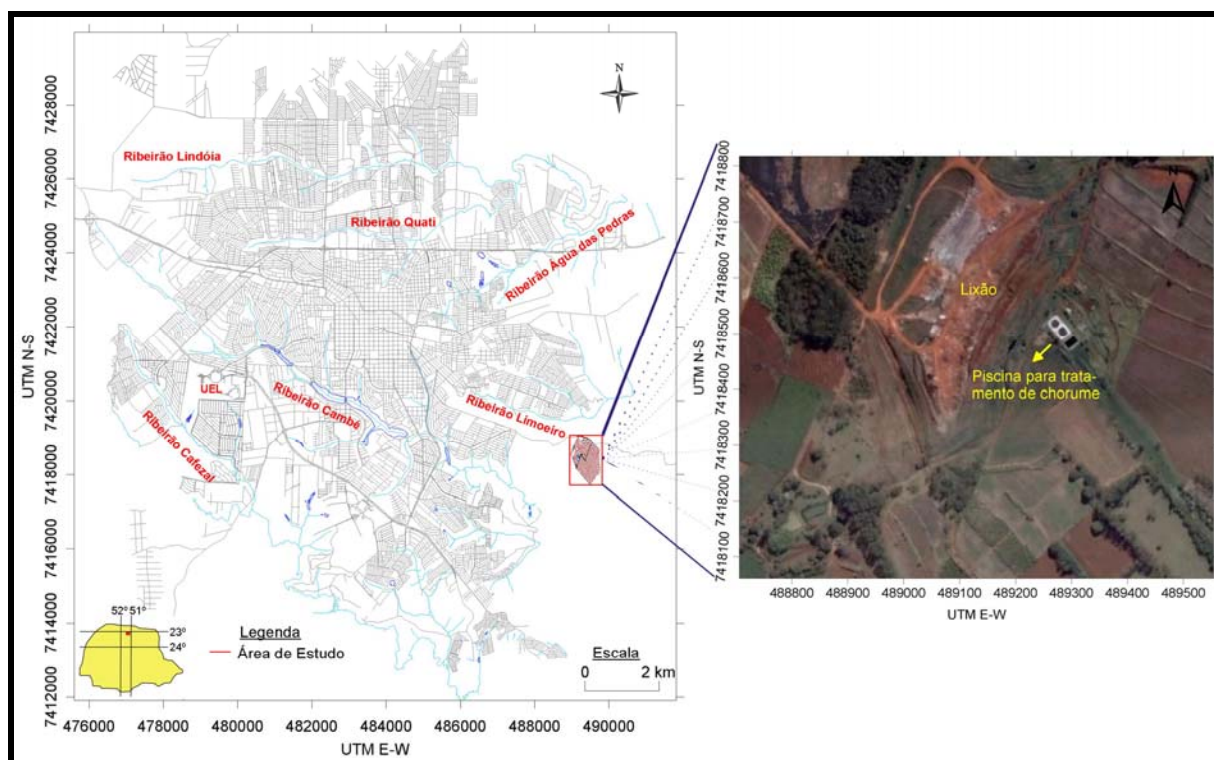


Figura 1 - Área de estudo localizada a sudeste do sítio urbano da cidade de Londrina, melhor evidenciada na imagem de satélite. Fonte: IPPUL, 2001 (modificado); GOOGLE EARTH acessado em 26 de Maio de 2007 (modificado) Org. Rodrigo Vitor B. Sousa.

No que diz respeito à geomorfologia, a área situa-se entre 465 e 555 m de altitude, estando a montante do vale do córrego dos PiriQUITOS, afluente da margem esquerda do Ribeirão Cambé. Assim sendo, a área de estudo corresponde a uma fração da área de recarga do Córrego dos PiriQUITOS, ficando também próximo às suas nascentes. O entorno da área apresenta pequenos platôs e um relevo suavemente ondulado com pouca

vegetação, coberto na maior parte por pasto e sem pronunciamento de vales acentuadamente encaixados ou entalhados (ver Figuras 2 e 3).



Figura 2 – Imagem evidenciando o relevo da área de estudo. A jusante, piscina de tratamento de chorume e a direita em média altura, pequeno platô. Data: 2007. Fonte: Rodrigo Vitor B. Sousa.

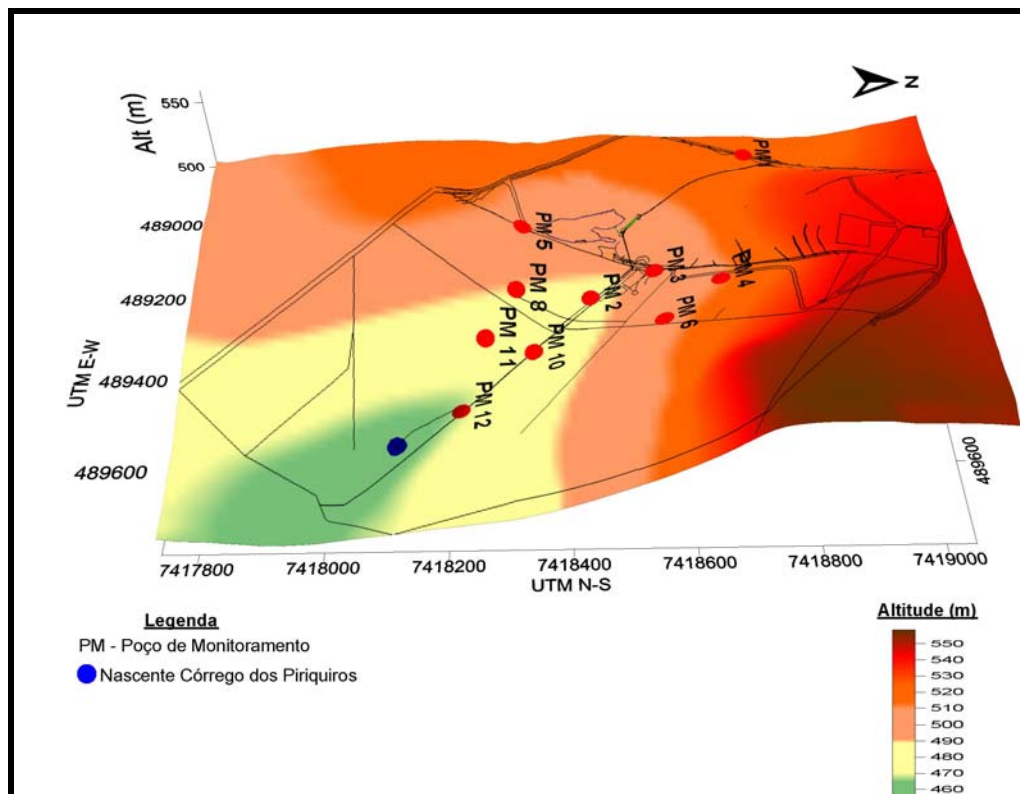


Figura 3 – Modelo Numérico do Terreno – MNT – com os poços de monitoramento (PM) plotados. (Org. Rodrigo Vitor B. Sousa).

Em termos geológicos a área de estudo localiza-se sobre a Formação Serra Geral, sendo esta formada principalmente por basaltos toleíticos, originados do grande vulcanismo ocorrido na Bacia do Paraná na Era Mesozóica, período Jurássico-Cretáceo ou Neojurássico (PETRI; FÚLFARO, 1983, p.235; DNPM, 1984, p.347; MAACK, 1981, p.420; MINEROPAR, 2001, p.15). Com relação à hidrogeologia regional, pode-se dizer que existem duas formas de ocorrência de água subterrânea; o aquífero freático e o sistema aquífero Serra Geral. O aquífero freático é formado pelas camadas de solo e rocha alterada, e constitui-se em um meio poroso relativamente homogêneo, geralmente pouco espesso e com baixa profundidade do nível saturado. As características desse aquífero são de aquífero livre, sendo sua recarga, obtida diretamente a partir das áreas topograficamente mais elevadas. Com relação ao sistema aquífero Serra Geral, Rebouças (1978) argumenta que devido suas características litológicas de rochas cristalinas, se constitui em um meio aquífero de condições hidrogeológicas heterogêneas e anisotrópicas (apud CELLIGOI, 1993, p.24). A ocorrência da água subterrânea neste aquífero fica restrita às zonas de discontinuidades das rochas, as quais se constituem principalmente em estruturas tectônicas como fratura e/ou falhamento.

METODOLOGIA

Determinação da Condutividade Hidráulica do Solo em Condição Saturada

A condutividade hidráulica está relacionada com as propriedades físicas, tanto dos fluidos como dos materiais por onde passa a água e retrata a maior ou menor facilidade pela qual a água atravessa o solo. Dentre essas propriedades físicas pode-se citar porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas, bem como viscosidade e massa específica do fluido que está escoando (CABRAL, 1997, p.41; GUERRA, 2003, p.153; COELHO NETTO, 2005, p.120).

Para a quantificação da condutividade hidráulica do solo em condição saturada, fez-se o uso do permeâmetro Guelph, salientando que o solo corresponde à zona não saturada do aquífero freático. Ao todo foram realizados onze testes ao lado dos poços de monitoramento de água subterrânea no aterro controlado de Londrina, já evidenciados na figura (3).

Nesse sentido, esse trabalho apresentará um confronto de resultados obtidos, a partir, da utilização de duas técnicas próprias do permeâmetro Guelph, modelo 2800. Esse procedimento teve como objetivo, averiguar se há uma aproximação ou afastamento dos resultados nas técnicas utilizadas. Inicialmente, pode-se dizer que a quantificação da condutividade hidráulica baseou-se nas técnicas propostas por Reynolds;

Elrick (1985) e Elrick et al. (1989) denominadas por técnica com duas alturas de carga e técnica com uma altura de carga, respectivamente (apud SOTO, 1999, p. 48). Apenas em nível de esclarecimento, o termo carga refere-se ao número de vezes e à quantidade de água deslocada pelo aparelho.

Como a condutividade hidráulica depende do tipo de fluido e do tipo do material do solo, além dos testes com o permeâmetro, foram realizadas análises texturais em amostras de solo. As realizações dessas análises são de extrema importância, pois propiciam um conhecimento maior a respeito das características do tipo de solo.

Técnica com duas alturas de carga

A técnica de duas alturas de carga pode ser descrita através da seguinte equação:

$$Kfs = G_2 \cdot Q_2 - G_1 \cdot Q_1 \quad (1)$$

onde:

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

e onde:

$$G_1 = G_2 \frac{H_2 \cdot C_1}{H_1 \cdot C_2} \quad (3)$$

Sendo:

Kfs= condutividade hidráulica do solo em condição saturada;

H₁= primeira altura do deslocamento da carga de água;

H₂= segunda altura do deslocamento da carga de água;

Q₁= vazão no instante do primeiro deslocamento da carga de água (Taxa do fluxo em regime permanente x Área do tubo utilizada no teste). Se utilizado o tubo externo do aparelho a área será 35,22 cm²; Se utilizado o tubo interno do aparelho a área será 2,15 cm²;

Q₂= vazão no instante do segundo deslocamento da carga de água (mesmas características que Q₁);

C₁= fator de forma que depende da razão entre H₁ e o raio do trado (H/a) variando a cada tipo de solo (valor adimensional);

C₂= fator de forma que depende da razão entre H₂ e o raio do trado (H/a) variando a cada tipo de solo (valor adimensional);

a= raio do furo do trado igual a 3cm;

G_2 = relação entre as alturas de carga, fatores de forma (C), e raio do trado (valor adimensional);

G_1 = produto de G_2 pela relação das alturas e fatores de forma (valor adimensional).

Técnica com uma altura de carga

Com relação à técnica de uma altura de carga, a mesma pode ser descrita da seguinte maneira:

$$Kfs = \frac{CQ}{(2 \pi H^2 + \pi a^2 C + 2 \pi H/\alpha)} \quad (4)$$

Sendo:

Kfs= condutividade hidráulica do solo em condição saturada;

H= altura do deslocamento da carga de água;

Q= vazão;

C= fator de forma que depende da razão entre altura e raio do trado (H/a) variando a cada tipo de solo;

a= raio do furo do trado igual a 3 cm;

α = constante que depende das propriedades da porosidade do solo.

Na técnica de uma altura de carga o parâmetro α deve ser obtido através de Elrick et al.,(1989) (apud SOTO, 1999, p. 49) (ver Quadro 1).

Quadro 1 – Valor do parâmetro α a ser utilizado na técnica com uma altura de carga.

α (cm ⁻¹)	Tipo de solo
0,01	- Argilas compactas (aterro, liners, sedimentos lacustres e marinhos)
0,04	- Solos de textura fina, principalmente sem macroporos e fissuras
0,12	- Argilas até areias finas com alto a moderada quantidade de macroporos e fissuras
0,36	- Areias grossas, inclui solos com macroporosidade e fissuras evidentes.

Determinação da recarga do aquífero

Em linhas gerais, a recarga pode ser compreendida como a quantidade de água armazenada no aquífero freático em um dado intervalo de tempo – meses ou anos (mm/ano;

m/ano) e está relacionada diretamente à sazonalidade das chuvas, variando desse modo no tempo e no espaço. Assim sendo, sabendo-se qual é a área de influência ou a área de recarga (m^2) é possível identificar o volume da recarga (m^3).

A metodologia utilizada para a quantificação da recarga baseou-se em Costa (1997, p.351) que determina tal parâmetro através da Vazão de Escoamento Natural (VEN). Segundo o autor, em condições de equilíbrio a (VEN) pode ser encarada como o volume de infiltração efetiva anual, ou seja, a recarga. Desse modo, a recarga pode ser equacionada da seguinte maneira:

$$R = \Delta h A n_e \quad (5)$$

Onde:

R = Recarga;

Δh = Variação do nível da água;

A = Área de ocorrência do aquífero;

n_e = Porosidade efetiva.

É importante salientar que para a determinação da variação sazonal do nível estático ou nível d'água (Δh), foram realizadas medições periódicas nos poços de monitoramento de água subterrânea localizados no aterro controlado de Londrina, através, da utilização de um medidor de nível. As medições foram realizadas durante o ciclo anual out/2006 – set/2007 e ao todo realizaram-se dezessete campos onde foram anotados os valores dos níveis d'água em cada um dos referidos poços.

RESULTADOS

Com relação aos valores de condutividade hidráulica do solo em condição saturada, obtiveram-se nos testes *in-situ* com o permeâmetro Guelph, realizados ao lado dos poços de monitoramento, os seguintes resultados (ver Tabela 1).

Tabela 1 – Resultados dos Testes com o Permeâmetro Guelph

Testes	Técnica duas alturas	Técnica uma altura	Média das duas técnicas
G 1	3×10^{-4} cm/s	$7,6 \times 10^{-4}$ cm/s	$5,3 \times 10^{-4}$ cm/s
G 2	$4,3 \times 10^{-4}$ cm/s	$1,4 \times 10^{-4}$ cm/s	$2,85 \times 10^{-4}$ cm/s
G 3	$5,9 \times 10^{-4}$ cm/s	$6,3 \times 10^{-4}$ cm/s	$6,1 \times 10^{-4}$ cm/s
G 4	$1,37 \times 10^{-3}$ cm/s	$9,1 \times 10^{-4}$ cm/s	$1,14 \times 10^{-3}$ cm/s
G 5	$1,1 \times 10^{-3}$ cm/s	$3,2 \times 10^{-4}$ cm/s	$7,1 \times 10^{-4}$ cm/s
G 6	-		
G 6	6×10^{-5} cm/s	$5,9 \times 10^{-4}$ cm/s	$3,25 \times 10^{-4}$ cm/s
G 8	$7,3 \times 10^{-4}$ cm/s	$4,35 \times 10^{-4}$ cm/s	$5,82 \times 10^{-4}$ cm/s
G 11	-		
G 11	$2,3 \times 10^{-4}$ cm/s	$4,7 \times 10^{-4}$ cm/s	$3,5 \times 10^{-4}$ cm/s
G 12	2×10^{-4} cm/s	$3,5 \times 10^{-5}$ cm/s	$1,17 \times 10^{-4}$ cm/s
Média Total	$5,6 \times 10^{-4}$ cm/s	$4,76 \times 10^{-4}$ cm/s	$5,16 \times 10^{-4}$ cm/s

- (resultado negativo); G = teste

Analisando a tabela chama-se a atenção para as siglas dos testes, indicando que os mesmos foram realizados ao lado dos poços de monitoramento (PM), onde, (G1) foi realizado ao lado do PM1; (G2) ao lado do PM2 e assim por diante. A letra (G) equivale ao nome do aparelho, Guelph.

Quanto aos resultados, verifica-se que na técnica com duas alturas de carga, dois apresentaram resultados negativos e o restante variou entre 10^{-3} cm/s e 10^{-5} cm/s, estando a maioria enquadrados na escala de 10^{-4} cm/s, denotando no geral uma condutividade hidráulica baixa, segundo a classificação de Terzaghi; Peck (1967); Mello; Teixeira (1967) (apud CELLIGOI; SOUSA et. al., 2006, p.6) (Quadro 2).

Quadro 2 - Relação dos valores de condutividade hidráulica e tipos de materiais

Coefficiente de Permeabilidade k (cm/s)	Grau de Permeabilidade Terzaghi & Peck (1967)	Tipo de Solo Mello & Teixeira (1967)
10^9 a 1	Alta	Pedregulhos e Areia
1 a 10^{-1}	Alta	Areias
10^{-1} a 10^{-3}	Média	Areias
10^{-3} a 10^{-5}	Baixa	Areias finas siltosas e argilosas, siltes argilosos
10^{-5} a 10^{-7}	Muito Baixa	Areias finas siltosas e argilosas, siltes argilosos
$< 10^{-7}$	Praticamente Impermeável	Argilas

Fonte: CelligoI; Sousa et. al., (2006) modificado de Santos (2005).

Com relação aos resultados negativos, Reynolds; Elrick (1985) (apud SOTO, 1999, p. 51, grifo nosso) apontam alguns motivos que podem ocasionar a ocorrência de tais resultados:

- Erros de medição quando não atingido o *regime permanente*;
- Pequena variação espacial em escala das propriedades hidráulicas do solo;

- Erros nas medições de Q1 e Q2, por causa da presença de bolhas de ar;
- Ar preso no solo;
- Variação espacial, por perturbação das características do solo, por exemplo, bioporos e macroporos, ocasionando condições de medição diferentes.

Quanto à utilização da técnica de uma altura de carga, observa-se que os resultados variaram entre 10^{-4} e 10^{-5} cm/s, entretanto, oito dos nove testes realizados estão enquadrados na escala de 10^{-4} cm/s, também denotando uma condutividade hidráulica baixa de acordo com o quadro (2). Ainda observando a tabela (1) nota-se que a média total, tanto na técnica com uma altura de carga, técnica com duas alturas de carga ou na média entre as duas técnicas, os resultados dos testes de condutividade enquadram-se na escala de 10^{-4} cm/s. Conclui-se que na área de estudo as duas técnicas utilizadas são compatíveis, já que ambas apresentaram resultados muito próximos e médias praticamente iguais. O permeâmetro Guelph pode ser observado na figura (4).



Figura 4 – Permeâmetro Guelph, modelo 2800. Foto tirada próximo ao lado do (PM5) sentido sudeste (ver Figura 3). Data: 2007. Fonte: Rodrigo Vitor B. Sousa.

No tocante aos dados de análise textural, dados obtidos no Laboratório de Geologia e Pedologia do Departamento de Geociências da UEL, os mesmos podem ser evidenciados na tabela (2).

Tabela 2 - Resultados das análises de granulometria

Poços	Argila	Silte	Areia
PM 5	47,35%	39,55%	13,10%
PM 8	47,40%	45,45%	7,15%

PM = poço de monitoramento de água subterrânea

Os resultados mostram que houve uma maior concentração de argila, como já era esperado. No entanto, apesar da argila ter sido encontrada em maior quantidade, nota-se que a concentração de silte aparece de forma bem destacada. Isso deve-se ao fato do local onde foram retiradas as amostras ser uma área agrícola, o que possivelmente contribui para o lixiviamento da argila dada a ausência da cobertura vegetal ou mesmo através da erosão, devido a utilização de máquinas e manejo incorreto do solo.

Feita a análise granulométrica transportaram-se os resultados analíticos para um digrama triangular, onde as diferentes classes texturais foram delimitadas, segundo as proporções de areia total, silte e argila (Tabela 3). O diagrama utilizado foi o proposto pelo Soil Survey Staff do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América do Norte e modificado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, o qual foi introduzido mais uma classe textural, denominada argila pesada ou em outras palavras, solo muito argiloso (KIEHL, 1979, p. 125).

Tabela 3 – Classes texturais identificadas

Poços	Classes Texturais
PM 5	Argiloso
PM 8	Argila Siltosa

PM = poço de monitoramento

Fazendo uma relação entre as tabelas (2) e (3) é possível observar de forma mais nítida que todas as amostras possuem alto teor de argila. Pode-se dizer que as classes texturais identificadas estão de acordo com a literatura existente, já que segundo Branco et al (1998) o perfil de solo do município de Londrina pode ser dividido em três camadas: argila siltosa porosa, muito mole à média, vermelho escura; argila siltosa rija, vermelho escura; e argila rija a dura (apud SANTOS, 2005, p. 65).

Ressalta-se ainda, que os resultados de análise granulométrica estão de acordo com testes já realizados em amostras de solo da área em questão. Segundo Soares (2006, p.64) foram coletadas amostras de solo do horizonte B e as mesmas indicaram a ocorrência de argila siltosa, estando o teor de argila variando entre 54% e 94%.

O volume da recarga baseou-se na área de influência de todos os poços, exceto do PM1, já que a área de influência deste último poço não influencia na recarga dos demais

poços, segundo o mapa de vetores que simula o fluxo da água subterrânea na área de estudo, podendo ser observado na figura (5).

O volume da recarga foi obtido através da equação (5), já evidenciada anteriormente, onde, $R = \text{Recarga}$; $\Delta h = 10,09 \text{ m}$; $A = 155581 \text{ m}^2$ e $n_e = 0,1$ ou 10%.

Utilizando-se a área de influência de todos os poços, $A = 155581 \text{ m}^2$, o volume foi equivalente a 156981 m^3 . Dividindo-se o volume pela área, chegou-se a um valor de que a contribuição da chuva no período analisado foi de 1 m/ano ou 1000 mm/ano .

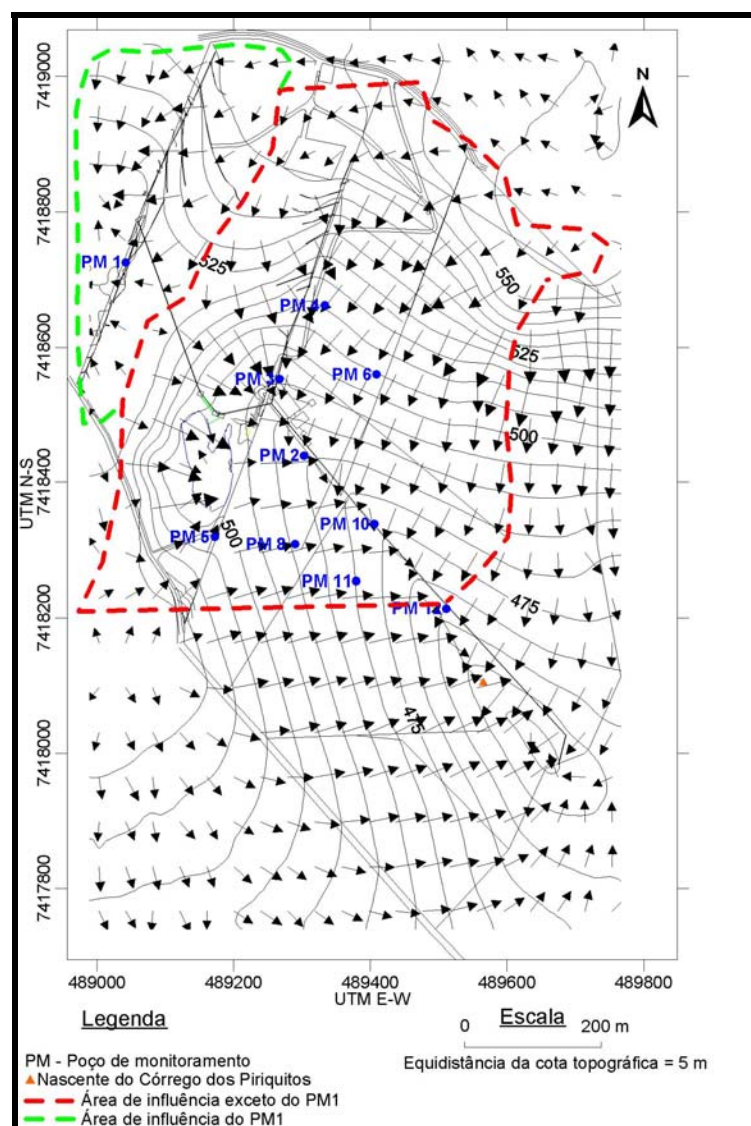


Figura 5 – Mapa de vetor simulando o fluxo da água subterrânea evidenciando a delimitação da área de influência de todos os poços. Org. Rodrigo Vitor B. Sousa.

Vale salientar que o valor da variação do nível estático ou nível d'água (Δh) = 10,09 m, foi a maior amplitude verificada ao longo do ano hidrológico out/2006 – set/2007. Para a determinação do (Δh), todos os valores obtidos nas medições do nível estático nos poços de monitoramento de água subterrânea (PM) foram tabulados. Em seguida, a fim, de

facilitar a visualização desse dado, confeccionou-se um gráfico, podendo o mesmo ser observado na figura (6).

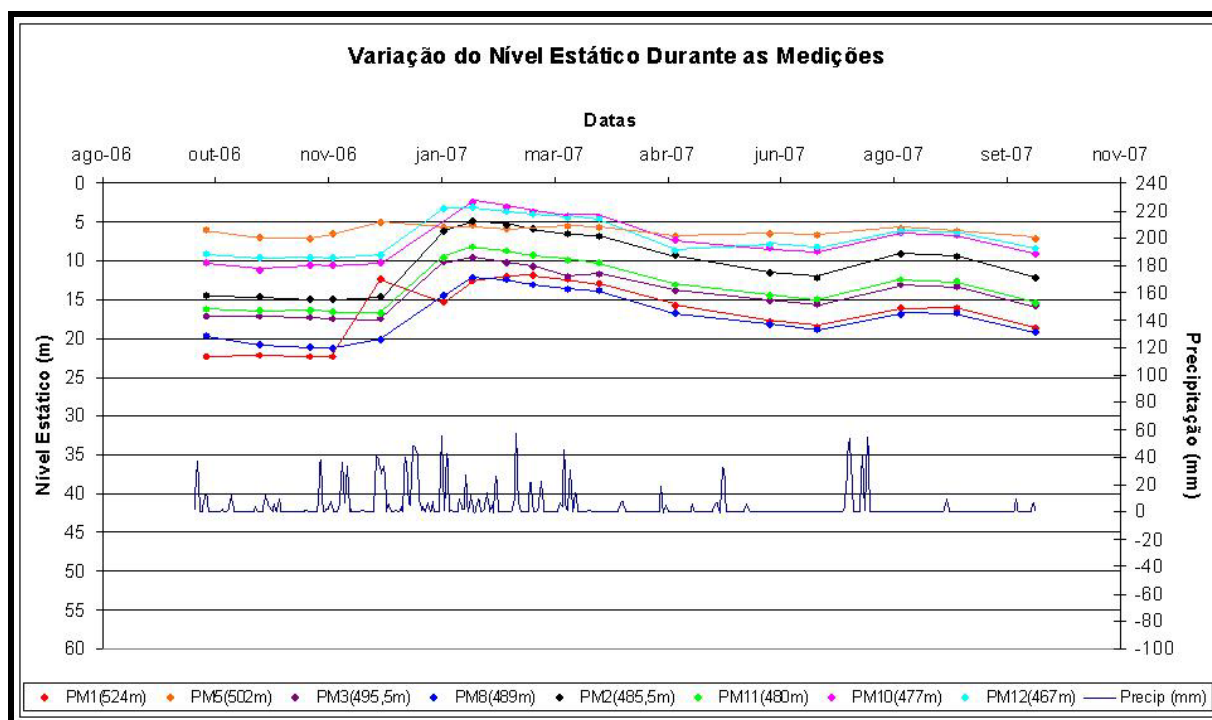


Figura 6 - Oscilação do nível estático durante as medições, de acordo com a variação diária das chuvas. Org. Rodrigo Vitor B. Sousa.

Observando o gráfico chama-se a atenção para a altitude em que todos os poços de monitoramento estão locados, apresentando-se entre parênteses ao lado das siglas dos respectivos poços. A oscilação do nível estático, representada pelas linhas na parte superior da figura em metros (m), foi analisada em conjunto com a variação sazonal das chuvas. Verifica-se dessa forma, que há uma forte relação entre essas duas variáveis – nível estático e precipitação - já que a elevação do nível estático está relacionada aos períodos mais chuvosos, verão principalmente, enquanto os níveis mais baixos relacionam-se aos períodos mais secos, outono, inverno e parte da primavera de 2006. O PM2 foi o poço que apresentou a maior amplitude nas medições, equivalente a 10,09 m, sendo esse o (Δh) utilizado na equação (5) para a determinação da recarga do aquífero. De maneira geral, pode-se dizer que o aquífero possui uma boa resposta, apresentando os níveis de todos os poços uma certa conformidade entre si, havendo, entretanto, a necessidade de se fazer uma análise mais criteriosa desses dados, já que durante as medições verificou-se uma conexão na área entre aquífero livre e o sistema aquífero Serra Geral. Quanto aos dados de precipitação diária, representada pela linha na parte inferior da figura em (mm), os mesmos foram adquiridos junto à estação meteorológica em Londrina do Instituto Agrônomo do Paraná – IAPAR – sendo a numeração de identificação pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL – 02351003.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Mesmo a condutividade hidráulica, de forma geral, ter sido classificada como baixa, entre 10^{-3} cm/s e 10^{-5} cm/s é preciso salientar que há uma diferença de dez vezes, por exemplo, entre 10^{-3} cm/s e 10^{-4} cm/s e uma diferença de cem vezes entre 10^{-3} e 10^{-5} cm/s. Assim, ao analisar tais valores deve-se levar em conta que mesmo estando enquadrados na mesma classificação, condutividade hidráulica baixa, em algumas situações os resultados poderão estar distantes um do outro se analisados de forma pontual.

Essa distância será mais ou menos perceptível se levado em conta as características do conjunto dos resultados. Dessa forma, serão os resultados de todos os testes que classificará a condutividade como alta, média, baixa, muito baixa e praticamente impermeável. Nesse sentido, a condutividade hidráulica nunca deverá ser considerada igual, a partir de pontos isolados.

Um ponto importante que influencia nos testes de condutividade hidráulica, diz respeito à heterogeneidade do solo. Essa heterogeneidade está relacionada com as condições do mesmo, compactação, desnudação, macroporosidade, tipo de uso, enfim. Na prática, verificou-se que em algumas situações, testes realizados, por vezes em locais próximos, apresentaram resultados com diferença de até 10 ou 100 vezes, embora no geral, os resultados tenham se aproximado. Por esse motivo, ou seja, devido à heterogeneidade do solo, a condutividade hidráulica torna-se uma variável extremamente difícil de ser espacializada. Talvez a realização de uma análise estatística, apontando a quantidade ideal de testes na área em estudo, esse problema possa ser solucionado. As análises granulométricas mostraram-se extremamente importantes na classificação da condutividade hidráulica, já que essa variável depende muito do tipo do material do solo. Assim sendo, estas análises possibilita, antes mesmo dos testes com o permeâmetro, especular se a condutividade será alta, média, baixa, enfim.

É preciso frisar que todos os testes com o permeâmetro Guelph foram realizados a 40 cm de profundidade, um solo muito superficial, sendo todos executados na zona do solo, pertencendo essa, à zona não saturada do aquífero freático. A fim de melhor aproveitar o potencial do aparelho, seria interessante que fosse realizado testes a profundidades maiores, 1m e superiores a 2m, já atingindo a zona intermediária do solo, com o objetivo de adquirir resultados mais consistentes referentes à permeabilidade da água em um perfil de solo. Na prática, verificou-se que a realização de testes a profundidades maiores é um problema que limita esse aparelho, embora o mesmo talvez seja o mais eficiente para ser utilizado *in loco*.

Embora, no solo, a condutividade hidráulica em condição não saturada atue de forma mais significativa na movimentação da água; a determinação da condutividade hidráulica do solo em condição saturada, essa obtida na pesquisa, também é importante, já que em um solo com grau de saturação ou umidade do solo igual a 100% é essa a condutividade hidráulica atuante. Para estudos técnicos que visem a remediação de acidentes ambientais como, por exemplo, vazamento de combustível, derramamento de óleo sobre o solo ou mesmo percolação de chorume no solo, a determinação da condutividade hidráulica saturada e não saturada do solo é de extrema importância, pois, a partir desses dados, poderá ser estimado o tempo que esses fluídos irão atingir a zona saturada do aquífero.

A metodologia utilizada para a determinação da condutividade hidráulica com o permeâmetro Guelph, baseada nas técnicas com uma altura de carga e com duas alturas de carga, mostrou-se satisfatória, já que a maioria dos resultados, bem como a média das duas técnicas e a média entre as duas técnicas, denotaram uma condutividade hidráulica baixa. Entretanto, é preciso frisar que ambos os testes foram realizados na mesma área de estudo. Em áreas distintas, como áreas florestadas, por exemplo, o resultado obtido possivelmente será outro, já que as condições da área e do solo influenciam nos resultados.

Levando-se em conta que o volume total da recarga é 157403 m³/ano, pode-se dizer que a qualidade dessas águas, subterrâneas e superficiais, está sendo alterada pela presença de chorume (Figuras 7 e 8) e possivelmente por metais pesados, já que em estudo realizado na área em questão, foram encontrados em amostras coletadas no horizonte B do solo, metais como Chumbo, Cobalto, Cobre, Cromo, Manganês, Níquel e Zinco, estando a grande maioria acima dos valores de prevenção, intervenção agrícola e intervenção industrial proposto pela CETESB (2005) ou dos valores de referência proposto pela MINERORAP (2005) (apud SOARES, 2006, p. 108). Com relação às águas subterrâneas, em especial, essa degradação possivelmente esteja ocorrendo tanto no aquífero freático, como no sistema aquífero Serra Geral, pois, durante as medições do nível estático, verificou-se que há uma forte conexão entre os dois tipos de aquíferos, provavelmente devido à ocorrência de inúmeras falhas, característica muito comum da Geologia regional.

Mesmo a condutividade hidráulica na área de estudo ter sido classificada como baixa, alertando para o fato de que esse parâmetro não equivale à velocidade real de percolação da água no solo, verificou-se que o chorume está infiltrando no solo, atingindo assim, a zona saturada do aquífero. A maior prova disso é o afloramento de chorume em área de várzea.



Figura 7 – Área de várzea com afloramento de chorume localizada a 477 m de altitude, 78 m a jusante da cota topográfica mais alta do aterro, 555 m. O local está situado ao lado do (PM 10), sentido leste (Figura 3), sendo o mesmo utilizado para pastagem de gado. Data: 2007. Fonte: Rodrigo Vitor B. Sousa.



Figura 8 - Chorume desaguando no córrego dos Piriquitos através de canalizações. Data: 2007. Fonte: Rodrigo Vitor B. Sousa.

Quanto à disposição final do lixo de forma inadequada é sabido que os lixões não-controlados, mais conhecidos por lixões a céu aberto, que incluem despejos industriais perigosos como, barris de efluentes líquidos ou lixos hospitalares, são os que merecem mais atenção, pois os riscos maiores de contaminação da águas subterrâneas estão associados a eles.

[...] Em muitos casos, lixões e aterros abandonados podem representar, por décadas, um perigo potencial para a água subterrânea, uma vez que não é usual o registro da natureza e a quantidade dos despejos lançados nestes locais (CEPIS, 1993, p.42).

A má disposição de resíduos sólidos no solo pode trazer sérias conseqüências à natureza e à saúde humana. Segundo Cherry et al., (1984) com relação a lixões ou aterros sanitários é reconhecido que são os compostos orgânicos dissolvidos nas águas adjacentes aos mesmos, que representam a maior periculosidade à saúde (apud PARISOT et.al, 1985, p.38).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Levando-se em consideração que as águas subterrâneas e superficiais estão sendo degradadas, o ciclo hidrológico na área em questão, não deve ser compreendido como um simples sistema, cujas variáveis, se restringem à precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e infiltração. Isso porque, os depósitos tecnogênicos, materializados nesse caso, na má disposição dos resíduos sólidos, interferem diretamente no ciclo hidrológico. Nesse sentido, é preciso levar em consideração as atividades antrópicas inseridas nesse processo, particulares dessa área de estudo. A adoção de um ponto de vista geossistêmico e socioambiental talvez seja o melhor caminho para a compreensão do problema evidenciado, já que esse depende em maior grau da transformação do espaço, da interferência da paisagem e do relevo, interferindo diretamente no ciclo hidrológico. Embora não tenha sido publicado nenhum trabalho que ateste a qualidade química das águas subterrâneas e superficiais adjacentes ao aterro controlado, as mesmas apresentam fortes indícios de estarem contaminada não só pelo chumbo, mas também por metais pesados. Por esse motivo, a má disposição dos resíduos sólidos na cidade de Londrina é um problema que deve ser melhor debatido, visando alternativas de curto e médio prazo, entre elas o encerramento das atividades no aterro. Ressalta-se ainda, que o volume da recarga determinado é apenas uma amostra do montante de água que está sendo degradado, uma vez que a despoluição de um aquífero, além de custoso é praticamente impossível. Os trabalhos de campo realizados para a elaboração dessa pesquisa, foram de extremo valor, pois possibilitaram uma maior aproximação entre a teoria e a prática. Entre testes com o permeâmetro Guelph e medição do nível estático, realizaram-se vinte e oito campos. O monitoramento periódico, incluindo coletas e análises de água, pode ser considerado uma ferramenta essencial para se evitar problemas dessa natureza. Espera-se que esse trabalho contribua de alguma forma para a realização de pesquisas futuras. Os dados aqui apresentados constituem a base da monografia de conclusão de curso intitulada "Monitoramento hidrogeológico como ferramenta de avaliação à degradação dos recursos hídricos: Estudo realizado no aterro controlado de Londrina – PR", disponível na biblioteca central da UEL, e na secretaria do curso de Geografia, Departamento de Geociências - UEL.

REFERÊNCIAS

- CABRAL, Jaime. Movimento das Águas Subterrâneas. In: FEITOSA, Fernando. A.C; FILHO, João. M (Org). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997, p. 41.
- CELLIGOI, André. **Recursos Hídricos Subterrâneos da Formação Serra Geral em Londrina – PR**, 1993, p.24. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- CELLIGOI, André; SOUSA, Rodrigo V. B; MEDEIROS, Hugo R; LAMÔNICA, Diogo; MACAHADO, A de C. Utilização do permeâmetro Guelph na determinação da condutividade hidráulica da zona não- saturada do aquífero freático nas imediações do lixão de Londrina – PR. In: XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2006. **Anais...** Curitiba: ABAS - Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, p.6, 2006. Cd-rom.
- Centro Pan-Americano de Engenharia Sanitária e Ciências do Ambiente - CEPIS. **Poluição das águas subterrâneas. Um documento executivo da situação da América Latina e Caribe com relação ao abastecimento de água potável**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, 1993. p.15 - 33.
- COELHO NETTO, Ana L. Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia. In: GUERRA, Antonio. J. T. CUNHA, Sandra B (Ogr). **Geomorfologia. Uma Atualização de Bases e Conceitos** – 6º ed – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. p.115; 120.
- COSTA, Waldir Duarte. Uso e Gestão de Água Subterrânea. In: FEITOSA, Fernando. A.C; FILHO, João. M (Org). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997, p. 347.
- Departamento Nacional da Produção Mineral - DNPM. **Geologia do Brasil**. Brasília: 1984, p. 341 – 347.
- FUSCALDO, Wladimir. C. **Resíduos Sólidos: Práticas e Conceitos. Um estudo a partir da experiência de Londrina**, 2001. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São de Paulo, São Paulo, 2001.
- GUERRA, Antônio T. GUERRA, Antônio. J. T. **Novo Dicionário Geológico - Geomorfológico**. 3º ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. p.153.
- KIEHL, Edmar José. **Manual de Edafologia: Relações Solo – Planta**. São Paulo: Editora Agrônômica Ceres, 1979, p. 112 - 125.
- MAACK, Reinhard. **Geografia Física do Estado do Paraná**. 2º ed. Rio de Janeiro: J. Olympio; Curitiba: Secretaria da Cultura e do Esporte do Governo do Estado do Paraná, 1981. p.233 - 420.
- Minerais do Paraná S.A – MINEROPAR. **Atlas Geológico do Estado do Paraná**. Curitiba: Governo do Estado do Paraná, 2001, p.15. CD-ROM.
- PARISOT, E.H; GUIGUER Jr, N; REBOUÇAS, Aldo C; CABRAL Jr, D; DUARTE, Uriel. Monitoramento das águas subterrâneas adjacentes ao aterro sanitário de Taubaté (SP)- primeiros resultados. In: Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas. **Anais...** São Paulo: CEPAS/IG-USP, série científica, 16: p. 32 – 45, 1985.
- PETRI, Setembrino; FÚLFARO, José Vicente. **Geologia do Brasil**. São Paulo: Universidade de São Paulo, v. 9, 1983. p. 235.
- SANTOS, Maurício M. dos. **Avaliação hidrogeológica para determinação da vulnerabilidade natural do aquífero freático em área selecionada na cidade de Londrina (PR)**, 2005, p.40 – 65. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade do Estado de São Paulo, Rio Claro, 2005.

SOARES, Richard P. **Caracterização Geoquímica dos Solos Lateríticos da Área do Sítio de Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos de Londrina, PR**, 2006, p.17 – 136. Dissertação (Magister Scientiae) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2006.

SOTO, Miguel A. A. **Estudo da Condutividade Hidráulica em Solos Não Saturados**, 1999, p.5 – 72. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

SOUSA, Rodrigo V. B. **Monitoramento hidrogeológico como ferramenta de avaliação à degradação dos recursos hídricos: Estudo realizado no aterro controlado de Londrina – PR**, 2007, 133 p. TCC (Geografia), Universidade Estadual de Londrina, Londrina.