

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

***AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA PARA DETERMINAÇÃO DA
VULNERABILIDADE NATURAL DO AQUÍFERO FREÁTICO EM ÁREA
SELECIONADA NA CIDADE DE LONDRINA (PR)***

***ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM
GEOCIÊNCIAS E MEIO AMBIENTE***

Maurício Moreira dos Santos

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Rio Claro – SP
2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS
Campus de Rio Claro

***AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA PARA DETERMINAÇÃO DA
VULNERABILIDADE NATURAL DO AQUÍFERO FREÁTICO EM ÁREA
SELECIONADA NA CIDADE DE LONDRINA (PR).***

Maurício Moreira dos Santos

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Rita Caetano Chang.

Dissertação elaborada junto ao Programa de Pós-Graduação em Geociências-Área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente, para obtenção do Título de Mestre em Geociências.

Rio Claro (SP)
2005

Comissão Examinadora

- aluno(a) -

Rio Claro, _____ de _____ de _____

Resultado:

A Deus acima de tudo,

aos meus pais e irmãos dedico.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não teria sido possível sem o auxílio de pessoas e instituições que, direta ou indiretamente, colaboraram em sua elaboração.

Minha admiração e os meus sinceros e especiais agradecimentos à Dr^a. Maria Rita Caetano Chang, pela constante orientação e revisão criteriosa do trabalho.

Ao Dr. Chang Hung Kiang, pelo apoio e sugestões desde o início da pesquisa.

Ao Dr. André Celligoi, pelo companheirismo, sugestões, discussões e pela liberação dos dados referentes aos perfis descritivos dos poços.

Ao Geólogo Dr. Flávio de Paula e Silva e ao Dr. Carlos Alberto Nóbrega pelas sugestões e discussões em temas relevantes desta pesquisa.

Aos meus familiares e em especial a Ângela Cristina Alves de Melo, pelo amor carinho, e compreensão durante esse período.

Aos meus amigos Adriano Moreira Trindade e Jerri Augusto da Silva, mesmo estando em Londrina, obrigado pelo apoio, do contrário não seria possível concluir este trabalho.

Ao técnico e amigo Paco, pelo auxílio nos levantamentos de campo e apoio no decorrer do trabalho.

Aos meus amigos e colegas do LEBAC, em especial aos geólogos Eduardo, Andresa, Marcão, Joseli, Fernando, Márcio e Didier que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento e a execução deste trabalho.

Aos alunos da seção de pós-graduação em Geociências, em especial aos meus amigos Shirley, Mirna, Paulinho, Julião, Claudinha, Ana Cândida, Ana Paula, Maira, Eduardo, Luquinha e Susana, pelo companheirismo ao longo do mestrado.

À FUNDUNESP, pela concessão de bolsa durante o período de realização do mestrado.

Enfim, a todos que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Utilizando-se de dados hidrogeológicos em área selecionada na cidade de Londrina (PR), foi realizada avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero constituído pelo manto de alteração das rochas basálticas da Formação Serra Geral, através da aplicação do índice DRASTIC. Este método possui características de simplicidade, de baixo custo, de fácil aplicação e é amplamente utilizado em estudos de vulnerabilidade natural. A caracterização da susceptibilidade do meio à poluição fornece subsídios para tomada de decisões quanto ao uso e ocupação do solo e conseqüentemente ao planejamento sócio-econômico. Na zona não-saturada, através dos ensaios de infiltração, obteve-se baixa permeabilidade dos solos, com variações entre 10^{-3} cm/s e 10^{-5} cm/s. Os ensaios de *slug*, na zona saturada, por sua vez, indicaram condutividade hidráulica de 10^{-1} a 10^{-4} cm/s, apresentando média ao redor de 10^{-2} cm/s. Dessa forma, o poluente ao atingir a zona dos saprolitos, tende a se espalhar rapidamente através das linhas de fluxo subterrâneo. O fluxo preferencial subterrâneo apresenta-se orientado de sul para norte, seguindo grosso modo o declive do terreno. Em geral, na área de estudo predomina a vulnerabilidade moderada, enquanto que nas proximidades do ribeirão Lindóia e nos divisores d'água, as vulnerabilidades foram classificadas como alta e baixa, respectivamente.

Palavras-chave: vulnerabilidade natural, índice DRASTIC, fluxo subterrâneo, ensaios de *slug*, ensaios de infiltração.

ABSTRACT

The DRASTIC index was used for the evaluation of the natural vulnerability of groundwater constituted by the mantle of weathering of the basaltic rocks of the Serra Geral Formation. DRASTIC method was used in this evaluation, for its simplicity, low cost, easy application and it has been widely used for analysis of the natural vulnerability. The characterization of the environmental to the pollution supports the decisions about ground use and occupation for partner-economic planning. Hydraulic conductivities in the unsaturated and saturated zones, as well as the groundwater flow direction were determined. In the unsaturated zone, permeability of the soils is low, as revealed by infiltrations tests with ranging 10^{-3} cm/s to 10^{-5} cm/s. Hydraulic conductivity obtained from *slug* tests range from 10^{-1} to 10^{-4} cm/s, with average around 10^{-2} cm/s. The flow direction occurs from south to north, accompanying the general slope of the landscape. The pollutant when reaches the zone of the saprolite, tends to spread quickly through the groundwater flow lines. In general, the vulnerability of the studied area can be classified as moderate, while that in the water divide region and in the vicinity of ribeirão Lindóia, are ranked low and high, respectively.

Keywords: natural vulnerability, DRASTIC index, flow direction, *slug* test, infiltration test.

SUMÁRIO

| | |
|--|--------------------------------------|
| AGRADECIMENTOS | I |
| RESUMO | II |
| ABSTRACT | III |
| SUMÁRIO | IV |
| ÍNDICE | V |
| ÍNDICE DE FIGURAS | VIII |
| ÍNDICE DE TABELAS | XII |
| ÍNDICE DE QUADROS | XIII |
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 14 |
| CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO | 22 |
| CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. |
| CAPÍTULO 4 - CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA | ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. |
| CAPÍTULO 5 – AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL AqüÍFERA | ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. |
| CAPÍTULO 6 – AVALIAÇÃO DO FLUXO SUBTERRÂNEO | ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. |
| CAPÍTULO 7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES | ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. |
| CAPÍTULO 8 - BIBLIOGRAFIA | ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. |

ÍNDICE

| | |
|--|--------------------------------------|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 - Localização da Área | 17 |
| 1.2 - Premissas..... | 20 |
| 1.3 - Objetivos | 21 |
| CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO..... | 22 |
| 2.1 - Recursos Hídricos..... | 22 |
| 2.2 - Considerações sobre o Ciclo Hidrológico | 24 |
| 2.2.1 – Água no Solo e Infiltração | 27 |
| 2.2.2 – Movimento da Água Subterrânea..... | 28 |
| 2.2.2.1 - Mecanismos de transferência de contaminantes. Erro! Indicador não definido. | |
| 2.3 - Vulnerabilidade Natural de Aquíferos..... | <i>Erro! Indicador não definido.</i> |
| 2.3.1 – Métodos de Avaliação da Vulnerabilidade Natural de Aquíferos..... | Erro! Indicador não definido. |
| 2.3.2 – Escolha do Índice DRASTIC | Erro! Indicador não definido. |
| 2.3.3 – Limitações dos Métodos de Avaliação da Vulnerabilidade Natural ... | Erro! Indicador não definido. |
| 2.3.3.1 - Escala de trabalho..... | Erro! Indicador não definido. |
| CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. |
| 3.1 – Etapas de Trabalho..... | <i>Erro! Indicador não definido.</i> |
| 3.2 - Índice Drastic | <i>Erro! Indicador não definido.</i> |
| 3.3 - Poços de Monitoramento | <i>Erro! Indicador não definido.</i> |
| 3.4 - Balanço Hídrico Regional | <i>Erro! Indicador não definido.</i> |
| 3.5 - Ensaios de Condutividade Hidráulica (In situ). <i>Erro! Indicador não definido.</i> | |
| 3.5.1 - Lei de Darcy..... | Erro! Indicador não definido. |
| 3.5.1.1 - Permeâmetro Guelph | Erro! Indicador não definido. |
| 3.5.1.2 - Método de slug test | Erro! Indicador não definido. |
| 3.6 - Topografia | <i>Erro! Indicador não definido.</i> |
| CAPÍTULO 4 - CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA..... | ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO. |

4.1 - Aspectos Sócio-Econômicos Erro! Indicador não definido.

4.1.1 - Histórico da Ocupação de Londrina **Erro! Indicador não definido.**

4.1.2 - Característica de Uso e Ocupação do Solo na Área de Estudo..... **Erro! Indicador não definido.**

4.2 - Aspectos do Meio Físico Natural Erro! Indicador não definido.

4.2.1 - Aspectos Climáticos..... **Erro! Indicador não definido.**

4.2.2 - Hidrografia **Erro! Indicador não definido.**

4.2.3 - Geomorfologia **Erro! Indicador não definido.**

4.2.4 - Solos **Erro! Indicador não definido.**

4.2.5 - Geologia Regional..... **Erro! Indicador não definido.**

4.5.2.1 - Aspectos da geologia local..... **Erro! Indicador não definido.**

4.2.6 - Hidrogeologia **Erro! Indicador não definido.**

CAPÍTULO 5 – AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL AQUÍFERA ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

5.1 - Profundidade do Lençol Freático (D)..... Erro! Indicador não definido.

5.2 - Recarga do Aquífero (R) Erro! Indicador não definido.

5.2.1 - Balanço Hídrico..... **Erro! Indicador não definido.**

5.2.2 - Recarga Anual **Erro! Indicador não definido.**

5.3 – Material do Aquífero (A) Erro! Indicador não definido.

5.4 - Tipo de Solo (S) Erro! Indicador não definido.

5.5 – Topografia (T)..... Erro! Indicador não definido.

5.6 - Impacto da Zona Não-Saturada (I)..... Erro! Indicador não definido.

5.6.1 – Ensaio de Condutividade Hidráulica na Zona Não-Saturada **Erro! Indicador não definido.**

5.6.2 – Análise dos Perfis Descritivos dos Poços de Monitoramento..... **Erro! Indicador não definido.**

5.7- Condutividade Hidráulica (C) Erro! Indicador não definido.

5.8 - Mapa de Vulnerabilidade Local Erro! Indicador não definido.

CAPÍTULO 6 – AVALIAÇÃO DO FLUXO SUBTERRÂNEO ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

6.1 – Superfície Freática..... Erro! Indicador não definido.

6.2 – Velocidade Linear de fluxo do aquífero Erro! Indicador não definido.

6.2.1 – Velocidade Linear na Zona Saturada **Erro! Indicador não definido.**

6.2.2 – Velocidade Linear na Zona Não-Saturada **Erro! Indicador não definido.**

CAPÍTULO 7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

CAPÍTULO 8 - BIBLIOGRAFIAERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|--------------------------------------|
| Figura 1- Mapa de localização da área de estudo. Modificado de IPPUL (2002). | 19 |
| Figura 2 – Distribuição e ocorrência de água no mundo..... | 23 |
| Figura 3 – Ciclo hidrológico e seus principais componentes. Fonte: Karmann (2001)..... | 26 |
| Figura 4 - Relação espacial entre a topografia do terreno e o lençol freático. Notar a superfície mais suavizada do lençol freático e a convergência das linhas de fluxo de água subterrânea (setas). Modificado de Karmann (2001). | Erro! Indicador não definido. |
| Figura 5 – Esquema conceitual para a determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas (Foster & Hirata, 1993). | Erro! Indicador não definido. |
| Figura 6 - Parâmetros incorporados no método DRASTIC. Modificado de Oliveira & Lobo Ferreira (2004). | Erro! Indicador não definido. |
| Figura 7– Esquema de construção dos poços de monitoramento. | Erro! Indicador não definido. |
| Figura 8- Experimento de Darcy (modificado de Freeze & Cherry, 1979)..... | Erro! Indicador não definido. |
| Figura 9 - Realização do ensaio de infiltração <i>in situ</i> utilizando o Permeâmetro <i>Guelph</i>..... | Erro! Indicador não definido. |
| Figura 10 - Esquema de funcionamento de um Permeâmetro <i>Guelph</i> (modificado de Oliva, 2002). | Erro! Indicador não definido. |
| Figura 11 - Bulbo de saturação d'água no solo (modificado de Oliva, 2002). | Erro! Indicador não definido. |
| Figura 12- Desenho esquemático do teste de slug com a inserção (A) e retirada (B) de cilindro sólido. Modificado de Pede (2004). | Erro! Indicador não definido. |

- Figura 13 – Desenho esquemático do teste de *slug*, com os parâmetros geométricos necessários para estimar a condutividade hidráulica, com base no método de Hvorslev (1958).....**Erro! Indicador não definido.
- Figura 14 – Detalhe da área de estudo.**Erro! Indicador não definido.
- Figura 15 – Evolução da população urbana de Londrina de 1970 a 2003. Fonte: IBGE (censo demográfico 1970, 1980, 1991, 2003 *apud* Trindade 2004).**Erro! Indicador não definido.
- Figura 16 – Mapa relativo aos aspectos do uso e ocupação do solo.....**Erro! Indicador não definido.
- Figura 17 - Tipos climáticos do Estado do Paraná - fonte: IAPAR (1984).**Erro! Indicador não definido.
- Figura 18 - Pluviosidade no município de Londrina. Os valores são expressos em alturas mensais médias de chuva (mm), no intervalo de 1993 a 2001. Fonte: IAPAR.**Erro! Indicador não definido.
- Figura 19 – Temperaturas médias no município de Londrina no período de 1993 a 2001, medidas na estação pluviométrica de Londrina. Fonte: IAPAR.....**Erro! Indicador não definido.
- Figura 20 – Principais bacias hidrográficas na área urbana de Londrina.....**Erro! Indicador não definido.
- Figura 21– Vista geral da área de estudo: observa-se em primeiro plano, um relevo suave com declividades pouco acentuadas; ao fundo, a drenagem do ribeirão Lindóia e uma pequena mata ciliar.....**Erro! Indicador não definido.
- Figura 22 – Bloco diagrama evidenciando a conformação topográfica da área de estudo.**Erro! Indicador não definido.
- Figura 23 – Mapa pedológico do município de Londrina. Modificado de Stipp (2003).....**Erro! Indicador não definido.
- Figura 24 – Localização da Bacia Sedimentar do Paraná. Modificado de Petri & Fúlfaro (1983).....**Erro! Indicador não definido.
- Figura 25 – Mapa Geológico do Paraná. Fonte MINEROPAR (2000)Erro!** Indicador não definido.

- Figura 26 – Mapa geológico do município de Londrina. Modificado de MINEROPAR 2000.Erro! Indicador não definido.**
- Figura 27 – Matacões de constituição basáltica de coloração cinza, presentes na drenagem do ribeirão Lindóia.....Erro! Indicador não definido.**
- Figura 28 - Perfil de solo em transição com o saprolito (base) intensamente fraturado, de coloração cinza a ocre amarelada na rodovia que liga os municípios de Londrina e Ibiporã.Erro! Indicador não definido.**
- Figura 29 – Detalhe do afloramento de basalto alterado (acebolamento) de coloração ocre amarelada e intensamente fraturado (saprolito) na rodovia que liga os municípios de Londrina e Ibiporã.....Erro! Indicador não definido.**
- Figura 30 – Fotografia aérea de 1980, evidenciando os lineamentos estruturais.Erro! Indicador não definido.**
- Figura 31 – Diáclases sub-verticais e sub-horizontais de pequeno porte com surgência de água na rodovia que liga os municípios de Londrina e Ibiporã.Erro! Indicador não definido.**
- Figura 32 – Mapa de localização dos poços de monitoramento na área de estudoErro! Indicador não definido.**
- Figura 33 – Mapa de profundidade do Lençol Freático (NA).Erro! Indicador não definido.**
- Figura 34 – Profundidade do lençol freático segundo os intervalos de classes de profundidade (vide Tabela 3).Erro! Indicador não definido.**
- Figura 35 – Gráfico exibindo o extrato do balanço hídrico médio mensal entre 1993 e 2001.Erro! Indicador não definido.**
- Figura 36 – Gráfico exibindo distribuição de precipitação, dos valores médios mensais de temperatura e evapotranspiração potencial (ETP) no período entre 1993 a 2001.Erro! Indicador não definido.**
- Figura 37 – Gráfico de deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica médio mensal para os anos de 1993 a 2001.Erro! Indicador não definido.**
- Figura 38 - Gráfico da vazão do ribeirão Cafezal evidenciando o período de recessão.....Erro! Indicador não definido.**

Figura 39 – Mapa de localização das seções litofaciológicas.Erro! Indicador não definido.

Figura 40 - Seção litofaciológica A-B referente a área de estudo.Erro! Indicador não definido.

Figura 41 - Seção litofaciológica C-D referente a área de estudo.Erro! Indicador não definido.

Figura 42 - Distribuição das classes texturais (Quadro 3) do material constitutivo do solo, com modificações para muito argiloso. Modificado: Soil Survey Manual (apud Lemos & Santos, 1984)......Erro! Indicador não definido.

Figura 43 – Mapa de declividades referente à área de estudo.Erro! Indicador não definido.

Figura 44 – Mapa indicando a localização dos ensaios de infiltração *in situ* do tipo *Guelph* na área de estudo......Erro! Indicador não definido.

Figura 45 - Mapa de vulnerabilidade natural à poluição do aquífero freático local......Erro! Indicador não definido.

Figura 46 – Bloco diagrama ilustrando a superfície potenciométrica do lençol freático na área de estudo......Erro! Indicador não definido.

Figura 47 – Mapa de condutividade hidráulica referente à área de estudo utilizando o permeâmetro *Guelph*......Erro! Indicador não definido.

Figura 48 – Mata ciliar reposta. Em destaque, espécies de árvores nativas replantadas, de pequeno a médio porte......Erro! Indicador não definido.

ÍNDICE DE TABELAS

- Tabela 1 – Parâmetros pertencentes ao índice DRASTIC e seus pesos relativos ou fatores de ponderação utilizados para a quantificação da vulnerabilidade natural de aquíferos.**Erro! Indicador não definido.
- Tabela 2- Valores correspondentes ao índice de vulnerabilidade DRASTIC e seus respectivos intervalos.**Erro! Indicador não definido.
- Tabela 3 – Classes de valores de pesos e índices de ponderação correspondentes à profundidade do nível d’água.**Erro! Indicador não definido.
- Tabela 4 – Relação dos poços de monitoramento e seus respectivos níveis d’água.**Erro! Indicador não definido.
- Tabela 5 – Classes de recarga e valores correspondentes aos pesos e índices de ponderação.**Erro! Indicador não definido.
- Tabela 6 - Descrição do material do aquífero e seus respectivos pesos e índices de ponderação.**Erro! Indicador não definido.
- Tabela 7 - Concentrações de silte, argila e areia e valores de porosidade efetiva presentes em latossolos do município de Rolândia. ..**Erro! Indicador não definido.
- Tabela 8 – Tipos de solos e seus respectivos pesos e índices de ponderação.**Erro! Indicador não definido.
- Tabela 9 – Classes de valores de declividade e seus respectivos pesos e índices de ponderação.**Erro! Indicador não definido.
- Tabela 10 - Valores correspondentes aos pesos e índices de ponderação para os materiais que compõem a zona não-saturada.**Erro! Indicador não definido.
- Tabela 11 – Valores de condutividade hidráulica (K) e permeabilidade intrínseca (k_i), calculados através dos ensaios de infiltração com permeâmetro *Guelph*.**Erro! Indicador não definido.
- Tabela 12 – Classes e valores de condutividade hidráulica (metros/dia) e seus respectivos pesos e índices de ponderação.**Erro! Indicador não definido.

Tabela 13 – Valores de condutividade hidráulica obtidos através de ensaios de slug, segundo Hvorslev.Erro! Indicador não definido.

Tabela 14 - Valores de condutividade hidráulica obtidos através de ensaios de slug nos poços de monitoramento que atingem o saprolito.Erro! Indicador não definido.

Tabela 15 – Valores representativos do peso do índice DRASTIC e os seus índices de ponderação de acordo com os parâmetros analisados.Erro! Indicador não definido.

Tabela 16 - Velocidade linear média da área de estudo. K = condutividade hidráulica. dh/dl = gradiente hidráulico. n_e = porosidade efetiva. V_x = velocidade linear média.Erro! Indicador não definido.

Tabela 17 - Velocidade linear média da área de estudo. K = condutividade hidráulica. dh/dl = gradiente do terreno. n_e = porosidade efetiva. V_x = velocidade linear média.Erro! Indicador não definido.

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Índices de vulnerabilidade natural à poluição de aquíferos e seus respectivos fatores de ponderação.Erro! Indicador não definido.

Quadro 2 – Classificação da condutividade hidráulica do solo.Erro! Indicador não definido.

Quadro 3 - Valores de condutividade hidráulica e permeabilidade intrínseca.Erro! Indicador não definido.

Quadro 4 – Atividades de uso e ocupação do solo potencialmente poluidoras das águas subterrâneas.Erro! Indicador não definido.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A atual sociedade, no anseio de ampliar o domínio sobre os espaços terrestres e o controle absoluto sobre o capital, exerce atividades que produzem inúmeros impactos ambientais e intensifica a exploração insustentável dos recursos naturais, provocando a inviabilização permanente dos mecanismos que garantem o equilíbrio do planeta e colocando em risco a própria sobrevivência do ser humano na superfície do globo.

As comunidades humanas vêm apresentando taxas elevadas de crescimento populacional associadas ao rápido processo de urbanização e industrialização. No Brasil, este crescimento é geralmente associado à falta de planejamento para o uso e ocupação do solo urbano, culminando com a apropriação de locais inadequados para o estabelecimento humano e trazendo riscos à saúde com queda progressiva da qualidade de vida.

Pinto (1979) destaca que o crescimento populacional leva à busca imperiosa por terra para a multiplicação de alimentos e a instalação das comunidades humanas, o que instaura a intensificação da exploração dos recursos não renováveis e a procura por novos.

Do mesmo modo, o processo de ocupação desordenado do espaço traz sérias conseqüências para o equilíbrio dos sistemas ambientais, e pesado ônus para o poder público.

Conforme Ross (1994), os ambientes naturais, salvo em algumas regiões do planeta, apresentam ou apresentavam-se em estado de equilíbrio dinâmico¹, até o momento em que o ser humano passa a interferir cada vez mais intensamente na exploração dos recursos naturais. Ou seja, em decorrência de atividades antrópicas muitas vezes predatórias sobre o meio físico, este acaba sofrendo

¹ A teoria do equilíbrio dinâmico do meio físico foi proposta por Hack (1960) *apud* Ross (1994, p.26), e tem como princípio básico o pressuposto de que o ambiente natural encontra-se em estado de equilíbrio, porém não estático, graças aos mecanismos de funcionamento dos diversos componentes do sistema.

aceleração de sua dinâmica, o que tem desencadeado sérios problemas, tanto de ordem ambiental quanto sócio-econômica.

O estudo das causas, dinâmicas e conseqüências das ações antrópicas sobre o meio ambiente constitui ferramenta de valor imprescindível para dar condições de sustentabilidade às atividades ligadas ao sistema produtivo, influenciando o mínimo possível no equilíbrio do meio ambiente e ao mesmo tempo garantindo o bem-estar do indivíduo.

Dentre as agressões antrópicas que atingem e modificam profundamente o meio ambiente, merece destaque a deterioração freqüente dos recursos hídricos.

Nesse sentido, os mananciais subterrâneos, em razão de uma visão imediatista de uso, somado à melhor qualidade de suas águas em relação à maior parte dos mananciais superficiais vêm sendo super explorados em algumas regiões para o abastecimento hídrico total ou complementar.

Além disso, as águas subterrâneas têm sido afetadas periodicamente por agentes poluidores e/ou contaminadores², vinculados principalmente ao processo produtivo econômico, devido à falta de ações voltadas para a proteção dos aquíferos. Paralelamente, é cada vez mais clara a consciência dos responsáveis pela gestão das águas subterrâneas das limitações técnicas e principalmente econômicas para remediar a contaminação existente, sobretudo em países em desenvolvimento. Como resultado dessa situação, tem-se notado a popularização do uso e do próprio desenvolvimento de técnicas de mapeamento de vulnerabilidade à poluição de aquíferos, como uma ferramenta para a sua proteção.

Dessa forma, a manutenção da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos remete a uma especial preocupação com a proteção dos aquíferos. Nesse sentido, o presente trabalho propõe a avaliação da vulnerabilidade natural do sistema aquífero, localizado no domínio dos basaltos da Formação Serra Geral, em uma área na porção noroeste da cidade de Londrina-Pr (Figura 1), tendo em vista a importância da preservação desse importante recurso hídrico para o meio

². As definições para poluentes e contaminantes serão abordadas no Capítulo 2.

ambiente e para o planejamento sócio-econômico regional, dada a potencialidade exploratória sustentável de suas reservas.

Do ponto de vista hidrogeológico, a área de estudo possui ocorrências diferenciadas de aquíferos. O primeiro está condicionado às descontinuidades das rochas basálticas que formam o embasamento da área, ou seja, devido sua gênese o basalto possui características de rochas cristalinas, de modo que para a circulação e o armazenamento de água subterrânea são necessárias a existência e distribuição de fraturas. Uma segunda ocorrência está restrita ao manto de alteração da própria rocha basáltica, constitui um meio poroso relativamente homogêneo, composto principalmente por material argiloso, caracterizando um aquífero freático e livre em toda sua extensão.

Neste trabalho, foram feitas análises de vulnerabilidade natural do aquífero do segundo tipo, uma vez que o mesmo possui maior susceptibilidade a uma carga poluente, haja vista suas características intrínsecas de aquífero livre.

Para a análise da vulnerabilidade natural do aquífero freático na área de estudo, foi utilizado o índice DRASTIC, o qual possui características de simplicidade e utilidade para ser considerado como referência. Somam-se a isso, inúmeros trabalhos realizados a partir da aplicação desse índice, pois é um dos métodos mais difundidos atualmente no mundo. Em conjunto com a análise da vulnerabilidade natural será realizada uma avaliação hidrogeológica que disponibilizará resultados dos direcionamentos preferenciais das linhas de fluxo do aquífero freático objeto de estudo.

O local escolhido para estudo está inserido nos limites da área urbana do município de Londrina, no norte do estado do Paraná, mais precisamente na bacia hidrográfica do ribeirão Lindóia. A escolha desta área deve-se principalmente ao acelerado processo de ocupação urbana industrial que vem ocorrendo nessa importante bacia hidrográfica, sobretudo através da construção de conjuntos habitacionais, instalação de indústrias e de terminais de combustíveis que, associados ao uso indiscriminado do solo, desencadeiam sérios problemas para manutenção da qualidade dos recursos hídricos.

O presente estudo justifica-se pela necessidade de elaboração de estratégias para a defesa do aquífero freático local, através de um estudo hidrogeológico que visa principalmente a avaliação da vulnerabilidade natural à poluição.

1.1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

O município de Londrina está situado na região norte do estado do Paraná, sendo os limites da área urbana inseridas entre as coordenadas geográficas de 23° 14' e 23° 23' de latitude sul e 51° 05' e 51° 14' de longitude oeste (Figura 1). Os limites municipais são: ao norte, Sertanópolis, Cambé e Ibiporã; a oeste, Arapongas, Apucarana e Marilândia do Sul; ao sul, Marilândia do Sul, Tamarana e Ortigueira; a leste, São Jerônimo da Serra e Assaí. A linha imaginária do Trópico de Capricórnio (23°27' latitude sul) corta o município de Londrina na sua porção central, na altura da sede do distrito de Maravilha.

O município está dividido em 08 (oito) distritos administrativos: Warta, Espírito Santo, São Luiz, Irerê, Maravilha, Paiquerê, Guaravera e Lerroville.

Londrina hoje é considerada a terceira maior cidade do sul do país, com uma população estimada de 467.334 habitantes e densidade demográfica de 272,35 hab./km² (IBGE, 2003).

O local de estudo possui área de aproximadamente 480.000 m², inserida numa importante bacia hidrográfica na área urbana de Londrina, mais precisamente à margem direita do ribeirão Lindóia, sendo este localizado na porção norte da cidade com altitudes variando entre 470 e 630 metros acima do nível do mar (Figura 1). Esse ribeirão é um tributário do ribeirão Jacutinga, que por sua vez é um afluente do rio Tibagi. Sua nascente localiza-se a oeste de Londrina, nas proximidades do município de Cambé. Esse curso hídrico atravessa paralelamente toda a porção norte da cidade, até confluir-se com o ribeirão Quati, onde ambos

seguem e passam a formar o ribeirão Ibiporã, principal manancial de abastecimento do município que leva o mesmo nome.

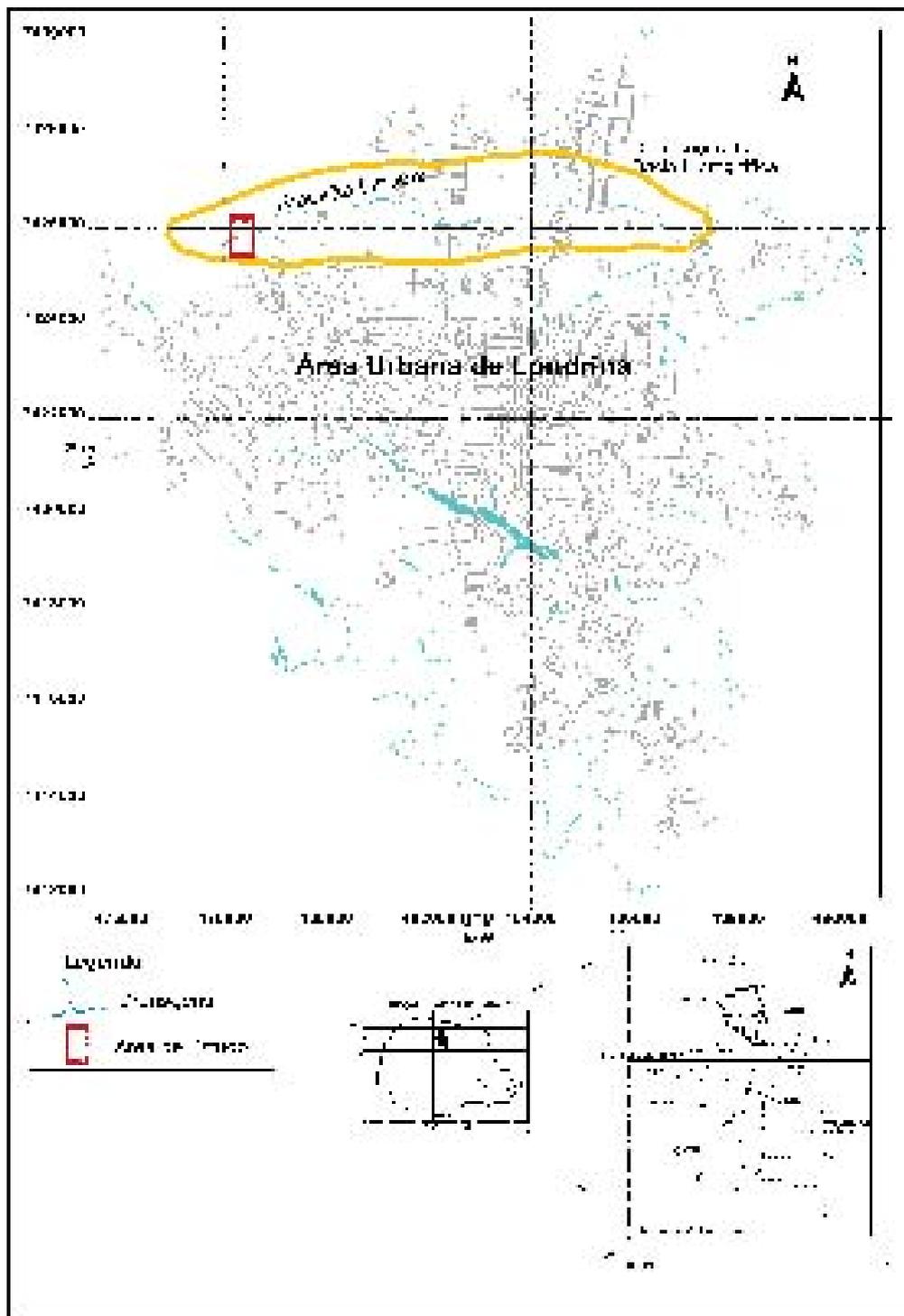


Figura 1- Mapa de localização da área de estudo. Modificado de IPPUL (2002).

1.2 - PREMISSAS

O estudo realizado justifica-se pelas seguintes premissas:

- ✓ inúmeras atividades ligadas ao sistema produtivo e o uso e a ocupação indiscriminadas do solo, causam sérios danos ambientais aos recursos hídricos;
- ✓ quanto maior o grau de vulnerabilidade, maior é a possibilidade de migração de uma série de compostos químicos orgânicos e inorgânicos através da zona não saturada, atingindo dessa maneira a zona saturada e, portanto poluindo ou contaminando as águas subterrâneas nas adjacências da fonte poluidora;
- ✓ os índices de vulnerabilidade são ferramentas úteis para construção de mapas temáticos que auxiliam na proteção e manutenção da qualidade da água de aquíferos, pois contribuem para o planejamento do uso e ocupação do solo;
- ✓ o fluxo das águas subterrâneas, uma vez em contato com uma fonte poluidora transporta seus produtos ao longo de seu deslocamento, gerando assim uma "pluma" poluente;
- ✓ dependendo da constituição dos estratos geológicos, estes podem apresentar maior ou menor permeabilidade ou porosidade, afetando assim a forma e a velocidade e por conseguinte, a distancia de deslocamento de uma nuvem poluente.

O presente trabalho fundamenta-se na hipótese da aplicação do índice DRASTIC em escala local, dada sua importância nas geociências como ferramenta no auxílio da proteção e monitoramento de aquíferos, tendo em vista que a qualidade das águas está em constante ameaça, devido à falta de planejamento de uso e ocupação do solo e mesmo por ações equivocadas para proteção de aquíferos.

1.3 - OBJETIVOS

O objetivo principal da presente pesquisa é a realização de estudos hidrogeológicos do aquífero freático em área selecionada do município de Londrina (vide Figura 1), nos domínios da Formação Serra Geral, visando avaliar o grau de vulnerabilidade natural através da aplicação do método DRASTIC. Além disso, caberá avaliar se o método escolhido é realmente adequado às condições atuais deste estudo.

Antecedendo a aplicação do índice DRASTIC, vários procedimentos e levantamentos de dados são necessários, os seguintes:

- ✓ caracterização geral da área em seus aspectos sócio-econômicos e do meio físico natural, incluindo a construção de mapa de declividade local;
- ✓ balanço hídrico regional objetivando as perdas e/ou ganhos do ciclo hidrológico;
- ✓ ensaios de condutividade hidráulica para fins de cálculo das velocidades de fluxo subterrâneo;
- ✓ análise pormenorizada dos perfis dos poços de monitoramento para reconhecimento dos materiais presentes na zona não-saturada e zona saturada;
- ✓ a construção de um mapa potenciométrico para análise do fluxo subterrâneo local;
- ✓ e, finalmente, construção de um mapa local indicando a vulnerabilidade natural à poluição do aquífero freático na área de estudo através da aplicação do índice DRASTIC.

Para tanto, será utilizado o referencial teórico apropriado, conforme apresentado nos próximos capítulos.

CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 - RECURSOS HÍDRICOS

A água constitui um dos elementos físicos mais importantes na construção da paisagem terrestre, interligando fenômenos da atmosfera inferior e da litosfera e interferindo na vida vegetal animal e humana, a partir da interação com os demais elementos do ambiente de drenagem. Assim, a água é fator de equilíbrio para os ecossistemas e primordial para o desenvolvimento humano, mas nem por isso sua preservação vem sendo respeitada.

Dessa Forma, os recursos hídricos são objeto de estudo de natureza multidisciplinar, despertando o interesse de especialistas de diversas áreas como: Agronomia, Biologia, Engenharias, Geografia, Geologia, entre outras. Em termos práticos, esses estudos visam, em última análise, o impedimento ou a solução de problemas ambientais impulsionados pela entrada de águas pluviais no domínio das bacias hidrográficas, cujos efeitos podem propagar-se à curta ou longa distância das áreas efetivamente problematizadas.

A ideologia desenvolvimentista do capital, agregado a uma sociedade consumista provocou, sobretudo nas últimas décadas, um aumento na demanda de água para o consumo nas mais diversas atividades, além da progressiva degradação dos mananciais. Segundo Ferreira (1992), o desenvolvimento acelerado do meio urbano, industrial e agrícola, desencadeou disputas pela utilização da água, levando à necessidade da criação de sistemas reguladores e de políticas de gerenciamento, surgindo então uma nova definição: a de *recursos hídricos*.

Conforme o DAEE (*apud* Ferreira 1992, p. 3),

Na moderna concepção de Recursos Hídricos, as águas superficiais e subterrâneas devem ser administradas de modo integrado. A unidade do Ciclo Hidrológico, fundamental para existência da Vida, é o princípio básico a ser adotado na legislação, bem como nos planos e programas desses recursos.

Nesse sentido, as águas subterrâneas levam ligeira vantagem sobre os mananciais superficiais pelo seu baixo custo relativo, pois possui invariavelmente qualidade superior e, portanto, comumente não necessita passar por tratamentos químicos convencionais e bacteriológicos ou adições de sais minerais. Além disso, com a intensificação das atuais pesquisas possibilitou-se uma avaliação sistemática do real potencial dos aquíferos e, através de uma visão mais ampla do recurso disponível, foram desenvolvidas tecnologias para o melhor aproveitamento desse manancial, considerado hoje a segunda maior reserva de água doce do mundo (Figura 2) e a primeira em relação à disponibilidade, já que as geleiras se encontram nos pólos, distantes das principais áreas urbanas do mundo (Kannan, 2000).

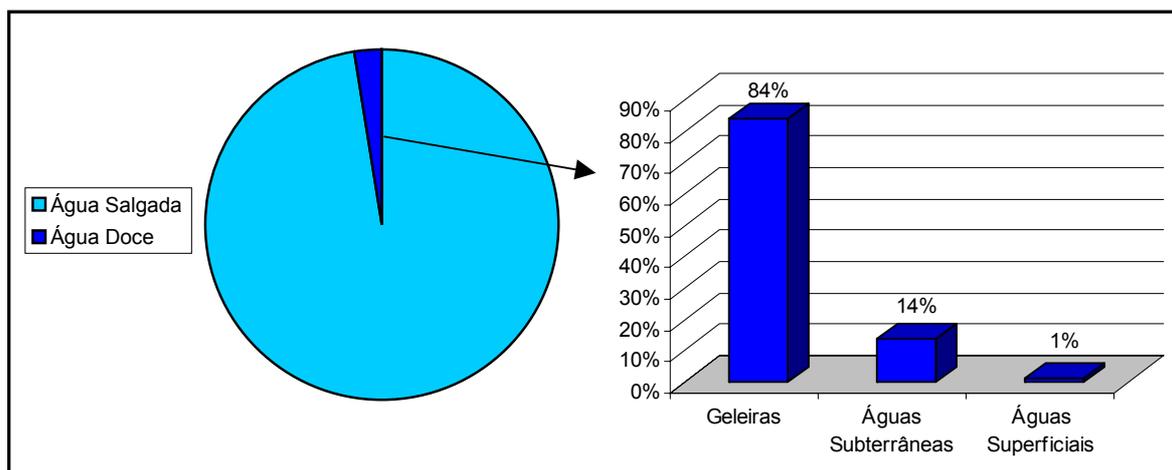


Figura 2 – Distribuição e ocorrência de água no mundo.

Para Sinelli (1970 *apud* Ferreira 1992), os freqüentes eventos degenerativos da qualidade da água e a maior tendência das águas superficiais para a degradação

vêm exigindo o desenvolvimento de novas e eficientes técnicas para que seja preservada, haja vista a importância para o planejamento sócio-econômico.

Segundo Foster *et al.* (1988), estimava-se, já na década de 80, a existência de 80.000 poços tubulares ativos no Brasil (além de outros milhares de poços rasos, escavados), que forneciam água para os mais diversos fins, sobretudo para abastecimento público. Centenas de núcleos urbanos de portes variados são hoje abastecidos exclusivamente por água subterrânea. Numerosos pólos agro-industriais e agro-pecuários têm a água subterrânea como manancial prioritário para atendimento da demanda de água.

A crescente utilização dos recursos hídricos subterrâneos tende a aumentar nos próximos anos, tanto pelas necessidades decorrentes da concentração demográfica e da expansão econômica, como por suas vantagens relativas sobre as águas superficiais, como mencionado anteriormente. Todavia, a situação atual da exploração é marcada por uma visão imediatista de uso do recurso, prevalecendo o descontrole e a falta de mecanismos legais e normativos. Nestas condições, os aquíferos, em diferentes áreas do território nacional, estão sujeitos aos impactos da extração descontrolada por poços e do uso e ocupação desordenada do solo, colocando em risco a qualidade de suas águas.

2.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O CICLO HIDROLÓGICO

Ao perfazer o ciclo hidrológico, a água ocorre nos estados líquido, sólido ou vapor. Segundo Coelho Netto (1998), a água no estado líquido pode ocorrer em toda litosfera do planeta, estando sob a forma de precipitação; em grandes reservatórios como em lagos, aquíferos e oceanos e em fluxo contínuo sob a superfície, como em rios e solos; no estado sólido, ocorre sob a forma de neve ou gelo; como vapor d'água ocorre, sobretudo nas camadas inferiores da atmosfera e dentro das camadas mais superficiais da crosta terrestre.

A água está continuamente mudando de estado: de sólido para líquido, pelos descongelamentos de neves ou geleiras; de líquido para sólido, como resultado de congelamento em regiões de latitudes baixas; de líquido para vapor d'água, pela evaporação; e de vapor para líquido, por meio da condensação.

A água líquida move-se rapidamente como chuva, e como fluxo superficial canalizado e não canalizado. Entretanto, no meio subterrâneo, move-se mais lentamente e flui gradualmente para os rios e oceanos. A Figura 3 ilustra, esquematicamente, os movimentos e as mudanças do estado físico da água que traduzem um ciclo hidrológico.

O ciclo hidrológico é a contínua circulação da umidade e da água no planeta Terra, como ilustrado na Figura 3.

Ao atingir a superfície da Terra, a água da chuva pode ter vários destinos: inicialmente uma parte se infiltra; quando o solo atinge seu ponto de saturação, a água passa a escorrer sobre a superfície em direção aos vales; dependendo da temperatura, uma parte da chuva volta novamente à atmosfera na forma de vapor. Em países frios, ou em grandes altitudes, a água se acumula na superfície na forma de neve ou gelo, ali podendo ficar por muito tempo.

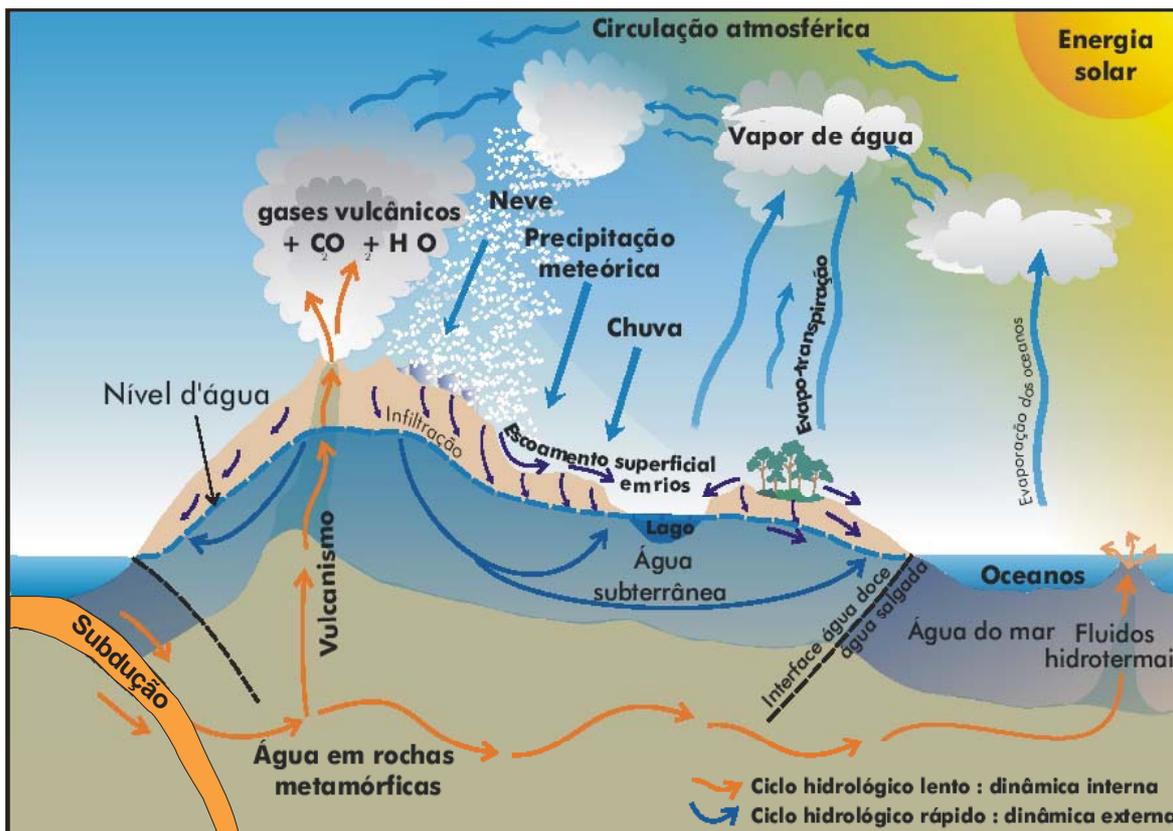


Figura 3 – Ciclo hidrológico e seus principais componentes. Fonte: Karmann (2001)

As atividades humanas interferem no ciclo hidrológico, por diversos meios como desmatamentos, impermeabilização do solo devido à pavimentação, etc. Isso acelera a evaporação e reduz a recarga dos aquíferos, ocasionando maiores enchentes nos cursos de água que passam em centros urbanos, trazendo para sua população inúmeros transtornos tanto econômicos como de saúde. Apesar de cada vez mais notável a interferência do homem sobre o ciclo hidrológico, é necessária desmistificar a idéia criada pela sociedade de que o esgotamento da água ocorrerá por completo no planeta.

A água é continuamente renovada no ciclo hidrológico, como ocorre a milhões de anos. As ações antrópicas apenas aceleram ou retardam o ciclo, sendo plausível dizer que essas mesmas ações podem causar sérios danos à qualidade dos

mananciais, provocando o aumento no custo econômico da recuperação da água e até mesmo sua inutilização.

2.2.1 – Água no Solo e Infiltração

Horton, (1933 *apud* Coelho Netto, 1998), definiu o termo infiltração como sendo o fluxo em subsuperfície que atravessa a zona de aeração em direção ao nível freático, o qual delimita a porção extrema superior da zona saturada do solo. Coelho Netto (1998, p. 119) ainda descreve o processo de infiltração como sendo resultante “*das relações de interdependência dos mecanismos de entrada na superfície do solo, de estocagem dentro do solo e de transmissão de umidade do solo*”. Sob determinadas condições, o solo possui uma taxa máxima de absorção de água, a qual Horton (*op. cit.*) denominou capacidade de infiltração.

Para Coelho Netto (*op. cit.*), os diferentes tipos de solos determinam as quantidades de chuvas que se infiltram ou que excedem para escoar na superfície do terreno. A água infiltrada e estocada no solo torna-se disponível à absorção pelas plantas e também ao retorno para a atmosfera por evapotranspiração. A água que não retorna à atmosfera irá recarregar o reservatório de água subterrânea e daí converge muito lentamente para as correntes de fluxos (vide Figura 3). Desse modo, a infiltração é o processo natural mais importante para a realização da recarga dos aquíferos, alimentando o fluxo de base dos cursos d'água, mesmo em períodos de estiagem. O fluxo de base dos rios pode ser entendido como a retirada de água subterrânea do armazenamento.

O arranjo espacial dos materiais do solo (ou estrutura do solo) influencia no direcionamento e no tempo de viagem dos fluxos de água. Manning (1997 *apud* Meaulo, 2004) e Coelho Netto (*op. cit.*) apontam importantes considerações práticas para o entendimento das relações entre propriedades físicas dos materiais e as hidrogeológicas:

- ✓ materiais granulares inconsolidados podem possuir os mesmos valores de porosidade, independente dos tamanhos dos grãos;
- ✓ solos de granulometria argilosa podem apresentar valores de porosidade próximo aos solos de granulometria tamanho cascalho, porém, o tamanho dos poros em ambos os materiais serão diferentes, assim como as propriedades hidrogeológicas;
- ✓ a proporção de espaços preenchidos dos poros por água capilar será maior no solo argiloso do que em solos de granulometria grossa, porém, o argiloso apresentará maior quantidade de água retida do que o solo de textura grossa.
- ✓ solos profundos e bem drenados, com textura grossa e grandes quantidades de matéria orgânica apresentarão alta capacidade de infiltração, já os solos rasos e mais argilosos mostrarão baixas taxas e volumes de infiltração.

Além dessas características fundamentais, existem ainda alguns fatores que interferem no volume e na velocidade de infiltração entre outros: a cobertura vegetal — quanto maior a densidade florestal maior é o volume de infiltração; a topografia — quanto menor a declividade do terreno, maior a infiltração; a precipitação — as chuvas mais intensas causam maiores impactos no solo exposto, e os picos de chuva de longa duração preenchem o potencial de estocagem e eventualmente conduzem os mesmos à saturação; o uso e ocupação do solo — a impermeabilização através do uso do solo no meio urbano impedem a infiltração da água.

2.2.2 – Movimento da Água Subterrânea

A água que se infiltra está submetida a duas forças fundamentais: a gravidade e a força de adesão de suas moléculas às superfícies das partículas do solo (força de capilaridade e adsorção). Pequenas quantidades de água no solo tendem a se distribuir uniformemente pela superfície das partículas, pois a força de adesão é

mais forte do que a força da gravidade que age sobre esta água. Chuvas finas e passageiras fornecem somente água suficiente para repor esta umidade do solo. Para que haja infiltração até a zona saturada é necessário primeiro satisfazer esta necessidade da força capilar (Fetter, 1988). Já a quantidade de água adsorvida irá variar de acordo com a mineralogia das partículas do solo.

Assim, abaixo da superfície do terreno, a água contida no solo e nas formações geológicas é dividida verticalmente em duas zonas horizontais, saturada e não saturada, sendo a primeira situada abaixo da superfície freática (Figura 4), caracterizada pelo preenchimento de água em todos os vazios existentes no terreno e a segunda, situa-se entre a superfície freática e a superfície do terreno (Figura 4), e nelas os poros estão parcialmente preenchidos por gases e água.

Segundo Karmann (2001), o sentido de escoamento da água subterrânea ocorre a partir dos pontos altos, em direção aos vales até alimentar os rios, normalmente subparalelos à direção de maior declividade do terreno, concorrendo para formação das drenagens efluentes, que por definição é todo corpo de água superficial que é alimentado por água subterrânea, proveniente de descarga do lençol freático. Por se tratar de água de infiltração, a superfície deste lençol freático segue grosso modo a topografia do terreno, apresentando-se comumente suavizada em relação à topografia local (Figura 4).

As linhas de fluxo de água subterrânea orientam-se ortogonalmente às linhas equipotenciais (normalmente são subparalelas às curvas de nível), que compõem a superfície potenciométrica dos aquíferos.

Dessa forma, a infiltração e a percolação das águas pluviais através de uma camada de solo ou rocha alterada poluída provocam a migração de uma série de compostos químicos orgânicos e inorgânicos através da zona não-saturada, podendo alguns desses compostos atingirem a zona saturada e, portanto, poluir ou contaminar o aquífero (Santos, 2003).

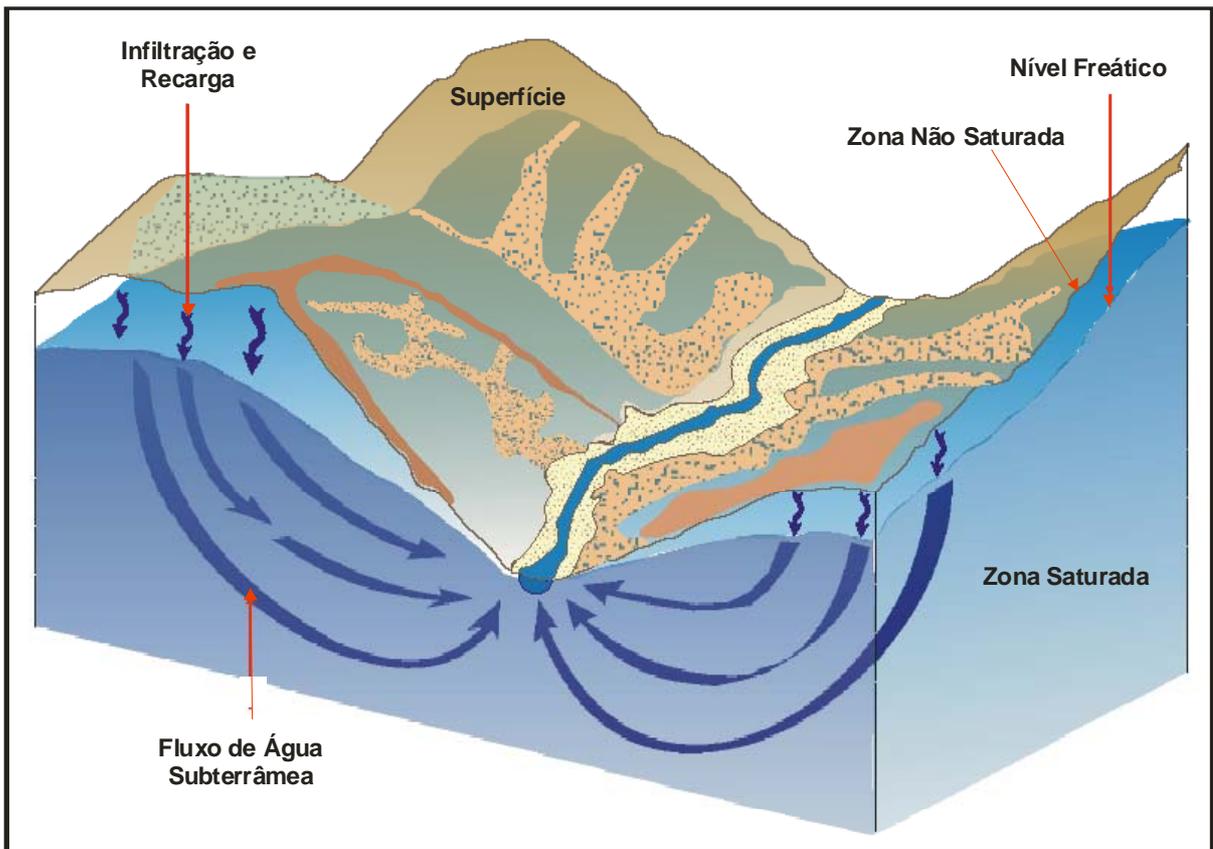


Figura 1 - Relação espacial entre a topografia do terreno e o lençol freático. Notar a superfície mais suavizada do lençol freático e a convergência das linhas de fluxo de água subterrânea (setas). Modificado de Karmann (2001).

O fluxo das águas subterrâneas, uma vez existente uma fonte de contaminação, transporta seus produtos através de correntes advectivas ao longo de seu deslocamento, gerando assim uma "pluma" poluente. Advecção é o mecanismo de transporte ocasionado pelo fluxo de água; com o deslocamento da água, os contaminantes (solutos) presentes na mesma se movem na direção das linhas de fluxo com uma velocidade que, em princípio, é igual à velocidade média linear da água, sem alterar a concentração na solução (Fetter, 1988).

Nesse sentido, cabe ressaltar as diferenciações entre poluição e contaminação, segundo Braga et al. (2002).

A poluição é uma alteração indesejável nas características físicas, químicas e biológicas da atmosfera, litosfera ou hidrosfera que cause ou possa causar prejuízo à saúde, à sobrevivência ou às atividades dos seres humanos e outras espécies ou ainda deteriorar materiais.

Deve-se acrescentar que o conceito de poluição está associado apenas às modificações ou alterações provocadas pelas atividades do homem no meio ambiente.

Para o mesmo autor, a contaminação pode ser assim definida:

A contaminação refere-se à transmissão de substâncias ou microorganismos nocivos à saúde pela água. A ocorrência de contaminação não implica necessariamente em um desequilíbrio ecológico. De maneira análoga, a ocorrência de poluição não implica necessariamente riscos à saúde de todos os organismos que fazem uso dos recursos hídricos utilizados.

Portanto, a avaliação da vulnerabilidade natural neste trabalho, abordará essas duas variáveis, mesmo quando referindo-se apenas a uma delas. Ou seja efeito da avaliação da vulnerabilidade, os objetivos finais não diferenciam tais definições.

2.2.2.1 - Mecanismos de transferência de contaminantes

A poluição e a contaminação, possuem diferentes especializações:

- ✓ pontual, quando a fonte está concentrada numa pequena superfície;
- ✓ difusa, quando a fonte de contaminação se estende, mesmo com baixa concentração, sobre uma grande superfície;
- ✓ linear, quando a fonte de contaminação é um rio ou canal.

Fetter (1993) assinala que, além da advecção, a dinâmica dos contaminantes no solo costuma ser explicada através de outros dois mecanismos de transferência de massa, a saber: dispersão e atenuação. Esses mecanismos podem ser subdivididos em subprocessos: a dispersão pode ser dividida em dispersão hidráulica e difusão molecular, enquanto a atenuação pode ser compartimentada em adsorção físico-química, sorção química e bioconversão.

a) Dispersão - consiste no mecanismo responsável pela diminuição da concentração de contaminantes no fluido de percolação e que pode se dar através de dois processos: dispersão hidrodinâmica e difusão molecular. A dispersão hidrodinâmica acontece pela restrição de fluxo nos poros do solo que gera redução de velocidade da percolação dos componentes mais viscosos. A difusão molecular é, intrinsecamente, um fenômeno de diluição de componentes solúveis e é o principal processo formador da fase dissolvida, responsável pela maior mobilidade dos contaminantes.

b) Atenuação - consiste na redução de contaminantes transportados pela advecção ou diluição através de reações químicas ou físico-químicas. A atenuação química é mais intensa em solos com maior capacidade de troca catiônica e atua reduzindo componentes das fases livre e adsorvida. Também nesse elenco de reações estão as reações de bioconversão, pela qual parcelas de contaminantes orgânicos são transformadas em ácidos orgânicos ou mesmo totalmente oxidadas. A atenuação química é mais intensa na região com maior disponibilidade de oxigênio e está intimamente associada à ação biológica. A atenuação físico-química é a responsável pela formação da fase adsorvida e consiste no aprisionamento de contaminantes que se aderem aos grãos do solo, sobretudo aos grumos de argilas. Entretanto, associada com os mecanismos de atenuação química, é responsável pela formação da fase dissolvida (facilitada pela redução de pH).

Por isso, é de importância nos estudos ambientais o monitoramento das águas subterrâneas nas proximidades de terminais de Combustíveis, visando a detecção de fontes potenciais de poluição, no caso hidrocarbonetos derivados do petróleo.

2.3 - VULNERABILIDADE NATURAL DE AQÜÍFEROS

Os primeiros conceitos relativos à vulnerabilidade natural à poluição das formações aquíferas vêm sendo aplicados desde a década de 60, mas é a partir da década de 80 que começaram a ter uma maior divulgação (Puerari *et al.* 2003).

O conceito de vulnerabilidade ainda não foi definido completamente e sem ambigüidades no contexto da poluição das águas subterrâneas. Frequentemente, o

termo "vulnerabilidade à poluição" é usado com um sentido composto que talvez pudesse melhor ser descrito como "risco de poluição". Para Meaulo (2004), o mapeamento da vulnerabilidade natural à poluição de um aquífero é na verdade o primeiro passo para avaliação do risco à poluição e, por isso, suas definições devem ser diferenciadas.

Hashimoto *et al.* (1982) apresentaram uma análise do desempenho de sistemas, focando o problema do risco de colapso. Este conceito de vulnerabilidade, definido no contexto do desempenho de sistemas, pode ser utilizado também no contexto da poluição das águas subterrâneas, substituindo "colapso do sistema" por "carga poluente". A dimensão das conseqüências é avaliada em função da deterioração da qualidade da água, independentemente do aquífero ser usado, ou não, para abastecimento público ou para qualquer outro fim.

O Conselho Nacional de Pesquisa norte-americano (NRC) definiu a vulnerabilidade das águas subterrâneas como sendo a tendência ou probabilidade de um contaminante ser encontrado em uma posição específica no sistema de água subterrânea, após sua introdução em algum local acima do aquífero mais superior (NRC, 1993).

Foster & Hirata (1988), definiram a vulnerabilidade natural como a susceptibilidade que um sistema aquífero tem de vir a ser degradado por uma carga contaminante. É um processo relativo, adimensional e sua avaliação ocorre admitindo-se que a contaminação é um processo dinâmico e interativo. Assim, a vulnerabilidade pode ser intrínseca (condicionada pelas características hidrogeológicas da área) e específica (quando se considera o fator externo, como o clima e o próprio contaminante) segundo estes autores a vulnerabilidade é em função da:

- a) inacessibilidade hidráulica de penetração do contaminante;
- b) capacidade de atenuação dos estratos acima da zona saturada do aquífero, como resultado de retenção física e reações químicas com o contaminante.

Seguindo essa mesma tendência, Lobo Ferreira & Cabral (1991) defenderam que para os novos estudos regionais fosse utilizado um conceito mais restrito de

vulnerabilidade natural de aquíferos, de acordo com as conclusões e recomendações da conferência internacional sobre "Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants", realizada nos Países Baixos em 1987. A vulnerabilidade natural foi definida nessa conferência como “a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente em função apenas das características intrínsecas do aquífero”.

Assim, conclui-se que a definição de vulnerabilidade natural dos recursos hídricos subterrâneos é distinta de risco de poluição, ou seja, é possível existir um aquífero com um alto índice de vulnerabilidade, mas sem risco de poluição, caso não haja carga poluente, ou de haver um risco de poluição excepcional apesar do índice de vulnerabilidade ser baixo, pois o risco depende não só da vulnerabilidade, mas também da existência de cargas poluentes significativas que possam entrar no ambiente subterrâneo.

Para melhor compreensão, foi utilizado o esquema conceitual utilizado por Foster & Hirata (1993), em que propõem à avaliação da vulnerabilidade natural de um aquífero como uma ferramenta no auxílio para determinação do risco à poluição (Figura 5).

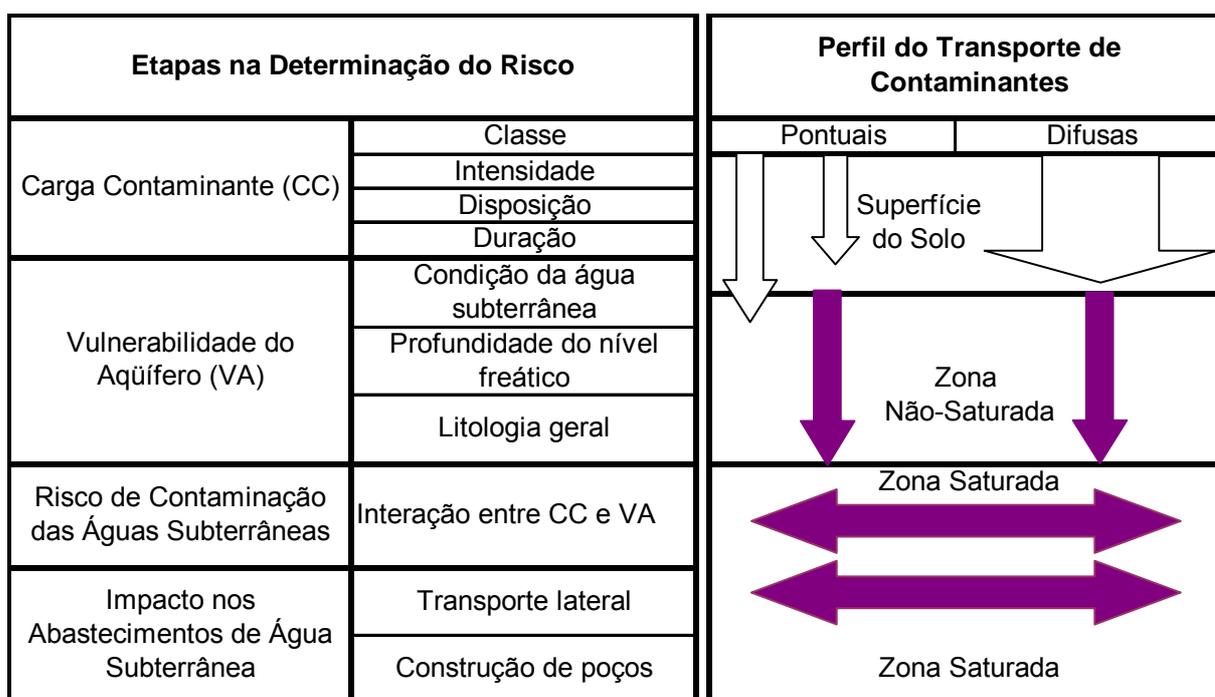


Figura 2 – Esquema conceitual para a determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas (Foster & Hirata, 1993).

Para o presente estudo será adotado o conceito de vulnerabilidade natural à poluição de aquíferos utilizado por Lobo Ferreira & Cabral (1991) e Foster & Hirata (1993), pois os mesmos se aproximam em seus conceitos, mas considerando sobretudo as características intrínsecas do aquífero. Contudo, é importante reconhecer que a vulnerabilidade natural depende também do tipo de poluente potencial. Exemplificando, Oliveira & Lobo Ferreira (2004) afirmam que a qualidade da água subterrânea pode ser muito vulnerável a uma carga de nitratos provindos de práticas agrícolas incorretas e, no entanto, ser pouco vulnerável a cargas patogênicas. Tendo em consideração essa realidade, é cientificamente defensável avaliar a vulnerabilidade natural a casos específicos de poluição.

No entanto, verifica-se que o número de dados disponíveis, em geral, não é suficiente para o mapeamento específico; além disso, tratar individualmente cada atividade poluente em determinado ambiente hidrogeológico implicaria custos elevados. Portanto, é necessário para o pesquisador adotar métodos mais simples e amplos de avaliação, que possam ser aplicados de forma rápida, de custos menos onerosos e utilizando sempre que possíveis dados preexistentes.

2.3.1 – Métodos de Avaliação da Vulnerabilidade Natural de Aquíferos

Vários são os sistemas de avaliação e de mapeamento da vulnerabilidade natural de aquíferos existentes na literatura como por exemplo, Albinet & Margat (1970), Haertle (1983 *apud* Lobo Ferreira & Cabral 1991), Aller *et al.* (1987), Foster (1987), Foster & Hirata (1988) e Oliveira & Lobo Ferreira (2004).

Alguns desses sistemas incluem índices de vulnerabilidade formados por parâmetros hidrogeológicos, morfológicos e outras formas de parametrização das características dos aquíferos, de um modo bem definido. A adoção de índices de vulnerabilidade tem a vantagem, em princípio, de eliminar ou minimizar a subjetividades inerentes aos processos de avaliação.

Um índice deste tipo já havia sido estudado e desenvolvido por Aller *et al.* (1987) para a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, a U.S. EPA: o índice DRASTIC (Figura 6), escolhido para o emprego no presente estudo. O mesmo foi criado a partir dos seguintes pressupostos principais:

- ✓ o contaminante é introduzido à superfície do terreno,
- ✓ o contaminante é transportado verticalmente até o aquífero pela água de infiltração;
- ✓ o contaminante possui a mesma mobilidade da água.

Outros sistemas paramétricos de avaliação da vulnerabilidade à poluição comumente utilizada por pesquisadores de todo o mundo e que possuem igualmente características de simplicidade e coerência podem ser citados, como os índices GOD, AVI e SINTACS, desenvolvidos no Reino Unido, no Canadá e na Itália respectivamente (Artuso *et al.*, 2004). Suas principais características estão descritas no Quadro 1 que ainda inclui os índices Surface Impoundment Assessment, Site Ranking Methodology, EPPNA e IS.

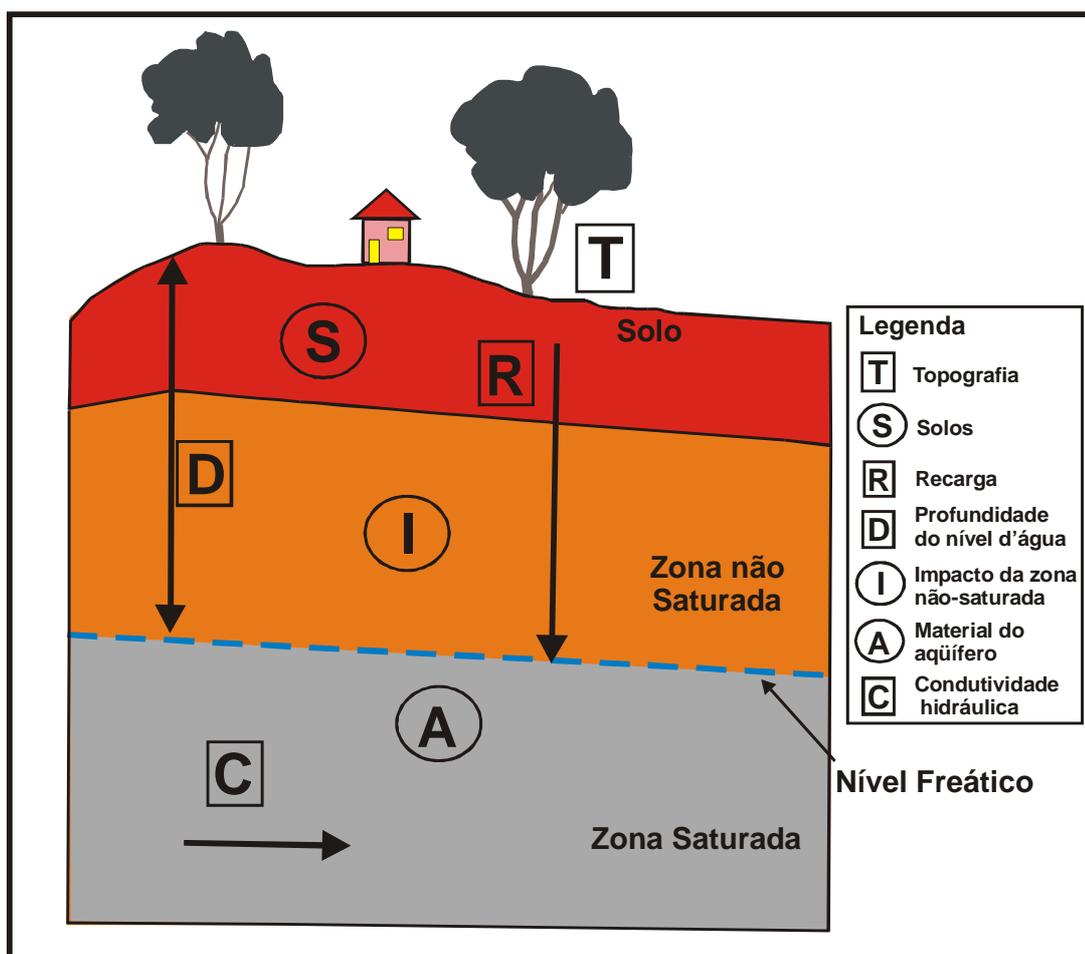


Figura 3 - Parâmetros incorporados no método DRASTIC. Modificado de Oliveira & Lobo Ferreira (2004).

Segundo Artuso *et al.* (2004), além desses seis índices que se baseiam no sistema paramétrico, (utilizam valores numéricos, integrando-os para gerar formas relativas ou absolutas de índices de vulnerabilidade), existem outros três grupos de métodos principais.

- a. Métodos probabilísticos - dedicam-se ao problema da incerteza dos dados, focando apenas a zona saturada.
- b. Métodos estocásticos - trata-se de um tipo de aproximação que utiliza informação estatística para identificar combinações de fatores que determinam a vulnerabilidade.
- c. Métodos analógicos: utilizam parâmetros-chave, aplicando expressões matemáticas que resultam nos índices de vulnerabilidade (Meaulo, 2004).

Quadro 1 – Índices de vulnerabilidade natural à poluição de aquíferos e seus respectivos fatores de ponderação.

| Índice | Método e Avaliação | Fatores | Referência |
|---|--|--|--------------------------------|
| Surface Impoundment Assessment | Paramétrico Sistema de disposição de águas servidas | Zona não saturada; importância do recurso; qualidade das águas subterrâneas; periculosidade do material. | (Le Grand, 1964) |
| Site Ranking Methodology | Paramétrico Disposição de resíduos sólidos e novas indústrias | Uso da água e qualidade; nível e tipos de contaminação; profundidade do nível d'água; permeabilidade do solo; características dos resíduos (toxicidade e persistência). | (Kulfs <i>et al.</i> , 1980) |
| DRASTIC | Paramétrico Vulnerabilidade Geral | (D) Profundidade do nível d'água; (R) Recarga do aquífero; (A) Material do aquífero; (S) Tipo de solo; (T) Topografia; (I) Influência da zona não-saturada; (C) Condutividade hidráulica. | (Aller <i>et al.</i> , 1987) |
| GOD | Paramétrico Vulnerabilidade Geral | (G) Ocorrência de água subterrânea; (O) Classificação geral do aquífero; (D) Profundidade do nível d'água. | (Foster, 1987) |
| AVI (Aquifer Vulnerability Index) | Paramétrico Vulnerabilidade Geral | Espessura (d_i) de cada nível sedimentar acima da superfície freática. Condutividade hidráulica (K_i). | (Stempvoort, 1992) |
| SINTAC | Paramétrico Vulnerabilidade Geral | Igual ao DRASTIC, mas com pesos diferentes. | (Civita <i>et al.</i> , 1994) |
| EPPNA (Equipe de Projeto do Plano Nacional da Água) | Paramétrico Vulnerabilidade Geral | De acordo com as características de cada formação litológica/hidrogeológica. | (EPPNA, 1998) |
| IS (Índice de Susceptibilidade) | Paramétrico Vulnerabilidade Geral | Igual ao DRASTIC, mas com pesos diferentes e considerando a ocupação do solo. | (Francés <i>et al.</i> , 2001) |

Fonte: NRC (1993); Artuso *et al.* (2004).

2.3.2 – Escolha do Índice DRASTIC

A escolha do índice DRASTIC para aplicação na presente pesquisa deve-se, principalmente aos fatores abaixo elencados:

- ✓ é um dos índices mais conhecidos e aplicados no mundo;
- ✓ relaciona seus diversos parâmetros com os mecanismos que envolvem os transportes dos contaminantes no meio subterrâneo;
- ✓ simplicidade de operação em conjunto com o baixo custo de aplicação. Embora seja mais oneroso se comparado com os índices GOD e AVI, uma vez que se utilizam de menos variáveis, entretanto, estes índices possuem nível de subjetividade maior no processo de avaliação;
- ✓ quantidade de parâmetros diretos e indiretos utilizados em sua determinação, apresentando maior variedade de fatores se comparado aos demais índices listados no Quadro 1. Por exemplo, a utilização de dados de recarga e condutividade hidráulica, evitando assim a extrapolação de valores e a minimização da generalização dos resultados;
- ✓ índice melhor indicado para aplicação em escalas locais.

Alguns exemplos da aplicação do índice DRASTIC podem ser citados, como o utilizado por Rosa *et al.* (2001), como um dos componentes para avaliar a viabilidade de implantação de campos de golfe no *concelho de Albufeira* em Portugal, com área de 144 Km². Porém, para utilização do DRASTIC, os autores realizaram algumas modificações no índice introduzindo parâmetro relacionado com uso e ocupação do solo, de modo a enfatizar o impacto ambiental do uso sobre os recursos hídricos subterrâneos.

Outro exemplo a ser citado também vem de Portugal, através da aplicação do DRASTIC na região ocidental de *Beja*, numa extensão de aproximadamente de 50

km². Nesta análise, foram abordadas as principais características hidrogeológicas da área, como uso e ocupação do solo e aspectos climáticos que condicionam as necessidades hídricas para agricultura (Paralta & Francês, 2000).

No Brasil, alguns exemplos de estudos de vulnerabilidade em escala local poderiam ser citados, mas os autores pesquisados utilizaram outros métodos de avaliação.

2.3.3 – Limitações dos Métodos de Avaliação da Vulnerabilidade Natural

Os índices de vulnerabilidade e seus métodos de cálculo, incluso o DRASTIC, não consideram na avaliação da vulnerabilidade mapas específicos para cada contaminante ou atividade antrópica, a não ser em casos de índices adaptados que se assemelham à análise de risco.

Segundo Foster & Hirata (1993), se considerados todos fatores seria necessária a geração de uma série de mapas de vulnerabilidade natural à poluição, que poderiam ser compilados em um Atlas de Vulnerabilidade de Aquíferos. Contudo, ainda não é possível atingir tal ideal, por não existirem informações suficientes e/ou dados adequados.

Além disso, os citados autores advertem sobre a precaução na interpretação dos índices de vulnerabilidade, devido ao conceito de uma “vulnerabilidade geral a um contaminante universal em um cenário típico de contaminação”, uma vez que todos os aquíferos são vulneráveis a contaminantes persistentes não-degradáveis.

Muitos autores consideram o emprego dos índices de vulnerabilidade natural em escala local como fator limitante.

Meaulo (2004) cita ainda algumas limitações inerentes aos métodos de avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas:

- ✓ super-exploração do aquífero para abastecimento hídrico e conseqüente rebaixamento da profundidade do nível d'água subterrâneo;
- ✓ o grau de confinamento e densidades de fraturamentos em aquíferos fissurais.

2.3.3.1 - Escala de trabalho

A escala de trabalho é a apresentação de qualquer mapa em função direta da densidade de informação existente e dos objetivos que se quer atender.

Segundo Foster & Hirata (1988), normalmente no planejamento de uso do solo ou em programas de gestão da proteção dos recursos hídricos, a escala dos mapas de vulnerabilidade varia entre 1:250.000 e 1:100.000. Muitas vezes são criadas cartas em escalas menores que 1:250.000 (de menor detalhe), servindo a estudos regionais para o macro-planejamento.

A maioria das técnicas de vulnerabilidade existentes gera cartas nas escalas entre 1:200.000 e 1:100.000. Já o maior detalhamento que 1:100.000 acaba criando uma baixa relação custo/benefício, pois outras técnicas, inclusive a modelação analítica, poderia ser utilizada.

Contudo, Oliveira & Lobo Ferreira (2004) consideram a aplicação do índice DRASTIC em áreas com dimensões mínimas de até 0,4 Km², o que possibilita sua utilização na área de interesse deste trabalho (0,48 Km²). Independente da escala para aplicação do índice DRASTIC, sua utilização no presente trabalho caracteriza-se fundamentalmente em uma área teste, visto a quantidade e confiabilidade dos dados apresentados. Portanto, essa obra através da referência teórica apresentado e a aplicação do método selecionado torna-se uma referência para outros trabalhos que utilizaram o DRASTIC para análises envolvendo a vulnerabilidade de aquíferos à poluição seja em escala local ou regional.

Mesmo em escala local, o mapeamento da vulnerabilidade natural à poluição, como ferramenta de auxílio à manutenção da qualidade das águas subterrâneas, é relevânte, na medida em que o fluxo de base de rio, quando existente uma fonte poluidora provinda do aquífero, pode se transformar num agravante ambiental

para todo domínio de uma bacia hidrográfica, afetando assim todo manancial de abastecimento e o equilíbrio dinâmico do ecossistema.

CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 – ETAPAS DE TRABALHO

Neste capítulo são apresentadas algumas considerações e bases utilizadas para a estruturação do presente trabalho, que envolveram principalmente o levantamento de áreas para o estudo, a realização de ensaios no campo e a fase de tratamento e análise dos dados obtidos.

Numa primeira fase, realizou-se o levantamento bibliográfico dos principais trabalhos científicos e teses de hidrogeologia e geologia relacionadas à vulnerabilidade natural de aquíferos e avaliações hidrogeológicas, bem como bases para o desenvolvimento teórico sobre os recursos hídricos e conceitos básicos sobre o ciclo hidrológico e as águas subterrâneas, trazendo o tema para uma análise mais aprofundada.

Em relação à área de estudo, o critério principal para a seleção foi a disponibilidade de dados existentes. Várias áreas foram avaliadas, mas o local escolhido para discussão na presente dissertação foi o que continha a maior quantidade de poços de monitoramento perfurados e, portanto, potencialmente mais favorável pela maior disponibilidade de dados.

A segunda fase desse estudo contou com levantamentos de campo, através da análise empírica da área de estudo utilizando-se de: reconhecimento do uso e ocupação do solo; a predominância dos seus aspectos físicos naturais; ensaios de permeabilidade hidráulica (*in situ*); descrição de afloramentos e, a determinação da localização dos poços através de GPS (Global Position System).

Por fim, realizou-se a análise integrada de todas variáveis destacadas, fundamentadas de acordo com os objetivos propostos. Nas páginas subseqüentes, cada etapa de trabalho será descrita segundo os procedimentos adotados de análise baseada nas referências levantadas.

3.2 - ÍNDICE DRASTIC

O método selecionado para avaliação da vulnerabilidade na área de estudo baseia-se no índice DRASTIC, que se fundamenta num conjunto de procedimentos que permitem integrar vários parâmetros caracterizadores do meio subterrâneo e de suas especificidades. Esta metodologia foi desenvolvida pela National Ground Water Association, e é empregada pela Agência de Proteção Ambiental norte-americana (US-EPA), constituindo um modelo qualitativo para avaliar a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas frente a cargas poluentes, através de variáveis hidrogeológicas (Aller *et al.* 1987). Este modelo é um dos índices de vulnerabilidade mais difundido atualmente.

Segundo Aller *et al.* (1987), o índice DRASTIC corresponde à média ponderada de sete valores correspondentes aos seguintes sete parâmetros ou indicadores hidrogeológicos:

D - Profundidade da zona não-saturada do solo (**Depth to groundwater**);

R – Recarga do aquífero (**Recharge**);

A – Característica do aquífero (**Aquifer media**);

S - Solos (**Soil media**);

T - Topografia (**Topography**);

I - Impacto na zona não saturada (**Impact of the insaturate zone**);

C - Condutividade hidráulica (**Conductivity hydraulic**).

(O nome DRASTIC resulta da junção das letras em negrito, referente aos parâmetros, em inglês).

Cada um dos sete parâmetros DRASTIC foram divididos, quer em escalas, quer em tipos de meio significativos que condicionam a vulnerabilidade natural do aquífero. A partir de Lobo Ferreira & Oliveira (1993), a aplicação do método DRASTIC pode ser assim sintetizada:

(1) atribuem-se valores de 1 a 10 a cada parâmetro, em função das condições locais; valores elevados correspondem a uma maior vulnerabilidade; os valores a atribuir são obtidos de condicionantes correspondentes entre as características hidrogeológicas locais e o respectivo parâmetro; (2) em seguida, o índice local é calculado multiplicando-se o valor atribuído ao parâmetro pelo seu peso relativo; cada parâmetro tem um peso pré-determinado que reflete sua importância relativa na quantificação da vulnerabilidade (Tabela 1); os parâmetros mais importantes têm peso 5, os menos importantes possuem peso 1; (3) por último, adicionam-se os sete produtos parciais obtendo-se o valor do índice final DRASTIC; o valor mínimo possível é 23 e o máximo é 226.

A Tabela 1 disponibiliza as faixas de pesos relativos para aplicação geral do índice DRASTIC na avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos. Estes fatores, denominados fatores de ponderação DRASTIC, são relacionados entre si através de uma equação simples, aplicada a cada unidade geográfica de trabalho (Lobo Ferreira & Oliveira, 1993):

$$\text{Índice DRASTIC} = DpDc + RpRc + ApAc + SpSc + TpTc + IpIc + CpCc \quad (1)$$

Onde:

Dp, Rp, Ap, Sp, Tp, Ip, Cp = pesos dos fatores DRASTIC na equação;

Dc, Rc, Ac, Sc, Tc, Ic, Cc = fator de carga ou índice das variáveis nos seus respectivos intervalos de ocorrência.

Tabela 1 – Parâmetros pertencentes ao índice DRASTIC e seus pesos relativos ou fatores de ponderação utilizados para a quantificação da vulnerabilidade natural de aquíferos.

| Parâmetros | Pesos Relativos (p) |
|--|----------------------------|
| Profundidade da zona não-saturada do solo (D) | 5 |
| Recarga do aquífero (R) | 4 |
| Material do aquífero (A) | 3 |
| Solos (S) | 2 |
| Topografia (T) | 1 |
| Impacto da zona não saturada (I) | 5 |
| Condutividade hidráulica (C) | 3 |

Fonte: Aller *et al.* (1987).

Segundo Aller *et al.* (1987), embora os valores possíveis do índice DRASTIC situem-se entre 23 e 226, os mais frequentes estão entre 50 e 200. Baseado nesses autores adotou-se as classes ou intervalos de vulnerabilidade apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- Valores correspondentes ao índice de vulnerabilidade DRASTIC e seus respectivos intervalos.

| Valores Correspondentes | Intervalos de Vulnerabilidade |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| <100 | Vulnerabilidade insignificante |

| | |
|-----------|------------------------------------|
| 101 – 119 | Vulnerabilidade muito baixa |
| 120 – 139 | Vulnerabilidade baixa |
| 140 – 159 | Vulnerabilidade moderada |
| 160 – 179 | Vulnerabilidade alta |
| 180 – 199 | Vulnerabilidade muito alta |
| > 200 | Vulnerabilidade extrema |

Fonte: Aller *et al.* (1987).

Para a aplicação do índice DRASTIC, no presente trabalho, é admitida a existência de um contaminante possuidor da mesma mobilidade da água em meio poroso, que se introduz pela superfície do terreno atravessando a zona não saturada através de infiltração e atingindo a água subterrânea, num processo de deslocamento desde as zonas de recarga até as áreas de descarga do aquífero.

Contudo, para aplicação do índice DRASTIC deve-se tomar alguns cuidados para que os valores obtidos a partir de dados preexistentes e de ensaios *in situ* não sejam extrapolados, obtendo análises que generalizam o meio de estudo e, conseqüentemente, resultados superestimados. Dessa forma, para a aplicação do método, devem ser atendidas as seguintes recomendações:

- ✓ obter uma representação detalhada da área em escala apropriada;
- ✓ analisar as informações disponíveis para caracterizar hidrogeologicamente o meio;
- ✓ atribuir valores aos parâmetros, utilizando informações existentes, geológicas e hidrogeológicas, bases de dados e eventuais poços presentes no aquífero;
- ✓ fazer um reconhecimento de campo.

Dessa forma, devido à não disponibilidade de dados a avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero freático não será aplicada para todo o domínio

da bacia hidrográfica do ribeirão Lindóia. A área de estudo localiza-se em um terminal de combustíveis, onde ocorre o armazenamento e a distribuição de milhares de litros dos derivados de gasolina/diesel/álcool para maior parte dos postos de combustíveis instalados no município de Londrina.

Essa situação implica riscos potenciais de poluição do solo e das águas subterrâneas à jusante dos tanques de armazenamentos dos produtos mencionados; por isso, a área delimitada merece destaque numa avaliação de vulnerabilidade natural do aquífero freático local. Além disso, através do reconhecimento de campo foi possível constatar a presença de inúmeros poços de monitoramento, o que garante informações geológicas e hidrogeológicas essenciais para o sucesso da presente pesquisa científica, evitando assim a extrapolação dos resultados.

3.3 - POÇOS DE MONITORAMENTO

As informações obtidas dos poços de monitoramento servem à investigação e à caracterização da ocorrência das águas subterrâneas locais, através da determinação da espessura de solo e rocha alterada, bem como à medição dos níveis saturados para determinação da superfície freática. Os critérios técnicos para instalação dos poços de monitoramento na área de estudo seguem o esquema representado na Figura 7.

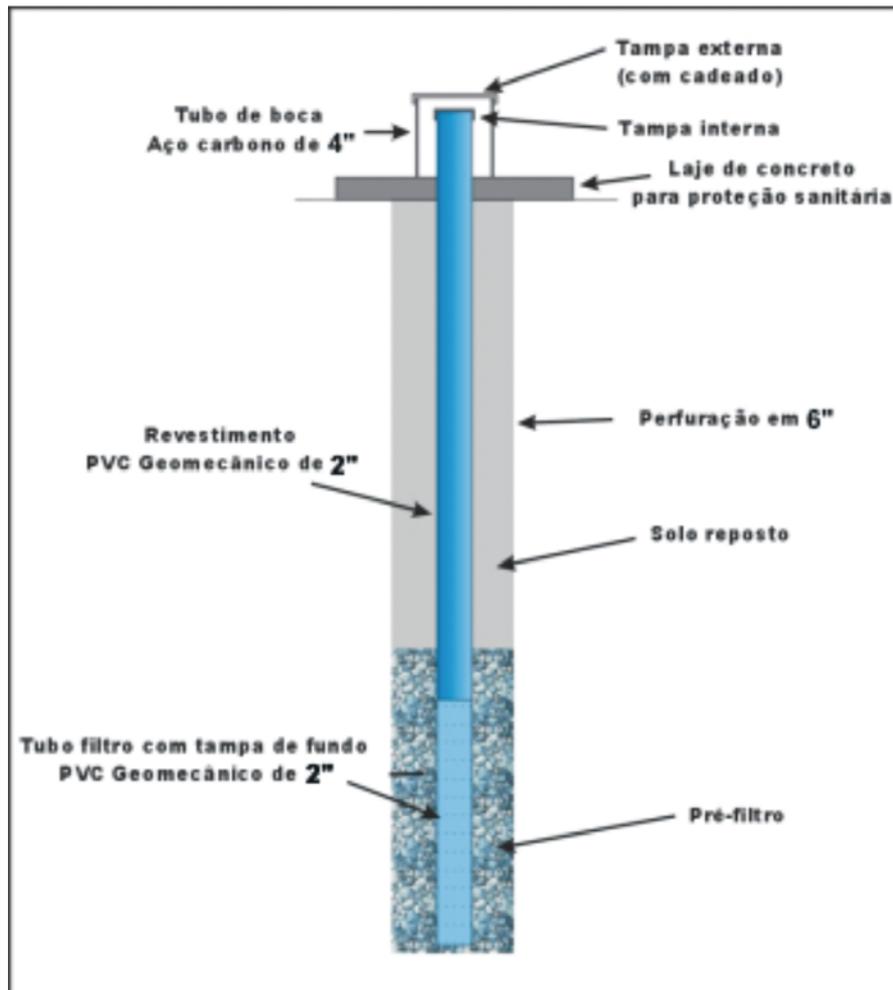


Figura 4– Esquema de construção dos poços de monitoramento.

A partir dos poços de monitoramento existentes foram realizados ensaios de permeabilidade *in situ* que, somados às características intrínsecas do aquífero auxiliaram na definição dos parâmetros para avaliação hidrogeológica da área de estudo, contribuindo assim para geração de um mapa de vulnerabilidade do aquífero freático local.

3.4 - BALANÇO HÍDRICO REGIONAL

Buscando subsídios necessários ao presente estudo, foi estimado o balanço hídrico regional da área, através da metodologia empregada por Thornthwaite & Mather (1955). Esse método foi definido com a finalidade de uma melhor compreensão dos ganhos e perdas constantes no ciclo hidrológico, pois as chuvas influenciam diretamente o comportamento do nível freático local e o volume de infiltração, agindo diretamente no transporte do contaminante através da zona não-saturada.

O método utilizado se baseia em dois elementos climáticos principais: a precipitação pluviométrica e a temperatura, dados esses retirados de uma série histórica obtida por uma estação meteorológica local.

Para obtenção dos valores de recarga, foram utilizados cálculos de Vianna & Celligoi (2002) para o aquífero Serra Geral, que se basearam na curva de recessão de um dos rios localizados na região de estudo.

O período de recessão do ribeirão está associado ao período de diminuição das chuvas na região, que por sua vez se reflete na diminuição da descarga do ribeirão, ou mais precisamente no fluxo de base da drenagem. O fluxo de base dos rios representa a retirada de água subterrânea do armazenamento, que também pode ser conhecida como recessão de água subterrânea. Partindo desse conceito, o termo recessão refere-se ao declínio da descarga natural de uma drenagem na ausência de entrada por precipitação (Rosa Filho, 1993).

3.5 - ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (*IN SITU*)

Ensaio de condutividade hidráulica¹ ou permeabilidade são correntemente realizados com a finalidade de se obter parâmetros hidráulicos do aquífero objeto

¹ Segundo Hubert (1956 *apud* Pede, 2004), a condutividade hidráulica ou permeabilidade hidráulica ocorre em função do meio poroso e das características do fluido que o atravessa; já a permeabilidade intrínseca está relacionada somente às características do meio poroso, não importando as propriedades do fluido.

de estudo. O coeficiente de permeabilidade ou de condutividade hidráulica (K) é, sem dúvida, um dos parâmetros mais importantes para caracterização de aquíferos.

A determinação da permeabilidade através de ensaios de laboratório apresenta como principais desvantagens a necessidade da coleta de amostras indeformadas no campo, seu transporte, preparação e ensaio em laboratório, além da menor representatividade das amostras e, conseqüentemente, dos resultados obtidos.

Por estes motivos, os ensaios são freqüentemente executados *in situ*, como os realizados para esse estudo, ou em furos de sondagens. Segundo Oliva (2002), os ensaios de permeabilidade em solos podem ser classificados, conforme a maneira de realização, em ensaios em nível constante e em nível variável e o diferencial de pressão positivo (carga) ou negativo (descarga) aplicado ao aquífero. Deve-se considerar que os ensaios realizados nas porções não saturadas dos solos (acima do lençol freático) admitem apenas sua realização por injeção de água (ensaios de "carga").

Na área de estudo ocorrem 2 meios diferenciados, que fornecem diferentes condutividades. O primeiro é o solo alterado proveniente do intemperismo das rochas basálticas e que apresenta comumente baixa permeabilidade na zona não saturada, onde optou-se pela realização de ensaios em nível constante; e um segundo meio, caracterizado por apresentar alta permeabilidade hidráulica devido a existência do perfil saprolítico que por sua vez, optou-se pela realização de ensaios em nível variável na zona saturada.

Terzaghi & Peck (1967) e Mello & Teixeira (1967), fornecem classificações para valores de condutividade hidráulica, segundo o grau de permeabilidade e o tipo de solo predominante, respectivamente (Quadro 2). Tais parâmetros auxiliarão na comparação dos resultados referentes aos ensaios de permeabilidade realizados *in situ* na área de estudo.

Quadro 2 – Classificação da condutividade hidráulica do solo.

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

Os ensaios em nível constante são realizados através da manutenção do nível d'água, em furo de sondagem, poço ou trincheira, com posição constante ao longo de toda duração do ensaio. Este nível d'água pode ser estabelecido de duas formas:

- ✓ através da introdução de água (ensaios de infiltração) – neste caso é aplicada uma carga (constante), medindo-se a vazão injetada necessária para manter tal nível constante;
- ✓ através de retirada de água (ensaios de bombeamento) – neste caso, o aquífero é descarregado, medindo-se a vazão bombeada necessária para manter constante o nível rebaixado.

Nos ensaios em nível variável, o nível d'água natural é alterado para uma posição que se pode denominar nível inicial do ensaio. A tendência do nível d'água voltar à posição original é acompanhada ao longo do tempo de ensaio. O nível inicial pode ser estabelecido também por duas formas:

- ✓ através da introdução de água (ensaios de rebaixamento) e medindo-se em seguida sua velocidade de rebaixamento;
- ✓ através de retirada de água (ensaios de recuperação) e medindo-se em seguida a velocidade de recuperação.

Segundo Oliva (2002), é sempre conveniente que a realização dos ensaios de permeabilidade se insira no contexto da programação geral de um estudo hidrogeológico, visando desta forma caracterizar o comportamento hidráulico de cada unidade geológica presente no local. Portanto, nesse estudo foram realizados dois tipos de ensaios de permeabilidade hidráulica: o *slug test* (nível variável), em meio saturado, e o *Guelph* (nível constante), realizado em meio não-saturado, ambos regidos pela lei de Darcy.

3.5.1 - Lei de Darcy

Henry Darcy, engenheiro hidráulico francês, foi o responsável pelo nascimento da hidrogeologia como ciência quantitativa, em 1856, com a publicação de seu trabalho referente aos experimentos realizados na cidade de Dijon, França.

Darcy investigou o fluxo de água através de filtros preenchidos de areia homogeneizada e saturados. A partir desses experimentos, concluiu que a vazão de escoamento (volume por unidade de tempo) Q , utilizando um sistema similar ao mostrado esquematicamente na Figura 8, é:

- ✓ proporcional à área da secção transversal (A) do filtro;
- ✓ proporcional à diferença de carga hidráulica ($\Delta h = h_1 - h_2$);
- ✓ inversamente proporcional ao comprimento L .

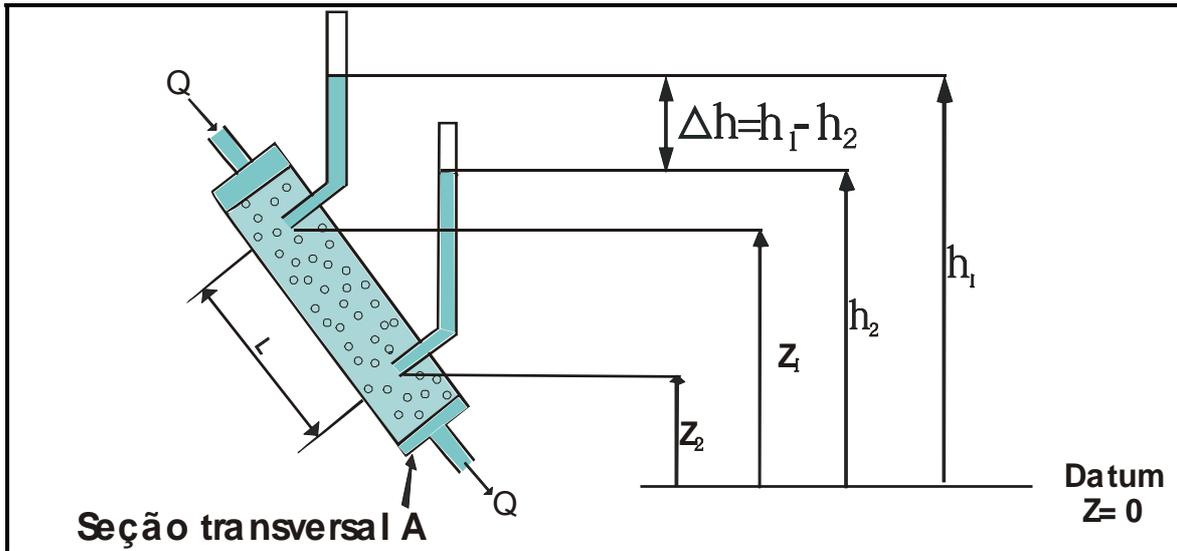


Figura 5- Experimento de Darcy (modificado de Freeze & Cherry, 1979).

Estas conclusões combinadas resultaram na Lei de Darcy:

$$Q = -KA \left(\frac{h_1 - h_2}{L} \right) \quad (2)$$

Na equação acima, o K é o coeficiente de proporcionalidade conhecido como condutividade hidráulica. As elevações h_1 e h_2 são medidas em relação a um mesmo *datum*.

A equação 2 pode ser escrita na forma diferencial, da seguinte maneira:

$$Q = -KA \frac{dh}{dL} \quad (3)$$

onde:

dh/dL = gradiente hidráulico (i) $[L/L]$;

K = constante de proporcionalidade (condutividade hidráulica) $[L/T]$;

Q = taxa volumétrica de fluxo $[L^3/T]$.

O sinal negativo é indicativo do fluxo na direção de cargas decrescentes.

Definindo, $q=Q/A$ como descarga específica, velocidade aparente ou ainda velocidade de Darcy, tem-se:

$$q = -K \frac{dh}{dl} \quad (4)$$

A equação 2 pode ser rearranjada para mostrar que o coeficiente (condutividade hidráulica) tem a dimensão de comprimento/tempo (L/T), ou velocidade.

$$K = \frac{-Q}{A \left(\frac{dh}{dl} \right)} = \frac{-\left(\frac{L^3}{T} \right)}{(L^2) \left(\frac{L}{L} \right)} = \left(\frac{L}{T} \right) \quad (5)$$

As unidades mais comumente utilizadas para condutividade hidráulica (K) são: cm/s, m/s ou m/d.

A obtenção da condutividade hidráulica possibilita o cálculo da velocidade linear média, tal velocidade é regida diretamente pela Lei de Darcy, na expressão:

$$V_x = \frac{-K}{n_e} \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (6)$$

Onde:

V_x - velocidade linear média

K - condutividade hidráulica

n_e - porosidade efetiva

$\frac{\Delta h}{\Delta l}$ - gradiente hidráulico

3.5.1.1 - Permeâmetro *Guelph*

O permeâmetro *Guelph*, modelo 2800, foi utilizado na determinação expedita da condutividade hidráulica *in situ* na zona não-saturada (Figura 9) formada pelos latossolos provenientes de alteração de rochas basálticas, na área de estudo no município de Londrina.

A realização desse tipo de ensaio, a carga constante nos horizontes não saturados do solo funciona segundo o princípio do Sifão de Mariotte (Figura 10). O procedimento do ensaio requer, após a análise e seleção dos locais a serem ensaiados, a realização de furos a trado com fundo plano e em seguida a injeção de água através do permeâmetro *Guelph*.

Quando se estabelece um nível d'água (carga hidráulica) constante no interior do furo de trado, origina-se um "bulbo" de saturação d'água a partir de sua base (Figura 11).



Figura 6 - Realização do ensaio de infiltração *in situ* utilizando o Permeômetro Guelph.

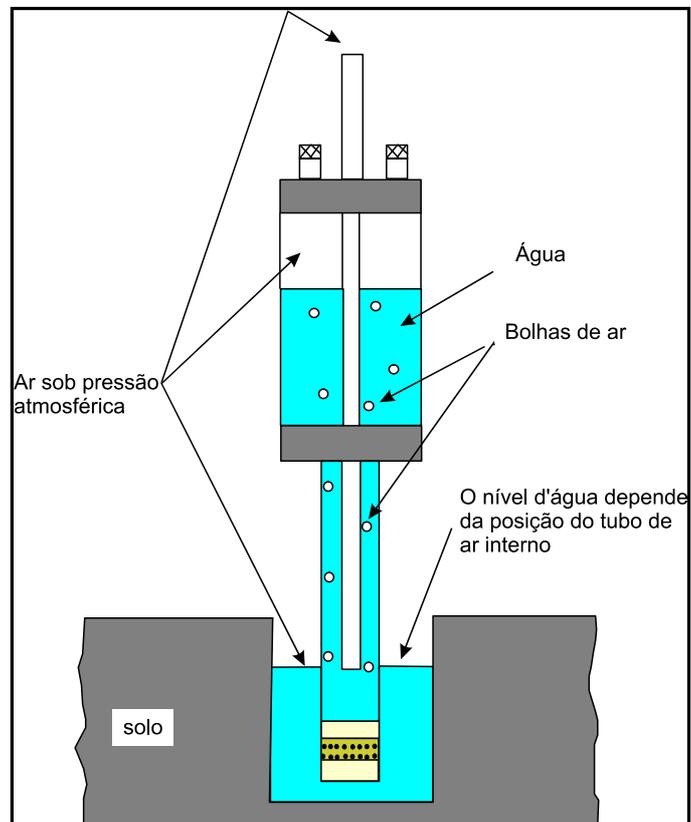


Figura 7 - Esquema de funcionamento de um Permeômetro *Guelph* (modificado de Oliva, 2002).

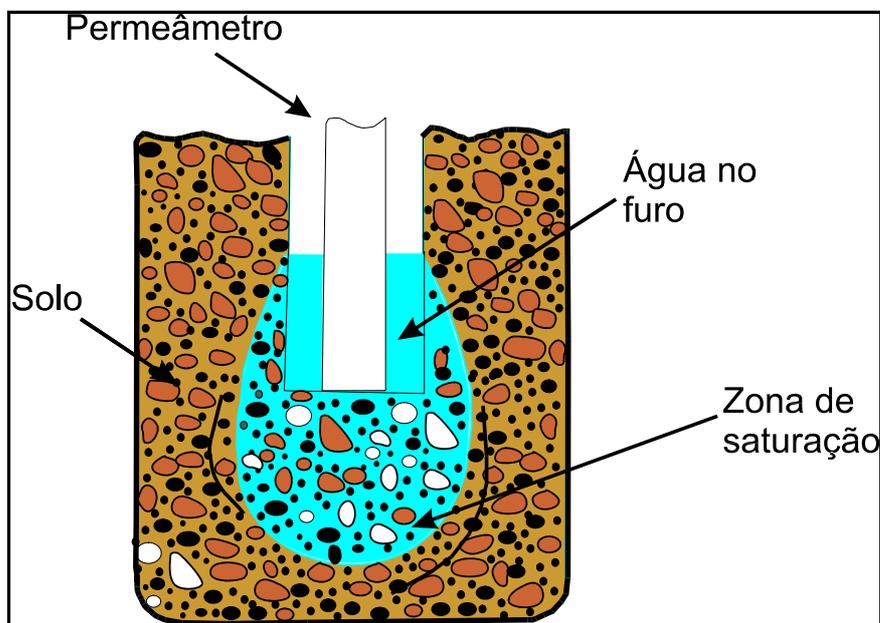


Figura 8 - Bulbo de saturação d'água no solo (modificado de Oliva, 2002).

O volume d'água que se infiltra no solo por unidade de tempo (taxa de infiltração) se torna constante depois de determinado tempo de estabilização. As características e dimensões deste "bulbo" de saturação d'água, uma vez atingida a condição de estabilidade, variam com as características do solo ensaiado. O conhecimento do valor da taxa de infiltração, associado às dimensões do furo e da altura da coluna d'água em seu interior, permite o cálculo da condutividade hidráulica *in situ*, através da seguinte expressão, segundo Soil Moisture Corp.(1987):

$$K = [(0,0041)(X)(R_2) - (0,0054)(X)(R_1)] \quad (7)$$

ou

$$(8)$$

$$K = [(0,0041)(Y)(R_2) - (0,0054)(Y)(R_1)]$$

Onde:

K – Condutividade hidráulica, em cm/s;

R_1 ; R_2 – Taxas de infiltração estabilizadas correspondentes a H_1 e H_2 respectivamente, em cm/s;

2X ; Y – Constantes correspondentes a área do tubo (reservatório d'água) utilizado, em cm^2 ;

$0,0041$ e $0,0054$ – Valores adimensionais que podem ser obtidos através da fórmula:

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi[2H_1 H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 C_2 - H_2 C_1)]} \quad (9)$$

e onde,

$$G_1 = G_2 \frac{(H_2 C_1)}{(H_1 C_2)} \quad (10)$$

Onde:

H_1 ; H_2 - Níveis d'água no furo correspondentes à primeira leitura (5 cm) e à segunda leitura (10 cm), respectivamente;

² Nos ensaios de permeabilidade com o permeâmetro *Guelph*, utilizou-se ambos reservatórios, interno e externo; em consequência disto, a constante empregada nos cálculos foi $Y = 2,17 \text{ cm}^2$ e $X = 35,36 \text{ cm}^2$.

C - Coeficiente de proporcionalidade que depende principalmente do tipo de solo existente no local de ensaio.

No modelo semi-analítico e numérico para a estimativa de K , algumas condições estão implicitamente assumidas:

- ✓ meio poroso rígido, homogêneo e isotrópico;
- ✓ fluxo constante (*steady state flow*);
- ✓ semi-espaço infinito.

Com base nos valores obtidos para a condutividade hidráulica *in situ*, pode-se calcular os correspondentes valores de permeabilidade intrínseca, K_i , através da relação (Fetter, 1988):

$$K_i = K(\mu / \rho g) \quad (11)$$

Onde:

K_i - Permeabilidade intrínseca, em cm^2 ;

K - Condutividade hidráulica, em cm s^{-1} ;

μ - Viscosidade da água, em $\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-1}$;

ρ - Massa específica do fluido, em g cm^{-3} ;

g - Aceleração da gravidade, em cm s^{-2} .

3.5.1.2 - Método de *slug test*

Para obtenção dos valores de condutividade na zona saturada, é necessária a determinação das condutividades hidráulicas em nível variável, já que a condutividade hidráulica (K) do aquífero nessa zona possui provavelmente grande permeabilidade hidráulica no manto de alteração e/ou na rocha semi-alterada.

Para determinação da permeabilidade foram utilizados ensaios do tipo *slug test*, a partir do método empregado por Hvorslev. Segundo Pede (2004), na prática o ensaio consiste em introduzir ou retirar um sólido (*slug*) dentro do poço, de forma que o nível d'água (NA) seja elevado ou rebaixado instantaneamente. Entretanto, a estabilização desse nível pode ser tão rápida que muitas vezes só é possível acompanhá-lo através de transdutores de pressão (Figura 12).

Este volume deslocado equivale à adição ou à retirada instantânea de água do aquífero. Monitorando o posicionamento do NA, obtém-se uma curva de rebaixamento do NA com o tempo. Desta curva são extraídos os parâmetros que, juntamente com as características geométricas do poço, fornecem o valor de condutividade hidráulica (Figura 13).

Portanto, a metodologia de Hvorslev permite avaliar a permeabilidade média das camadas ao redor do filtro, que se encontra nos níveis próximos à zona de contato entre a rocha alterada (saprolito) e o solo propriamente dito, segundo a seguinte equação:

$$K = \frac{r^2 \ln(L/R)}{2LT_0} \quad (12)$$

Onde:

r - Raio efetivo do piezômetro;

L - Comprimento da seção filtrante;

R - Raio do furo;

T_0 - Tempo de resposta quando $h_t / h_0 = 0,37$;

K - Permeabilidade hidráulica.

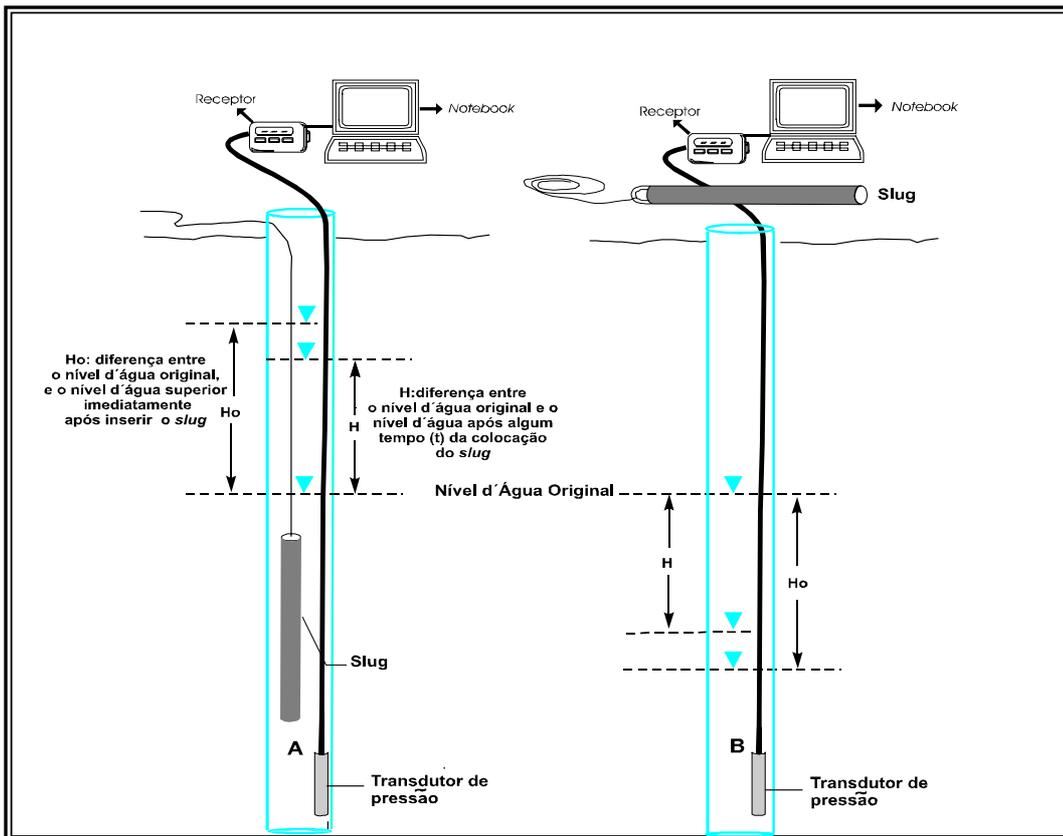


Figura 1- Desenho esquemático do teste de slug com a inserção (A) e retirada (B) de cilindro sólido. Modificado de Pede (2004).

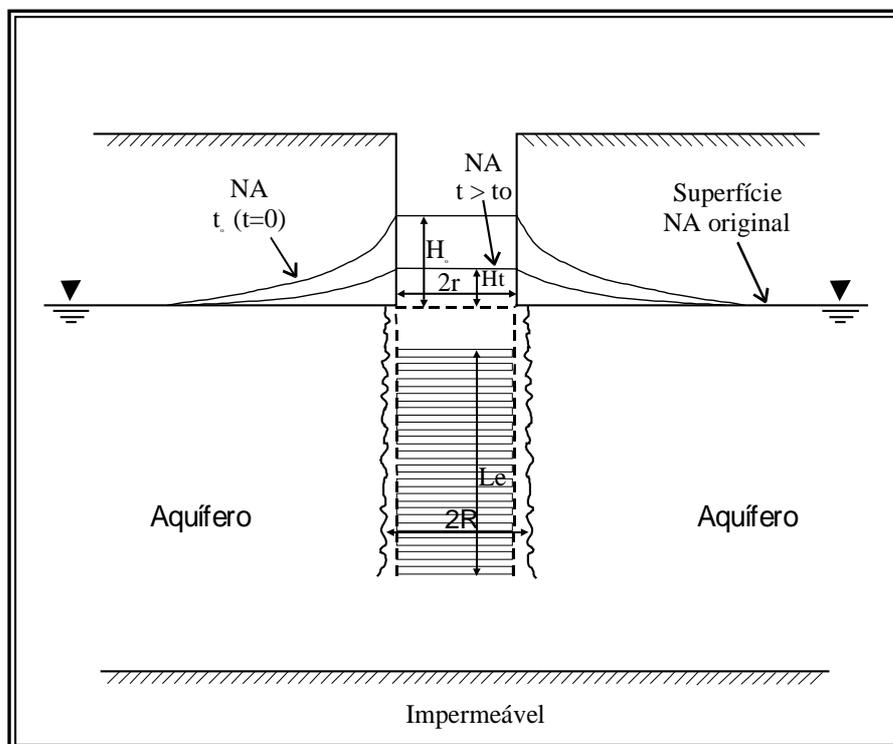


Figura 2 – Desenho esquemático do teste de slug, com os parâmetros geométricos necessários para estimar a condutividade hidráulica, com base no método de Hvorslev (1958).

3.6 - TOPOGRAFIA

O levantamento topográfico referente à área de estudo contou com a apresentação da carta das cotas altimétricas elaboradas pelo IPPUL (2001) para a área urbana de Londrina na escala de 1: 50.000 em modelo digital. Através desse levantamento topográfico foi calculada a declividade através da utilização do software IDRISI.

Declividade refere-se à inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal. Considerando as curvas de nível do terreno de dados altimétricos extraídos de uma carta topográfica e traçando um plano tangente a esta superfície num determinado ponto (P), a declividade em P corresponderá à inclinação deste plano em relação ao plano horizontal.

CAPÍTULO 4 - CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA

Os diagnósticos sócio-econômicos e do meio físico natural, em âmbito regional e local, constituem informações determinantes para o sucesso deste estudo, pois é premente o entendimento da interação entre os processos sócio-econômicos e físico-naturais que caracterizam os espaços geográficos das bacias hidrográficas, diante do crescente comprometimento da qualidade dos mananciais e da disponibilidade de água potável, notadamente em áreas urbanas.

A área de estudo localiza-se na vertente direita do ribeirão Lindóia, próximo à nascente desse importante corpo d'água. A drenagem do ribeirão está inserida nos limites da área urbana do município de Londrina (Figura 14).

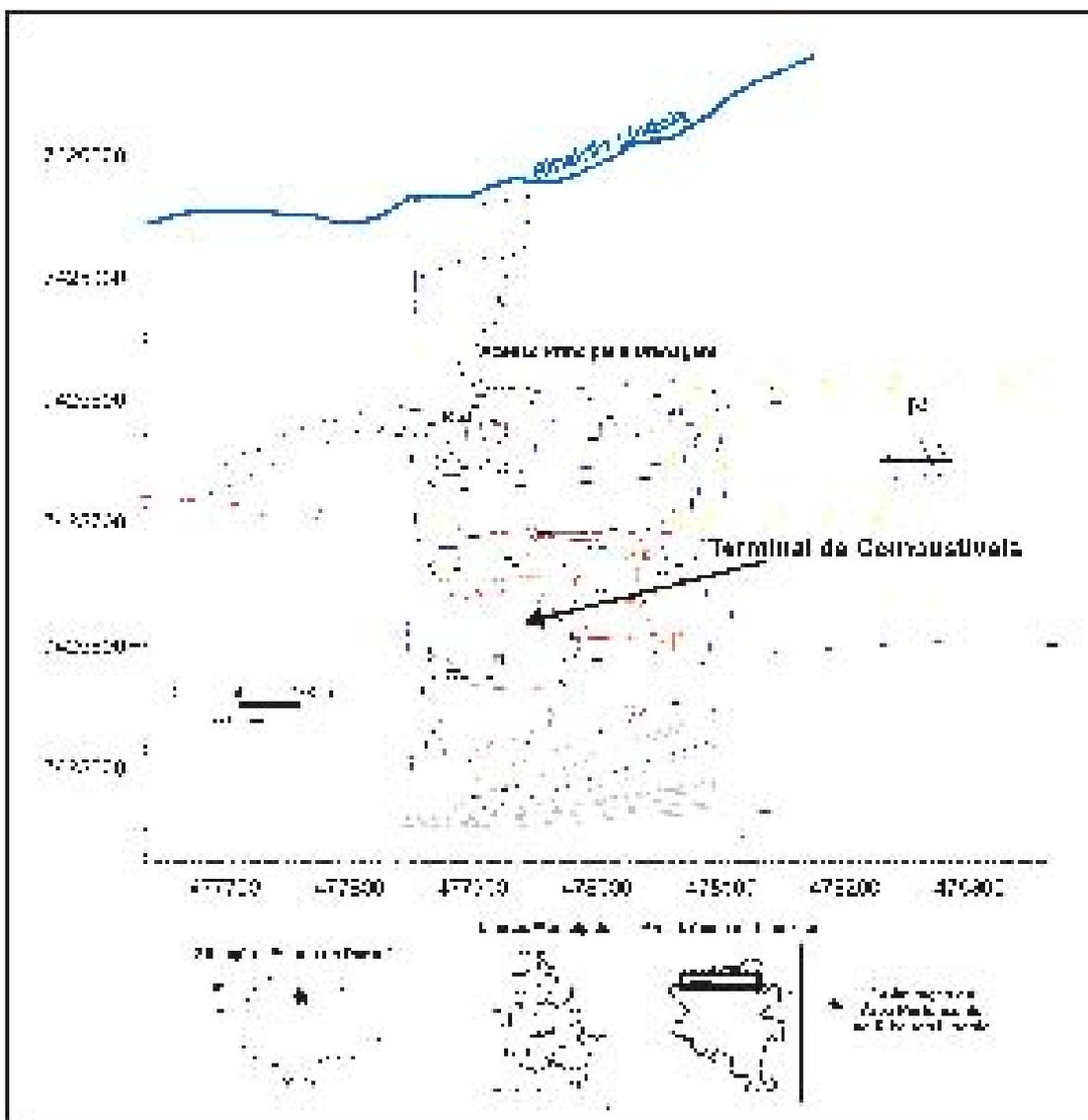


Figura 1 – Detalhe da área de estudo.

4.1 - ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS

A cidade de Londrina possui atualmente mais de 450 mil habitantes (Figura 15); seu traçado urbano inicial, na década de 30, visava abrigar uma população de 20 mil habitantes.

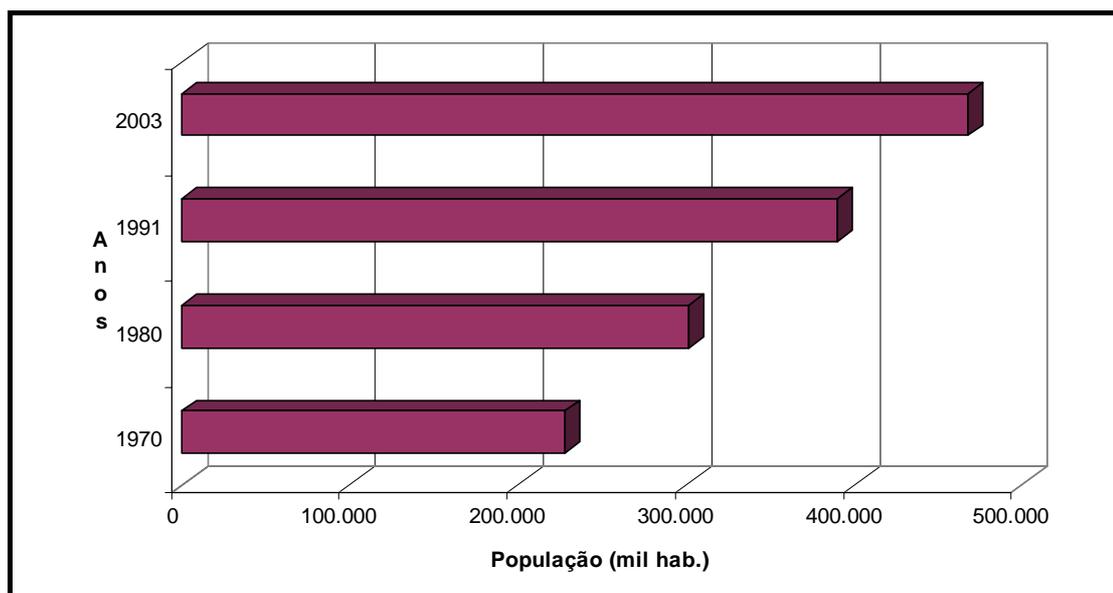


Figura 4 – Evolução da população urbana de Londrina de 1970 a 2003. Fonte: IBGE (censo demográfico 1970, 1980, 1991, 2003 *apud* Trindade 2004).

Como observado na Figura 15, o número de habitantes da cidade de Londrina dobrou em pouco mais de trinta anos. Esse crescimento acelerado da cidade, aliado à falta de um planejamento que efetivamente acompanhasse sua expansão, acabou acarretando problemas tanto de ordem ambiental, quanto sócio-econômica, repercutindo na qualidade de vida da população, principalmente a de mais baixa renda. Segundo Chaves (2002), as famílias que não possuem renda familiar adequada, dado o processo de especulação imobiliária¹, acabam por ocupar fundos de vales sem o saneamento mínimo necessário.

Todavia, Londrina hoje é considerada a terceira maior cidade do sul do país, destacando-se principalmente no setor comercial. Segundo Yamada (1991), o município possui uma forte influência nas áreas de educação, saúde e prestação de serviços, atingindo o sul dos estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul.

¹ Segundo Oliveira (1978 *apud* Cunha 1996) o processo de especulação imobiliária ocorre da seguinte maneira: primeiramente busca-se superar os trâmites burocráticos da aprovação do loteamento da área para satisfazer as posturas municipais. Depois, coloca-se parte da área à venda (essa oferta deve ser sempre inferior à demanda); tais áreas geralmente correspondem às piores parcelas, compostas por encostas íngremes, baixadas, entre outros. Depois de concluída a venda, os loteadores incentivam a população local a reivindicar todo tipo de infraestrutura e serviços como asfalto, água, luz, rede de esgoto, linhas de ônibus, etc. Quando esses serviços básicos já estão instalados, então se põe a venda as outras áreas (geralmente as melhores) por um preço muito superior as primeiras.

O rápido crescimento de Londrina ocorreu, segundo a mesma autora, em função de alguns aspectos que considera fundamentais, como: a integração entre áreas rurais e urbanas na região, implantadas pelo planejamento territorial da Companhia de Terras Norte do Paraná, o que facilitou a circulação dos produtos da área rural em direção aos centros consumidores; o parcelamento da área rural em pequenas propriedades; a posição geoeconômica de Londrina, que recebe influência direta de São Paulo e irradia seu domínio sócio-econômico por uma vasta região, principalmente no norte do Paraná; a atividade cafeeira como base fundamental para seu crescimento; o clima, a fertilidade da terra e a estrutura fundiária implantada, entre outros.

Além disso, em 17 de junho de 1998 foi sancionada pelo então governador do Estado do Paraná, Jaime Lerner, a Lei Complementar nº 81 (*apud* Trindade, 2003) que institui a Região Metropolitana de Londrina, primeira do interior brasileiro, constituída pelos municípios de Londrina, Cambé, Ibiporã, Jataizinho, Rolândia e Tamarana, abrangendo uma população de 720.791 habitantes (estimativa 2003 – IBGE).

Concomitantemente, o processo de crescimento da cidade, tanto geográfico quanto econômico, aliado à expansão populacional, condicionou, a necessidade de uma demanda progressiva de água.

Segundo Arantes (2003), já na década de 80, o agravamento no abastecimento público de água provocado pela urbanização crescente, decorrente principalmente da migração de parte considerável da população rural para a zona urbana, a falta de um efetivo planejamento e a construção de casas populares distribuídas em bairros distantes, induziram o surgimento de novos sistemas de abastecimento independentes, constituídos por poços tubulares profundos.

Em 1984, a SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná, responsável pela exploração e distribuição de água para a cidade de Londrina, iniciou a perfuração de poços tubulares profundos para a exploração do Aquífero Serra Geral, colocando em funcionamento 6 novos poços.

Atualmente, a SANEPAR utiliza 18 poços responsáveis por uma vazão aproximada de 1072.6 m³/h, funcionando em regime de 18 horas por dia. A outra parcela dos poços destina-se ao abastecimento de indústrias, comércio e condomínios

residenciais da região, através de 152 unidades com vazão aproximada de 1317 m³/h, perfazendo hoje um total de 8% do volume de água captada para o abastecimento público e de particulares (Vianna & Celligoi, 2002).

Dessa forma, para uma melhor compreensão da dinâmica de crescimento e desenvolvimento econômico ocorrido na cidade de Londrina, é necessário levar em consideração as características históricas de ocupação, desde sua fundação em 1934.

4.1.1 - Histórico da Ocupação de Londrina

No início do século XIX é que se verifica a chegada dos primeiros colonos ao Norte do Paraná, na região hoje compreendida entre a cidade de Cambará e o Rio Tibagi. Mas é a partir de 1924 que a colonização do Norte paranaense toma grande impulso, através de um novo empreendimento idealizado pela Companhia de Terras Norte do Paraná (CTNP). A companhia era subsidiária brasileira da inglesa Paraná Plantation, que à época era proprietária de milhares de alqueires de terras férteis, ainda intocadas pelo homem e cobertas por matas virgens. Inicia-se assim, um grande processo desenvolvimentista da área.

Segundo Zórteia (1975), a CTNP transformou tais propriedades em projetos imobiliários, porém com uma novidade: a repartição dos terrenos em lotes relativamente pequenos, distribuindo-os aos trabalhadores interessados e que não possuíam posse de terra, adequando a cada comprador individualmente as melhores maneiras de pagamento. Através desse processo, os ingleses da companhia aplicaram, ainda na década de trinta, uma verdadeira reforma agrária sem nenhum tipo de intervenção do Estado, na região do Norte do Paraná.

Este projeto de colonização inglês trouxe consigo um grande desenvolvimento para a região, estimulando o pequeno agricultor através de assistência técnica e financeira adequadas, transporte para os colonos, posse da terra e muito mais. Conseqüentemente, o Norte paranaense sofreu uma grande concentração da produção, especialmente o café, e em seguida, uma explosão demográfica com o surgimento dos primeiros núcleos urbanos e das classes médias rurais (Yamada, 1991).

Em meio a tudo isso, surge em 1929 o primeiro posto avançado deste projeto inglês, com a fundação de sua sede e a chegada de um pequeno grupo de funcionários da companhia que tinham como função a coordenação, orientação e promoção da colonização da área da frente pioneira (Zórteia, 1975). Privilegiadamente localizada a sede da companhia, alguns anos mais tarde se transformaria no sítio da chamada cidade de Londrina, fundada em 3 de Dezembro de 1934 e consolidada como Município em 10 de Dezembro do mesmo ano.

Paralelamente, a CTNP havia ainda de solucionar alguns problemas, os das vias de comunicação e transporte. Cunha (1996) afirma que a expansão da linha férrea era primordial, pois a cidade já vivia um intenso processo de expansão urbano, movido principalmente pelas lavouras de café cultivadas pelos pequenos agricultores, que garantiam a circulação local de mercadorias, produtos e capital. Após a implantação da ferrovia, as produções agrícolas (essencialmente o café) passaram a ser exportadas para São Paulo.

Portanto, o processo de urbanização na cidade de Londrina intensifica-se pelo impulso dado pela cafeicultura e pela expansão da ferrovia. Por sua vez, o terminal ferroviário da cidade atrai em torno de si variados ramos de atividades voltadas para fora das suas divisas, assim como argumenta Lobato (1989:39):

Próximos a estes terminais, vão localizar aquelas atividades, muitas delas nascentes ou em ampliação, voltadas para o mundo exterior à cidade, o comércio atacadista, depósitos, escritórios, e a indústria: a localização junto aos terminais de transporte era essencial, significando diminuição de custos.

Por tudo isso, há que se destacar que a gênese do acelerado crescimento populacional de Londrina, associada à rápida urbanização ocorrida na cidade, emerge como processo e forma do capitalismo, pois a expansão da rede ferroviária condicionou a criação de um elo da cidade ao mundo exterior (inter-regional), ligações estas que envolvem fluxos de capitais, de mercadorias, de produção, de pessoas e idéias e, conseqüentemente, o estímulo da concentração dos negócios e da economia em torno dos terminais de transporte e, dada a necessidade da acessibilidade e do transporte interurbano ao mercado consumidor, conduzindo as economias regionais às chamadas “economias de aglomeração”.

4.1.2 - Característica de Uso e Ocupação do Solo na Área de Estudo

A ocupação do relevo, tanto como suporte ou como recurso, responde por uma série de transformações do seu estado primitivo. Essas transformações geralmente são iniciadas com o desmatamento, seguidas do uso e da ocupação do solo que vêm sendo realizadas de forma anárquica, sem um levantamento prévio de seus componentes que assegure formas adequadas de utilização do meio físico. O mesmo ocorre na área de estudo, onde é freqüente o uso inapropriado do solo, afetando o equilíbrio natural dos sistemas ambientais.

Segundo Arantes (2003), os domínios das bacias hidrográficas foram os principais determinantes que condicionaram os padrões de uso e ocupação do solo do norte do Estado do Paraná, pois as cidades foram construídas nos espigões e os lotes obedeciam ao sistema longitudinal partindo das estradas, localizadas no topo, em direção aos fundos de vale.

A expansão da área urbana de Londrina para o setor norte da cidade, onde se localiza a área de estudo, ocorreu com maior intensidade a partir da década de 70 (vide Figura 1). A ocupação desse setor da cidade deu-se, sobretudo, através da construção de conjuntos habitacionais, o que tornou essa região conhecida popularmente como “Cinco Conjuntos”, ocupados inicialmente por uma população de baixa renda, formada principalmente por prestadores de serviços (Chaves, 2002).

Conforme Cunha (1996, p. 65),

Esses conjuntos habitacionais tinham como objetivo suprir a falta de moradias em Londrina, um problema que havia se agravado nas décadas de 50, 60 e 70 devido ao crescimento populacional ocorrido nessa época, reflexo do êxodo rural, proveniente de várias cidades do norte do Paraná, e também de outras regiões do país.

Diante desse contexto, a solução encontrada pelo poder público foi a construção de conjuntos habitacionais, principalmente na porção norte da cidade, já que a porção centro sul era ocupada basicamente por residências de alto padrão. Os conjuntos

habitacionais foram construídos em áreas bem distantes do centro da cidade, ficando enormes espaços vazios entre eles e o centro urbano. Conforme Mendonça (1995, *apud* Cunha 1996), inicialmente esses conjuntos habitacionais contavam com uma precária infra-estrutura que consistia apenas em água tratada, energia elétrica, sem área de lazer, pavimentação de ruas, rede de esgoto, entre outros.

Com relação ao uso e ocupação do solo no ribeirão Lindóia, os conjuntos habitacionais ocupam com maior densidade a porção média dessa bacia hidrográfica. Em seu curso superior, mais precisamente à margem direita, encontram-se algumas indústrias químicas, áreas residenciais, terminais de combustíveis e áreas agrícolas. As matas ciliares ocorrem com maior intensidade nesse curso do ribeirão, mas em sua maioria não ultrapassa a 10 m de faixa marginal.

De modo geral, a análise do uso do solo associado à degradação ambiental contribui para a contextualização da realidade local, pois proporciona uma verificação da influência antrópica sobre o meio, considerando que o homem, ultimamente, tem sido um dos principais agentes causadores da aceleração da dinâmica do meio físico.

Nesse sentido, a falta de planejamento, aliada a uma política inadequada de uso e ocupação do solo, traz sérias conseqüências para a manutenção da qualidade dos recursos hídricos e em especial os subterrâneos.

São inúmeras as atividades potencialmente poluidoras, merecendo destaque algumas representadas no Quadro 4.

Quadro 1 – Atividades de uso e ocupação do solo potencialmente poluidoras das águas subterrâneas.

| Atividade | Fonte Poluidora | Contaminantes Envolvidos |
|---|---|--|
| (a) Atividades Agrícolas | Utilização de fertilizantes e/ou pesticidas especialmente em lavouras, principalmente em áreas com solo pouco espessos e porosos. | Especialmente compostos nitrogenados. |
| (b) Disposição de Resíduos Sólidos | Disposição direta de resíduos sólidos (origem diversa) sobre o solo natural, expondo a massa às intempéries do clima e provocando a migração pela zona não saturada de lixiviado ou chorume decorrentes da decomposição dos resíduos. | Diversos, relacionados à origem dos resíduos dispostos diretamente sobre solo natural. |
| (c) Lançamento de Esgoto | Áreas residenciais com ligação de rede de esgoto clandestina, incompleta ou inexistente (fossas, tanques sépticos e etc). | Bactérias, compostos solúveis orgânicos e principalmente nitratos. |
| (d) Hidrocarbonetos e Derivados | Vazamento de tanques de combustíveis, principalmente subterrâneos, muitas vezes deteriorados pela ação da oxidação. | Principalmente óleo diesel e gasolina, especialmente na forma de hidrocarbonetos aromáticos (BTEX), conhecido pelo grande potencial de dano a saúde. |
| (e) Atividades Industriais | Geradoras de altas concentrações de contaminantes, provindo principalmente dos efluentes líquidos e sólidos descartados pelo sistema de produção industrial. | Diversificados, associados ao tipo de atividade industrial e aos efluentes gerados. |
| (f) Cemitérios | Decomposição de cadáveres, principalmente quando ocorre a inumação (enterramento do caixão diretamente no solo). | Líquidos humorosos e substâncias tóxicas como a cadaverina e a putrescina. |

Modificado: Aguiar (2001).

No entanto, a lenta circulação da água subterrânea faz com que muitas vezes a poluição hídrica se manifeste muito tempo depois de seu início, o que torna a recuperação desse aquífero deveras lento e, muitas vezes, economicamente inviável.

Dentre as atividades destacadas no Quadro 4, merecem destaque as enumeradas (a), (b), (c) e (d), pois são atividades relacionadas ao uso e ocupação do solo da área em estudo. Atualmente nessa área verifica-se o predomínio de uso e ocupação do solo por empresas de estocagem de combustíveis e atividades agro-pastoris (Figura 16). Tais atividades destacadas, especialmente a primeira, trazem sérios riscos à qualidade das águas subterrâneas locais, sendo por isso necessário um estudo que avalie a vulnerabilidade do aquífero nesta localidade. Desse modo, fica salientado mais uma vez a importância dos atuais estudos hidrogeológicos.

O mapa de uso do solo local foi delineado de acordo com as informações colhidas dos autores citados acima e nos trabalhos de campo.

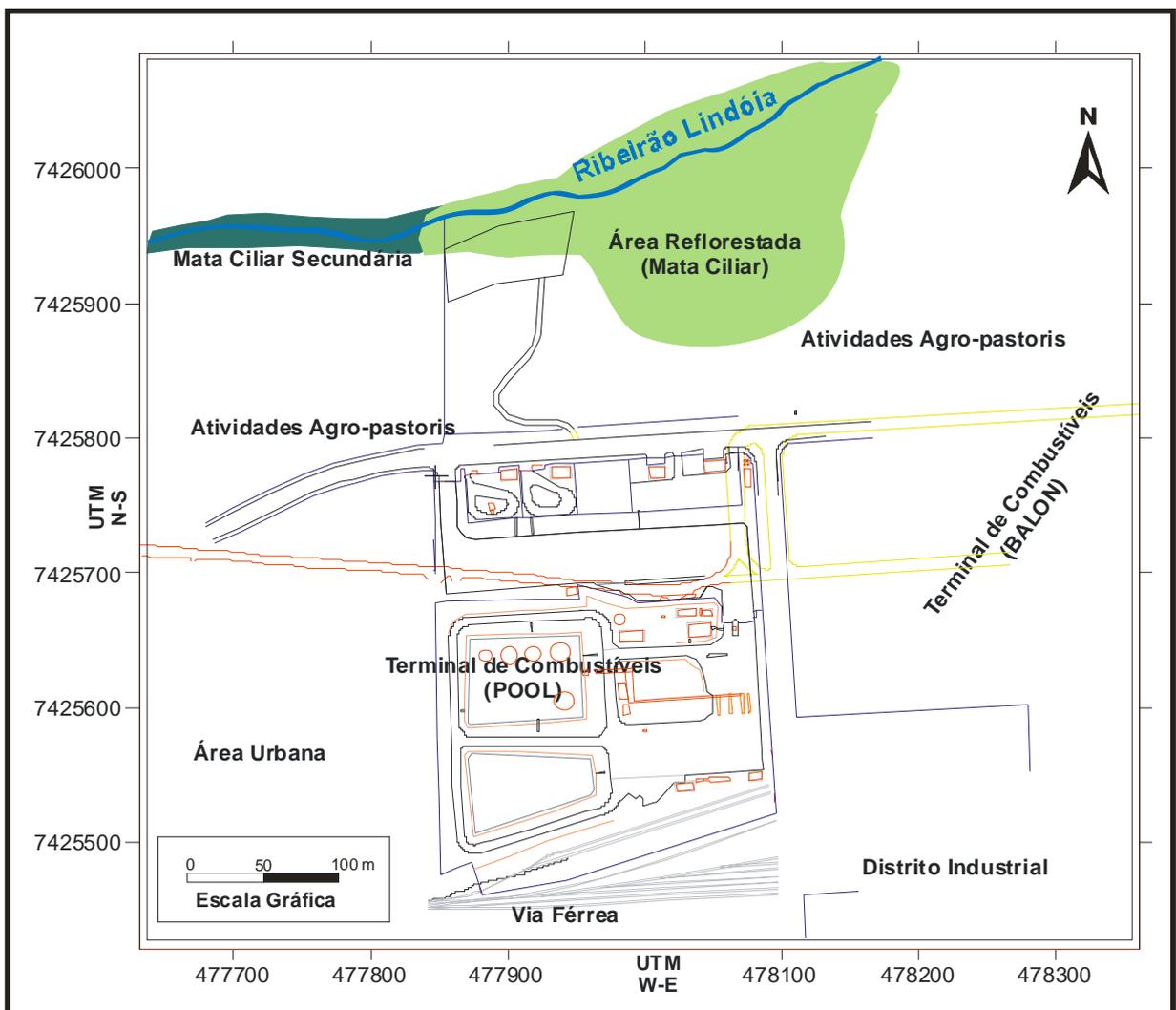


Figura 5 – Mapa relativo aos aspectos do uso e ocupação do solo.

4.2 - ASPECTOS DO MEIO FÍSICO NATURAL

O estudo do meio físico, com vistas ao esclarecimento de como se dá a dinâmica dos elementos que compõe o espaço natural, foi essencial para a compreensão da influência que as atividades mencionadas no Quadro 4 poderiam exercer sobre o aquífero localizado à sua jusante e decisivo para compor a avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero.

Dessa forma, a análise partirá da escala regional para local, para melhor compreensão dos fatores. Dentre os elementos do meio físico natural destacam-se o clima, a hidrografia, a geomorfologia, a geologia, os solos e a hidrogeologia.

4.2.1 - Aspectos Climáticos

As condições médias da atmosfera que identificam o clima de uma dada região são definidas, principalmente, segundo sua situação geográfica. Situado no Hemisfério Sul e cortado pelo Trópico de Capricórnio, o estado do Paraná sofre influências de alguns fatores macroclimáticos que lhe garantem o predomínio do clima subtropical (Nimer, 1989).

Porém, a conformação topográfica paranaense atribui algumas diferenciações em relação aos subtipos climáticos, destacando-se o Cfa (Subtropical Úmido Mesotérmico), Cfb (Subtropical Super-Úmido Mesotérmico) e Af (Clima tropical super úmido) (Figura 17):

- Af - clima tropical superúmido, sem estação seca e isenta de geadas, com médias de temperaturas inferiores a 18⁰C. Ocorre apenas no litoral, em altitudes inferiores a 50 metros.
- Cfb - clima mesotérmico, úmido e superúmido, sem estação seca, com verões quentes a moderadamente quentes e com média do mês mais quente inferior a 22⁰C. As geadas são bem freqüentes. É comum nas regiões central, sul e centro-leste, em altitudes superiores a 850-900 metros.

- Cfa - clima mesotérmico, sem estação seca, com verões quentes e com média do mês mais quente superior a 22^o C, com predominância dos sistemas atmosféricos intertropicais; as geadas são frequentes no inverno.

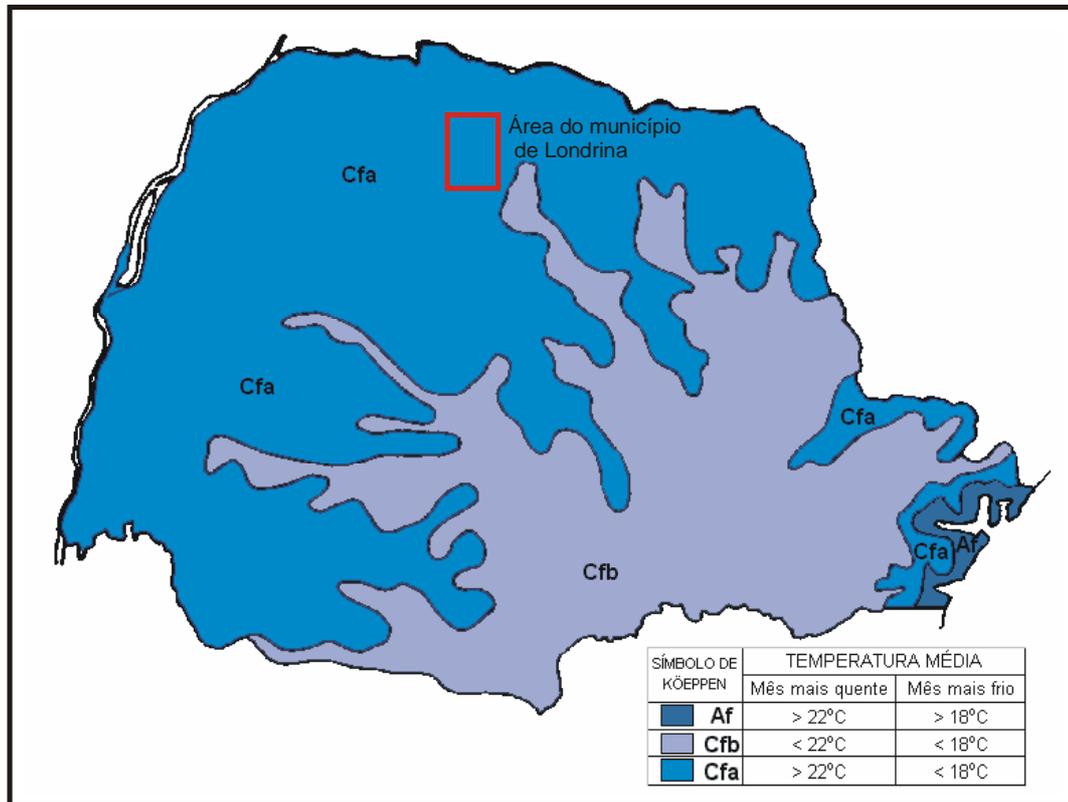


Figura 6 - Tipos climáticos do Estado do Paraná - fonte: IAPAR (1984).

Segundo a classificação de Köppen (*apud* Nimer 1989), Cfa é o tipo climático predominante em todo norte, oeste e sudoeste paranaense, em altitudes normalmente inferiores a 850-900 metros, abrangendo neste caso a área do município de Londrina.

Segundo Mendonça (1995), o tipo climático predominante na área de estudo tem no verão sua estação mais úmida, período que concentra grande parte das chuvas que ocorrem ao longo do ano, e cujas temperaturas médias máximas podem atingir os 28°C (Figuras 18 e 19). Segundo o mesmo autor, a estação de inverno representa um período de estiagem relativa na área do município de Londrina, sendo os meses de julho e agosto os mais secos do ano, com médias mensais em torno de 50 mm (Figura 18). Com temperaturas médias de cerca de 18°C, essa época é marcada

principalmente por incidências de geadas, especialmente no mês de julho, quando as temperaturas mínimas médias podem chegar até 10°C. No geral, a temperatura média da área de estudo é de 20°C (Figura 19).

Dessa forma, as características climáticas observadas na área de estudo, representam as mais expressivas características de tropicalidade climática (Verificar o balanço hídrico no capítulo 5).

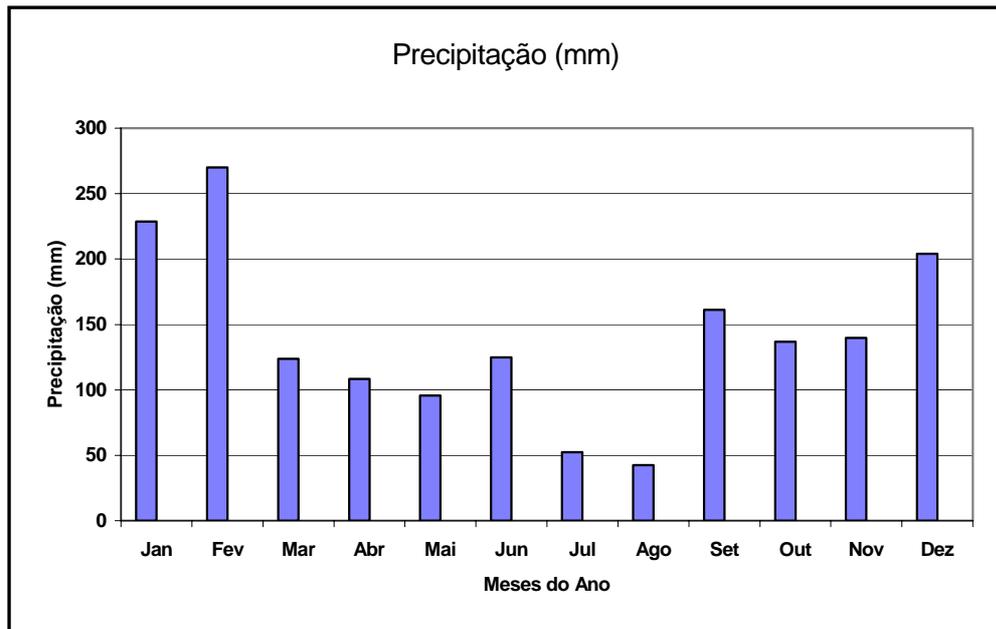


Figura 7 - Pluviosidade no município de Londrina. Os valores são expressos em alturas mensais médias de chuva (mm), no intervalo de 1993 a 2001. Fonte: IAPAR.

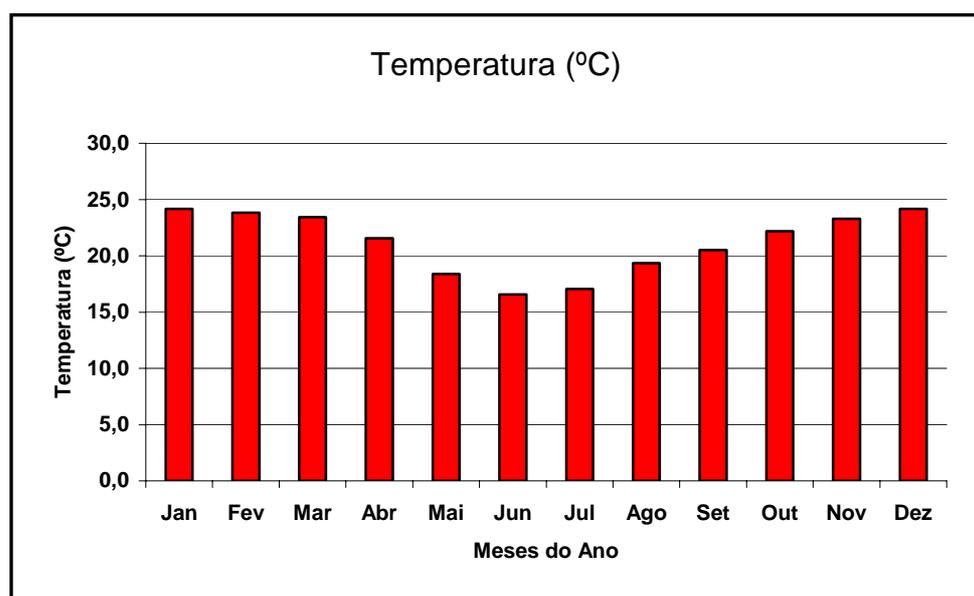


Figura 8 – Temperaturas médias no município de Londrina no período de 1993 a 2001, medidas na estação pluviométrica de Londrina. Fonte: IAPAR.

4.2 - ASPECTOS DO MEIO FÍSICO NATURAL

O estudo do meio físico, com vistas ao esclarecimento de como se dá a dinâmica dos elementos que compõe o espaço natural, foi essencial para a compreensão da influência que as atividades mencionadas no Quadro 4 poderiam exercer sobre o aquífero localizado à sua jusante e decisivo para compor a avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero.

Dessa forma, a análise partirá da escala regional para local, para melhor compreensão dos fatores. Dentre os elementos do meio físico natural destacam-se o clima, a hidrografia, a geomorfologia, a geologia, os solos e a hidrogeologia.

4.2.1 - Aspectos Climáticos

As condições médias da atmosfera que identificam o clima de uma dada região são definidas, principalmente, segundo sua situação geográfica. Situado no Hemisfério Sul e cortado pelo Trópico de Capricórnio, o estado do Paraná sofre influências de alguns fatores macroclimáticos que lhe garantem o predomínio do clima subtropical (Nimer, 1989).

Porém, a conformação topográfica paranaense atribui algumas diferenciações em relação aos subtipos climáticos, destacando-se o Cfa (Subtropical Úmido Mesotérmico), Cfb (Subtropical Super-Úmido Mesotérmico) e Af (Clima tropical super úmido) (Figura 17):

- Af - clima tropical superúmido, sem estação seca e isenta de geadas, com médias de temperaturas inferiores a 18⁰C. Ocorre apenas no litoral, em altitudes inferiores a 50 metros.
- Cfb - clima mesotérmico, úmido e superúmido, sem estação seca, com verões quentes a moderadamente quentes e com média do mês mais quente inferior a 22⁰C. As geadas são bem freqüentes. É comum nas regiões central, sul e centro-leste, em altitudes superiores a 850-900 metros.

- Cfa - clima mesotérmico, sem estação seca, com verões quentes e com média do mês mais quente superior a 22^o C, com predominância dos sistemas atmosféricos intertropicais; as geadas são frequentes no inverno.

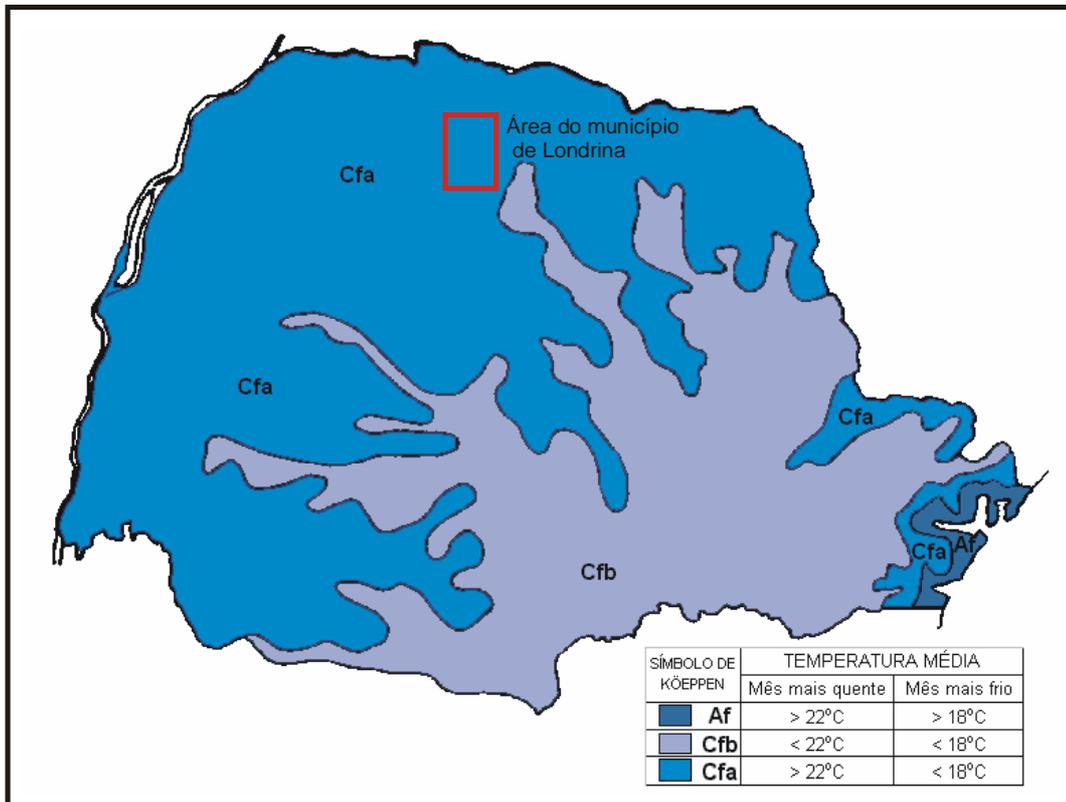


Figura 6 - Tipos climáticos do Estado do Paraná - fonte: IAPAR (1984).

Segundo a classificação de Köppen (*apud* Nimer 1989), Cfa é o tipo climático predominante em todo norte, oeste e sudoeste paranaense, em altitudes normalmente inferiores a 850-900 metros, abrangendo neste caso a área do município de Londrina.

Segundo Mendonça (1995), o tipo climático predominante na área de estudo tem no verão sua estação mais úmida, período que concentra grande parte das chuvas que ocorrem ao longo do ano, e cujas temperaturas médias máximas podem atingir os 28°C (Figuras 18 e 19). Segundo o mesmo autor, a estação de inverno representa um período de estiagem relativa na área do município de Londrina, sendo os meses de julho e agosto os mais secos do ano, com médias mensais em torno de 50 mm (Figura 18). Com temperaturas médias de cerca de 18°C, essa época é marcada

principalmente por incidências de geadas, especialmente no mês de julho, quando as temperaturas mínimas médias podem chegar até 10°C. No geral, a temperatura média da área de estudo é de 20°C (Figura 19).

Dessa forma, as características climáticas observadas na área de estudo, representam as mais expressivas características de tropicalidade climática (Verificar o balanço hídrico no capítulo 5).

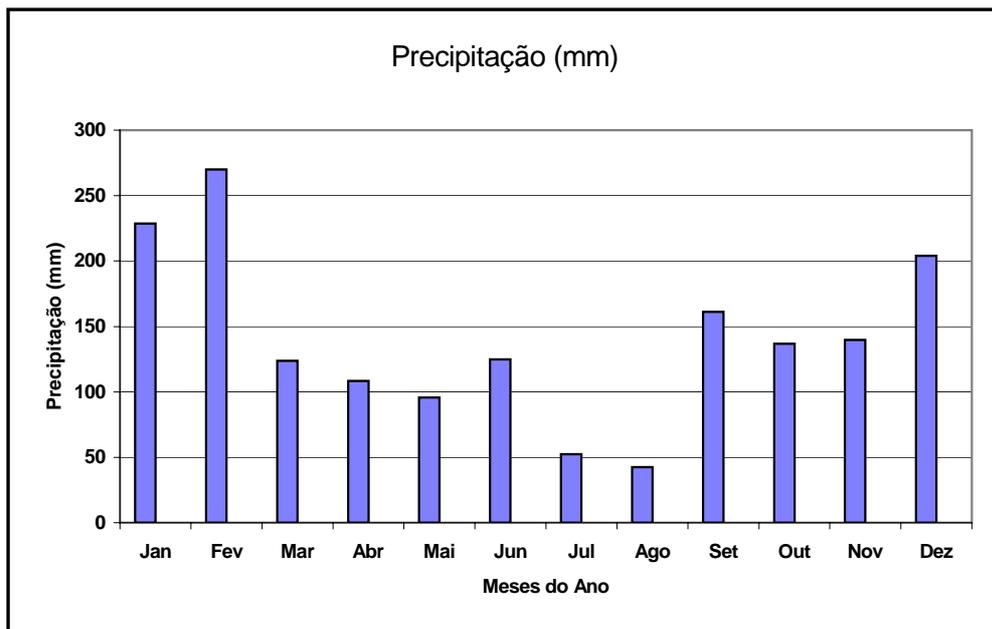


Figura 7 - Pluviosidade no município de Londrina. Os valores são expressos em alturas mensais médias de chuva (mm), no intervalo de 1993 a 2001. Fonte: IAPAR.

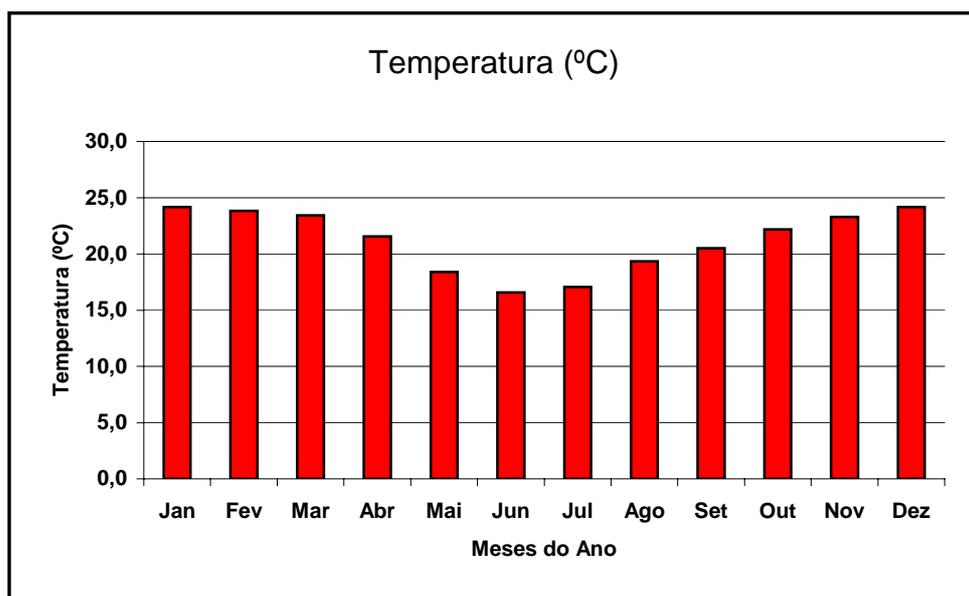


Figura 8 – Temperaturas médias no município de Londrina no período de 1993 a 2001, medidas na estação pluviométrica de Londrina. Fonte: IAPAR.

Predominantemente, as temperaturas médias do estado do Paraná são relativamente altas, com índices máximos superiores a 22°C nos meses de verão e dificilmente inferiores a 18°C nos meses mais frios; a precipitação média anual na região varia de 1500mm a 1700mm, com algumas exceções para o litoral (cerca de 3.000 mm) e próximo à divisa com o estado de São Paulo (inferior a 1.250 mm) (Nimer 1989).

4.2.2 - Hidrografia

A rede hidrográfica no município de Londrina é farta e bem distribuída. Os rios são todos perenes estando orientados, preferencialmente, segundo a direção NW-SE e, secundariamente, segundo W-E. O mesmo sentido é verificado predominantemente na drenagem do ribeirão Lindóia (Figura 20). Todos os rios em questão pertencem à margem esquerda do rio Tibagi, que por sua vez é o principal tributário da margem esquerda do rio Paranapanema, todo sistema fazendo parte da grande bacia do rio Paraná, um dos formadores da bacia do rio da Prata (França, 2002).

No geral, os rios localizados na porção centro-sul do município apresentam padrão dendrítico. Já na zona norte do município, os cursos hídricos são mais retilíneos, isto é, caracterizado fundamentalmente por uma drenagem com poucos meandros.

Já o ribeirão Lindóia é um tributário do ribeirão Jacutinga, que é um afluente do rio Tibagi. Sua nascente localiza-se a oeste da cidade de Londrina, nas proximidades da cidade de Cambé. Esse curso hídrico atravessa paralelamente toda porção norte da cidade, até confluir-se com o ribeirão Quati (Figura 20). O rio Tibagi é o principal curso hídrico do município, percorrendo cerca de 80 Km no limite leste de Londrina.

A área urbana de Londrina é segmentada, preferencialmente no sentido oeste-leste, por diversas bacias e sub-bacias, as quais condicionam a organização dos espaços urbanos. Os corpos d'água urbanos têm em comum a má qualidade de suas águas: além de suas nascentes estarem localizados em áreas urbanas, seus cursos recebem o escoamento superficial, bem como os lançamentos de águas pluviais, efluentes líquidos domésticos, industriais e resíduos sólidos (Arantes 2002).

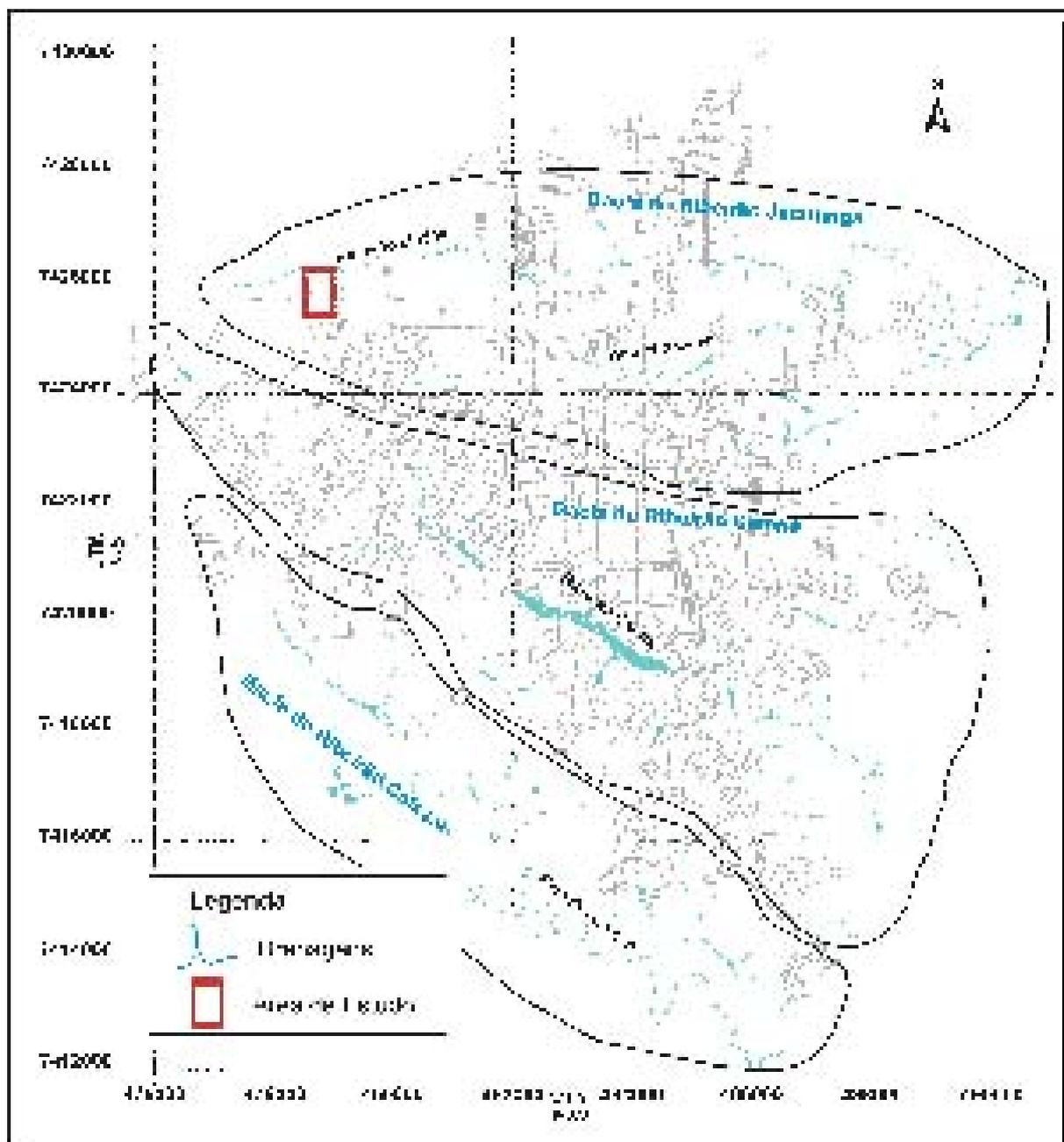


Figura 2 – Principais bacias hidrográficas na área urbana de Londrina.

4.2.3 - Geomorfologia

Segundo Maack (1981), as formas de relevo do estado do Paraná possuem as atuais características devido às ações predominantes dos sistemas hidrográficos, aos movimentos epirogênicos e tectônicos e à influência das alterações do clima. Para o autor, o relevo paranaense pode ser agrupado em cinco regiões orográficas distintas: o Litoral, a Serra do Mar definida como uma escarpa de falha com elevações que atingem 1000 metros, o Primeiro Planalto, o Segundo Planalto e o Terceiro Planalto, que se caracterizam por degraus estruturais ou escarpas de estratos, que se inclinam suavemente em direção oeste, noroeste e sudoeste em direção a calha do rio Paraná.

O norte paranaense, onde se encontra a área de estudo, possui evolução geomorfológica sobre a bacia sedimentar do Paraná, inserida no Terceiro Planalto Paranaense, onde se desenvolve a estrutura geomorfológica das Cuestas Areníticas Basálticas caracterizada pela sucessão de camadas sedimentares e basálticas de desigual resistência, trabalhadas pela erosão. Quanto à fisionomia, segundo (A'B Saber, 1956). *"As Cuestas arenito basálticas apresentam sinuosas e descontínuas. São linhas de escarpas esculpidas em estruturas monoclinais, seccionadas por extensos rios conseqüentes"*.

Maack (1981) afirma que os vales dos rios Tibagi, Ivaí, Piquiri e Iguaçu dividem o Terceiro Planalto em regiões geográficas naturais, sendo a porção norte, no denominado Planalto de Apucarana, a escarpa declina a partir da Serra do Cadeado numa extensão de 150 Km, cuja superfície apresenta, ao lado de pequenos espigões, apenas suaves colinas e platôs com vales mais profundos em direção ao rio Ivaí. A porção nordeste está o planalto de Araiporanga, prolonga-se dos rios Tibagi e Itararé, sendo baixa e cortada em platôs isolados e mesetas pelos rios Cinza, Laranjinha e Congonhas. O planalto de Campo Mourão, inserido na porção noroeste, inclina-se da Serra da Boa Esperança a uma altitude de 1150 metros acima do nível do mar, à 225 m nas margens do rio Paraná.

Os derrames basálticos abrangem a extensão total de rochas do Terceiro Planalto do estado do Paraná, entre o rio Paranapanema e o divisor de águas Iguaçu-

Uruguai, com leve depressão sinclinal em direção à bacia do Paraná, até o rio Paranapanema (A'B Saber *op. cit.*).

Londrina pode ser dividida em duas grandes áreas, conforme a inclinação das vertentes de seu relevo: na parte centro-sul predomina um relevo mais movimentado e com variada constituição litológica, o que originou vertentes bastante inclinadas quando comparado à porção centro-norte, de uniformidade litológica e com o relevo suave a ondulado e de vertentes menos inclinadas (Figura 21).



Figura 10– Vista geral da área de estudo: observa-se em primeiro plano, um relevo suave com declividades pouco acentuadas; ao fundo, a drenagem do ribeirão Lindóia e uma pequena mata ciliar.

Na área de estudo, as vertentes são longas e com baixa declividade (Figura 22), com altitudes variando entre 560 a 610 metros acima do nível do mar. De modo geral, como apresenta a Figura 22, a conformação topográfica da área de pesquisa possui inclinação suave no sentido N, obedecendo à drenagem do ribeirão Lindóia, cuja direção W-E obedece, por sua vez, a drenagem do rio Tibagi, do qual é afluente direto, constituindo ambos parte da Bacia do Rio Paraná.

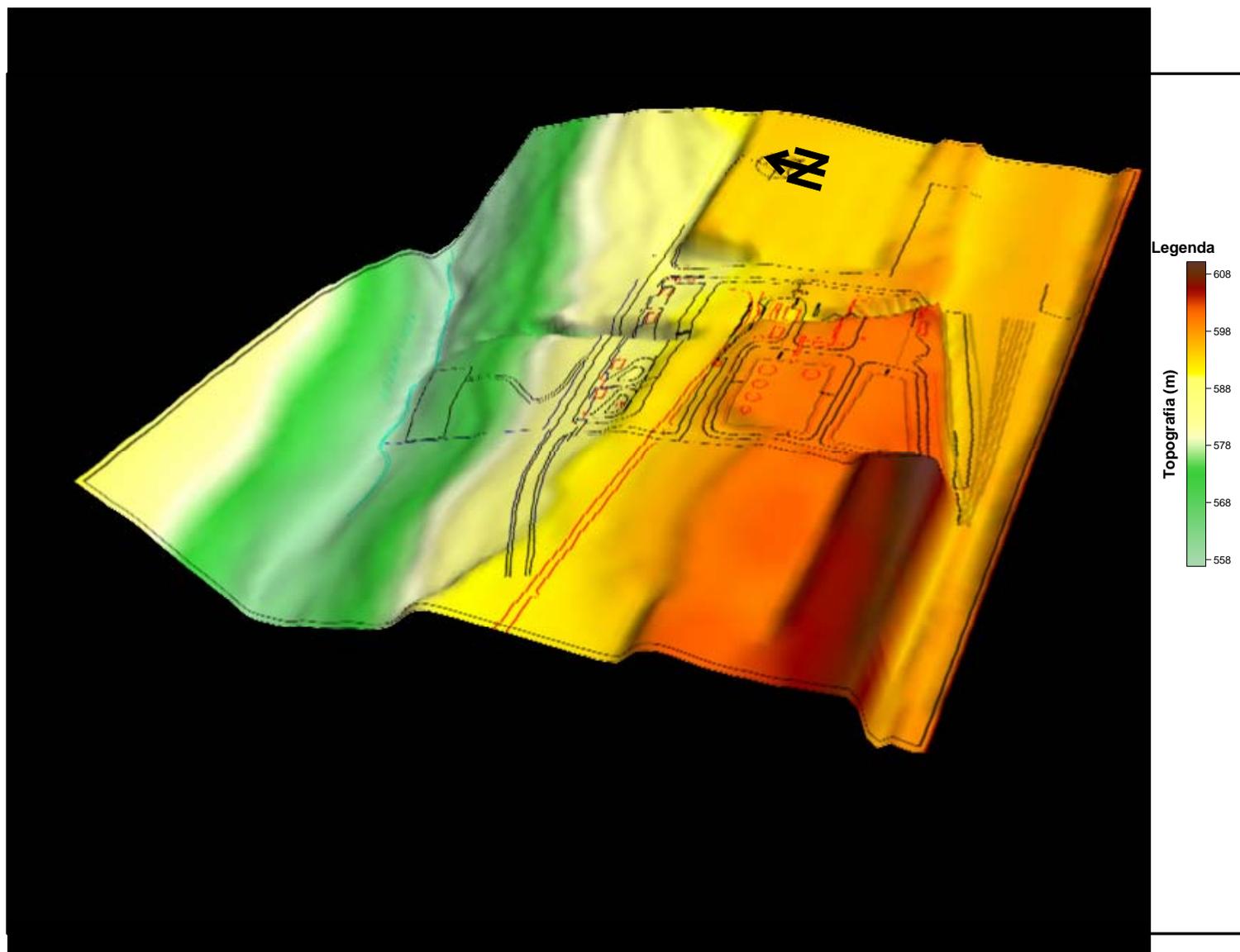


Figura 11 – Bloco diagrama evidenciando a conformação topográfica da área de estudo.

4.2.4 - Solos

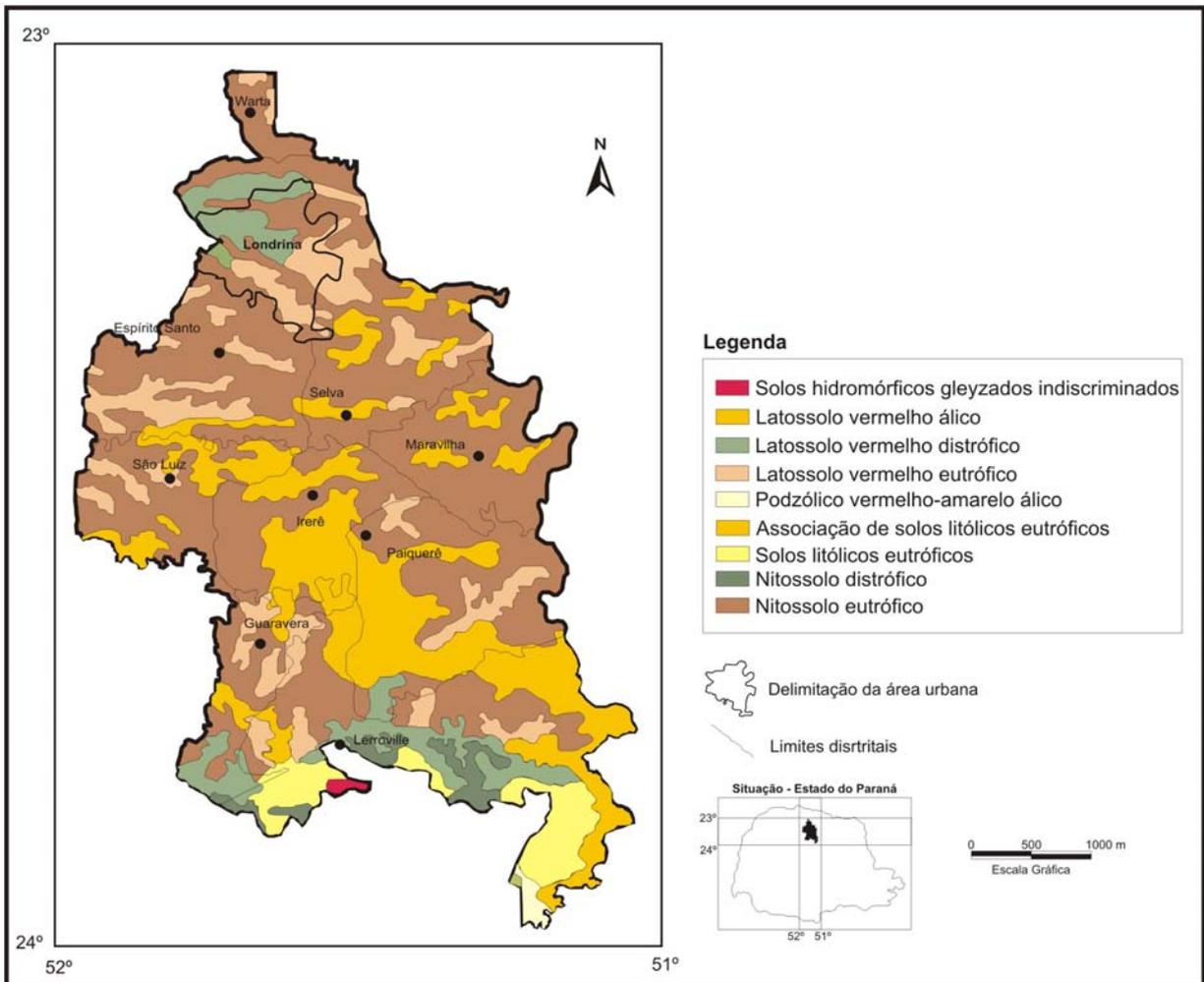
Para Vieira (1995), do ponto de vista morfológico são várias as características que definem um perfil de solo, entre as quais se destacam: cor, textura, estrutura, consistência e porosidade. Os solos, de maneira geral, possuem papel primordial, pois seus horizontes se caracterizam como atenuadores naturais de contaminantes que se infiltram antes de chegar à zona saturada.

A principal unidade pedológica do município de Londrina é constituída por camada de solo espessa, em torno de 15 metros, mas podendo chegar a 30 metros em algumas regiões. Trata-se de um solo residual argiloso, resultado do alto grau de intemperismo sofrido pela rocha basáltica. Este perfil foi dividido por Branco *et al.* (1998) em 3 camadas: argila siltosa porosa muito mole à média vermelho-escura, argila siltosa rija vermelho-escura e argila rija a dura.

A região em questão apresenta no geral solos de média e/ou alta fertilidade, tais como o Latossolo Roxo e a Terra Roxa estruturada. No entanto, a EMBRAPA (1999) sugere hoje uma nova classificação para esses tipos de solos, os nomeando-os em Latossolo Vermelho e Nitossolo, respectivamente (Figura 23).

O Latossolo Vermelho é um dos mais importantes solos do ponto de vista agrícola por sua fertilidade natural; sua profundidade vai além de 3 metros. Sua coloração caracteriza-se pelo vermelho fosco, ou mesmo bruno-avermelhado e, quando umedecida, torna-se arroxeada.

Segundo Stipp (2003), o Latossolo Vermelho apresenta teor de argila superior a 60%, portanto, tem textura muito argilosa, consistência muito friável, é poroso e acentuadamente drenado. A textura constitui a fase mineral sólida do solo e mede, em porcentagem, as proporções de argila, silte e areia.



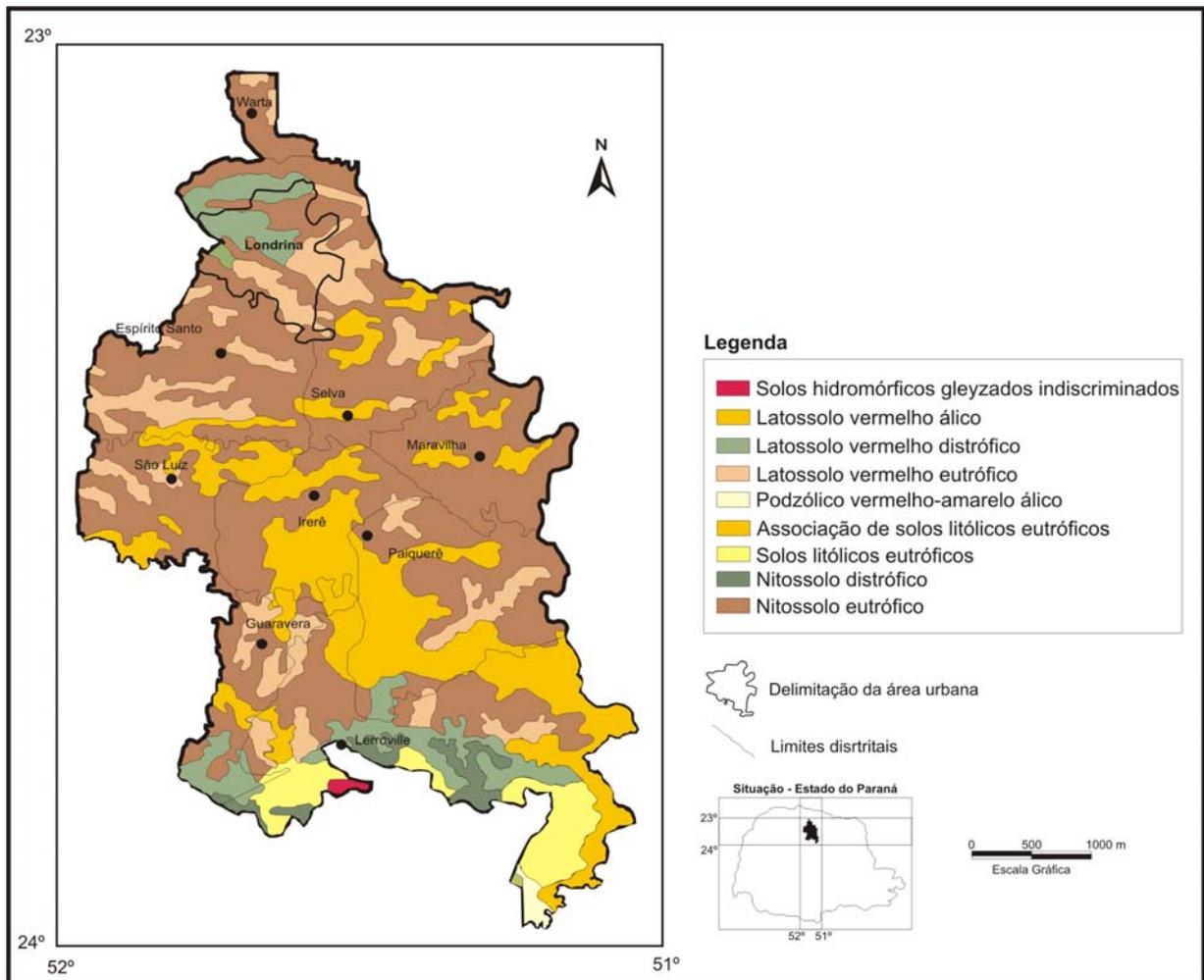


Figura 1 – Mapa pedológico do município de Londrina. Modificado de Stipp (2003).

O Latossolo Vermelho é formado quase que completamente de alteração da rocha mãe (basalto) e constituído de grandes quantidades de ferro hidratado ($\text{Fe}_2\text{O}_3 > 18\%$), o que lhe confere coloração bastante escura (Vieira, 1995). Suas características morfológicas apresentam poucas variações, fazendo com que os diversos horizontes se apresentem pouco individualizados e difusos.

Os Nitossolos ou a Terra Roxa Estruturada são solos bem desenvolvidos. Possui coloração que se assemelha ao Latossolo Vermelho, um horizonte B textural com espessura de mais ou menos 2 metros, sendo que sua importância para a agricultura é a mesma. Têm textura muito argilosa (60% ou mais de argila na maior parte dos

horizontes) (Stipp, 2003). Classifica-se de estruturada devido a sua estrutura subangular bem desenvolvida. Este solo tem por características principais o B textural (argiloso), cerosidade no horizonte B e, quando molhado, torna-se plástico e pegajoso.

4.2.5 - Geologia Regional

A área de estudo está inserida geologicamente nos limites da Bacia Sedimentar do Paraná, entidade geológica com preenchimento sedimentar-magmático, situada no centro-leste da América do Sul, abrangendo uma área de cerca de 1.600.000 Km² (Figura 24). Deste total, cerca de 1.000.000 km² estão localizados em território brasileiro, distribuídos pelos estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás (Petri & Fúlfaro 1983).

Esta ampla sinéclise deve ser entendida como o produto de um complexo conjunto temporal formado por processos tectono-sedimentares atuantes durante o Fanerozóico. Tais processos, na área ocupada pela bacia, encontraram condições ora favoráveis ao empilhamento sedimentar, ora à não deposição ou à remoção erosiva de unidades anteriormente acumuladas (Milani, 1997).

Segundo Milani (*op. cit.*), a atual forma da Bacia do Paraná foi definida por fenômenos geotectônicos meso-cenozóicos do continente sul-americano que delinearão o atual contorno da bacia, com limite erosivo ao longo da maior parte de seu perímetro, totalizando aproximadamente 5.500 quilômetros.

No estado do Paraná, as rochas pertencentes à bacia apresentam inclinação homoclinal de cerca de 3^o em direção a oeste (calha do Rio Paraná), sua porção mais deprimida.



Figura 2 – Localização da Bacia Sedimentar do Paraná. Modificado de Petri & Fúlfaro (1983).

Segundo Petri & Fúlfaro (1983), as extensas deformações estruturais tais como arcos, flexuras, sinclinais e depressões, posicionadas ao longo das margens da bacia, são classificadas como arqueamentos marginais, arqueamentos interiores e embaciamentos. Os mesmos autores ressaltam a importância dos grandes alinhamentos estruturais, a maioria com direção NW/EW, os quais influenciaram, ao longo da história evolutiva da bacia, as áreas de maior subsidência e, conseqüentemente, de maior sedimentação. Estes alinhamentos influenciaram ainda o magmatismo que afetou a bacia

As principais estruturas tectônicas (falhas e fraturas) no estado do Paraná obedecem a duas direções principais. A mais proeminente possui direção NW (noroeste), sendo paralela ao eixo do Arco de Ponta Grossa. Possivelmente estas fraturas estão

relacionadas geneticamente com o desenvolvimento do referido arqueamento. A outra direção, norte/nordeste (N/NE), apesar de ser menos freqüente origina importantes feições geomorfológicas.

Na Figura 25 é apresentado o Mapa Geológico do Estado do Paraná com a distribuição das principais unidades litoestratigráficas.

A Bacia do Paraná sofreu com intenso vulcanismo fissural, constituindo ampla província magmática, definindo no Fanerozóico a maior manifestação ígnea não-oceânica e uma importante contribuição à geração da crosta ocidental do planeta. Esse evento traduziu-se na bacia, como uma espessa cobertura de lavas, uma intrcada rede de diques contando a completa seção sedimentar. Hoje, após 100 milhões de anos de retrabalhamento erosivo, ainda restam $\frac{3}{4}$ da área total da bacia recoberta pelas rochas ígneas da Formação Serra Geral, com área de aproximadamente 1.200.000 km² abrangendo os estados do centro-sul do Brasil, partes do Uruguai, Argentina e Paraguai, com uma espessura remanescente que se aproxima dos 2000 metros na região do Pontal do Paranapanema-SP (Milani, 1997).

A cidade de Londrina encontra-se assentada sobre a Formação Serra Geral (Figura 26). Tal formação pertence ao Grupo São Bento, o qual compreende ainda as formações Botucatu e Pirambóia, porém de ocorrência limitada no extremo sul do município, como observa-se na Figura 26. Nessa região também afloram rochas do Grupo Passa Dois, bem como as formações Teresina e Rio do Rasto, porém de forma muito restrita.

Como observado na Figura 26, os principais lineamentos estruturais presentes no município possuem orientação SW-NE.

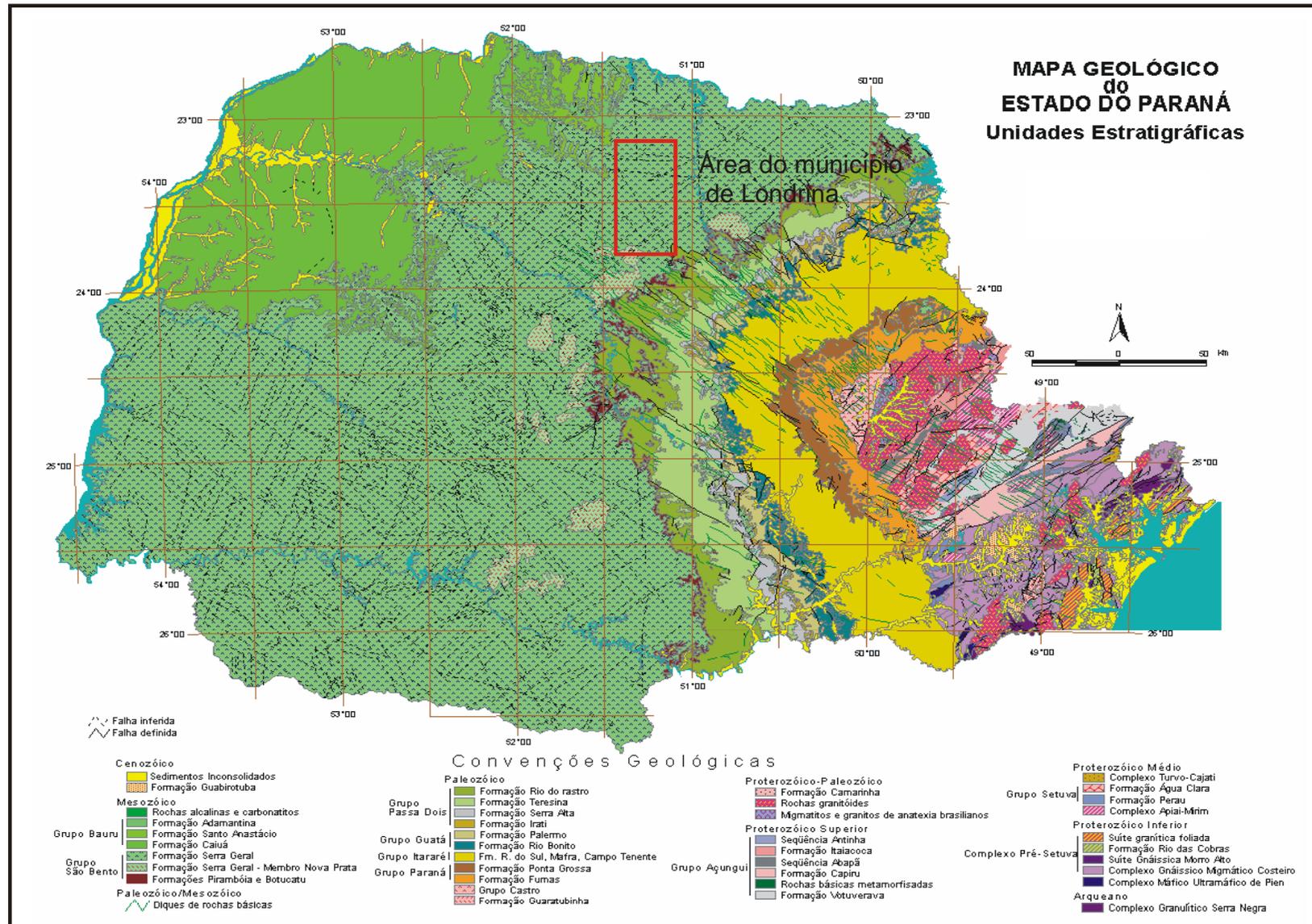


Figura 3 – Mapa Geológico do Paraná. Fonte MINEROPAR (2000)

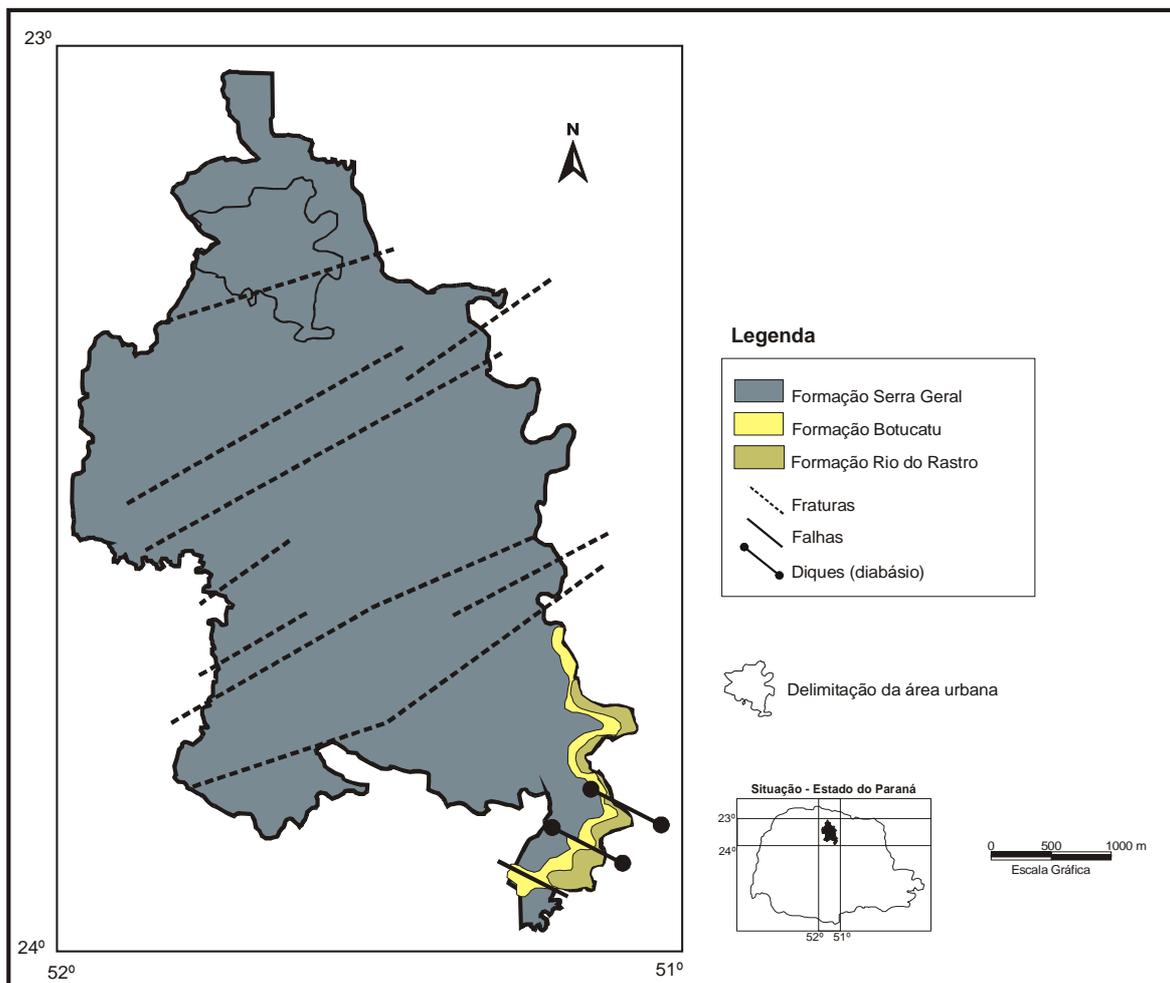


Figura 4 – Mapa geológico do município de Londrina. Modificado de MINEROPAR 2000.

A Formação Pirambóia, datada do período Triássico é constituída de arenitos finos e muito finos de coloração esbranquiçada, amarelada ou rosada, com estratificações cruzadas e acanaladas de pequeno a grande porte. O ambiente de deposição é predominantemente eólico e subordinadamente fluvial (Caetano Chang, 1997).

Sobrepondo-se discordantemente à Formação Pirambóia está a Formação Botucatu, de idade Juro-Cretáceo, representado por arenitos avermelhados e acastanhados, de granulação média a grossa, com alta concentração de quartzo. Petri e Fúlfaro (1983) chamam a atenção para a presença de estratificações

cruzadas de grande porte, com estratos de até 15 metros de altura, resultado da deposição em dunas eólicas.

A Formação Serra Geral, de maneira generalizada, é composta principalmente por rochas vulcânicas básicas (Figura 27), toleíticas e andesitos basálticos ocorrendo subordinadas quantidades de riolitos e riolitos, de textura afanítica, coloração cinza e negra. Os topos dos derrames é geralmente amigdaloidal, apresentando grande desenvolvimento de juntas verticais e horizontais com intrusões alcalinas e de pequenas lentes de arenito (Milani, 1997). Apresenta manto de intemperismo pouco espesso em algumas localidades e de até 30 metros nas regiões mais elevadas topograficamente.

A Figura 27 apresenta a ocorrência de matacões aflorantes na drenagem do ribeirão Lindóia. Esses afloramentos são freqüentes nos fundos de vale na área de estudo, uma vez que os rios transportam ou impedem a formação do manto de intemperismo ao longo de suas drenagens.



Figura 5 – Matacões de constituição basáltica de coloração cinza, presentes na drenagem do ribeirão Lindóia.

Segundo Leinz (1949), os sucessivos derrames presentes na Formação Serra Geral apresentam individualmente espessuras variando de decimétricas até cerca de 100 metros, mas com valores mais freqüentes variando entre 6 a 10 metros. No entanto, o critério utilizado para determinação dos derrames de lava é ainda discutível, levando-se em consideração que um único episódio de extravasamento pode ser resultado de derramamentos rápidos e sucessivos (Celligoi, 1993).

Quanto à idade, Milani (1997) levantou um conjunto de resultados que posiciona o evento Serra Geral entre 137 e 127 Ma, com as manifestações magmáticas mais antigas situadas no domínio noroeste da bacia e as mais jovens a sudeste, mostrando que houve a migração da fonte magmática de noroeste para sudeste da área.

Segundo Lastoria (2002), nos basaltos são comuns as fraturas de resfriamento, podendo até mesmo estabelecer-se uma certa “estratigrafia” de derrames basálticos com base nas fraturas encontradas. Assim, as fraturas horizontais predominam no topo e na base do derrame, enquanto as fraturas verticais dominam em sua parte central. Um outro tipo de fratura esperado é o fraturamento originado pelo alívio de carga. Conforme a erosão vai desgastando as rochas e retirando o solo, o peso sobre as rochas mais profundas vai diminuindo. As juntas que são geradas por este processo são abertas, o que facilita a percolação de líquidos.

4.5.2.1 - Aspectos da geologia local

Os basaltos estudados exibem coloração cinza esverdeada, rosada a ocre amarelada quando alteradas; textura afanítica e geralmente intenso padrão de acebolamento comumente próximo ao contato entre rocha e solo, formando os saprolitos (Figuras 28 e 29).

Segundo Pastore & Fontes (1998) o horizonte saprolítico ou saprolito é a transição entre o maciço de solo e o maciço rochoso. É composto basicamente por blocos ou camadas rochosas de vários estágios de alteração, com dimensões variáveis,

envolvidos por solo saprolítico. O solo tende a se desenvolver ao longo de descontinuidades remanescentes do maciço rochoso, onde a percolação da água é mais facilitada, e em zonas de rochas mais sensíveis a alteração. Os mesmos autores citam problemas em obras de engenharia relacionados a essa zona, como a dificuldade de identificá-los e por apresentarem comumente elevada permeabilidade hidráulica.



Figura 6 - Perfil de solo em transição com o saprolito (base) intensamente fraturado, de coloração cinza a ocre amarelada na rodovia que liga os municípios de Londrina e Ibiporã.



Figura 7 – Detalhe do afloramento de basalto alterado (acebolamento) de coloração ocre amarelada e intensamente fraturado (saprolito) na rodovia que liga os municípios de Londrina e Ibiporã.

Na área de estudo a análise de fotografias aéreas na escala 1:25000 revelou a presença de diversos lineamentos estruturais de falhas e/ou fraturas com o direcionamento principal NE-SW coadunando com o sentido principal das fraturas no município de Londrina (vide Figura 26). São notados ainda a presença de lineamentos com direções E-W, acompanhando trechos do ribeirão Lindóia e, sentidos NW e N, subordinados a drenagem dos seus afluentes (Figura 30).

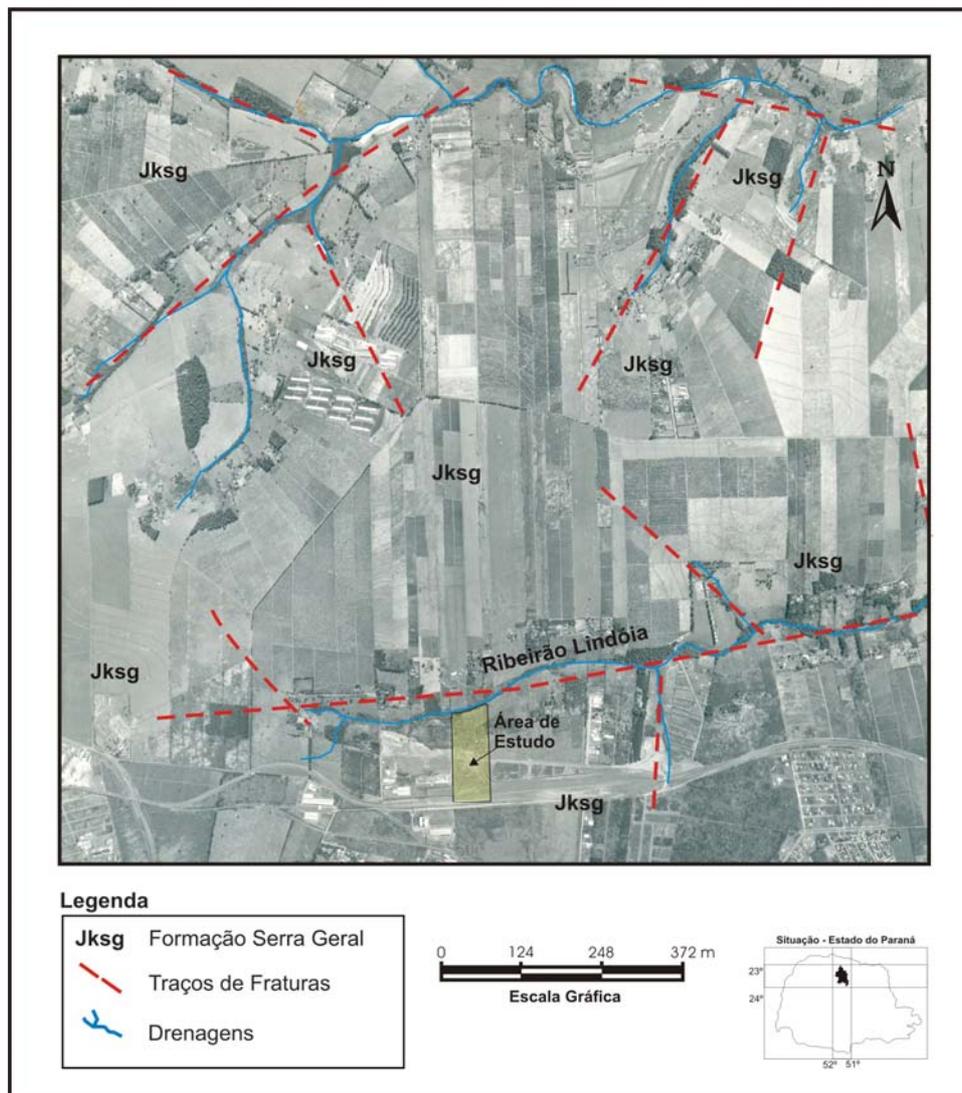


Figura 8 – Fotografia aérea de 1980, evidenciando os lineamentos estruturais.

Os levantamentos dos lineamentos estruturais da área de estudo são de extrema importância, pois as águas do aquífero freático alimentam o fluxo de base dos rios ou infiltram-se a maiores profundidades, alimentando a recarga do Aquífero Serra Geral em fraturas e/ou falhamentos.

Dessa forma, a recarga possibilita a migração de contaminantes pela zona de fraturamentos, prejudicando a qualidade das águas subterrâneas desse sistema aquífero, hoje muito explorado por poços tubulares na região dos domínios dos basaltos da Formação Serra Geral.

4.2.6 - Hidrogeologia

Segundo Celligoi *et al.* (2001), na área do município de Londrina existem duas formas principais de ocorrência de água subterrânea: o aquífero freático e o sistema aquífero Serra Geral. Além disso, o sistema aquífero citado, serve como camada confinante superior do aquífero Guarani, um dos principais reservatórios de água subterrânea na América Latina, mas ainda pouco explorado para o abastecimento hídrico no município de Londrina.

O aquífero freático, representado pelas camadas de solo e rocha alterada (saprolito), é produto direto do intemperismo das rochas vulcânicas basálticas. Dessa forma, esse aquífero constitui-se em um meio poroso relativamente homogêneo, geralmente pouco espesso próximo às drenagens e com baixa profundidade do nível saturado.

Este aquífero tem características essenciais de aquífero livre, ou não-confinado. Dessa forma, a recarga se dá diretamente a partir de águas pluviais nas áreas mais elevadas topograficamente, aumentando os riscos em relação à contaminação ou poluição das águas subterrâneas.

Ao contrário dos sistemas aquíferos porosos, os quais possuem uma certa continuidade física, o sistema Serra Geral, por suas características litológicas de rochas cristalinas, se constitui em um meio aquífero de condições hidrogeológicas heterogêneas e anisotrópicas (Freeze & Cherry, 1979).

Dessa forma, o modo de ocorrência da água subterrânea fica restrito às zonas de descontinuidade das rochas basálticas, principalmente em estruturas tectônicas do tipo fratura e/ou falhamentos (Figura 31).

Segundo Hausmann (1974 *apud* Lastoria 2002), a circulação de água nos basaltos é orientada pelo padrão de disjunção dessas rochas; em geral, são as juntas verticais que permitem uma circulação mais franca, pela ação da gravidade que por sua vez irá alimentar as diáclases horizontais.

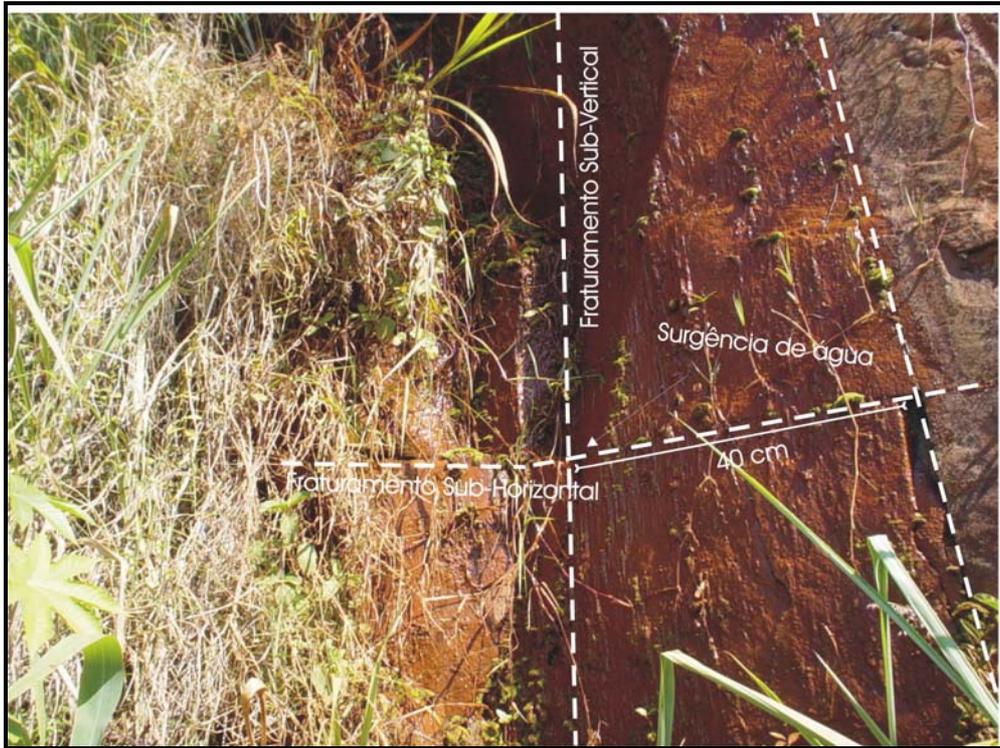


Figura 9 – Diáclases sub-verticais e sub-horizontais de pequeno porte com surgência de água na rodovia que liga os municípios de Londrina e Ibiporã.

CAPÍTULO 5 – AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL AQUÍFERA

Para a avaliação da vulnerabilidade natural à poluição e/ou a contaminantes do aquífero freático localizado em uma área no município de Londrina, utilizou-se o índice DRASTIC, anteriormente descrito. Recapitulando, para o cálculo do índice DRASTIC foram utilizados os seguintes parâmetros:

- ✓ Profundidade do lençol freático (D);
- ✓ Recarga do aquífero (R);
- ✓ Características do aquífero (A);
- ✓ Solos (S);
- ✓ Topografia (T);
- ✓ Impacto da zona-não saturada (I);
- ✓ Condutividade hidráulica (C).

Os valores para cada parâmetro foram definidos segundo os dados preexistentes obtidos do conjunto de poços de monitoramento instalados na área de estudo, além dos trabalhos de campo que envolveram, principalmente, ensaios de infiltrações *in situ* para determinação das condutividades hidráulicas na área de interesse.

Como se observa na Figura 32, ao todo foram cadastrados 30 poços de monitoramento na vertente direita da área de estudo à montante do ribeirão Lindóia, onde foram perfurados de acordo com os critérios técnicos estabelecidos pela ABNT (1987).

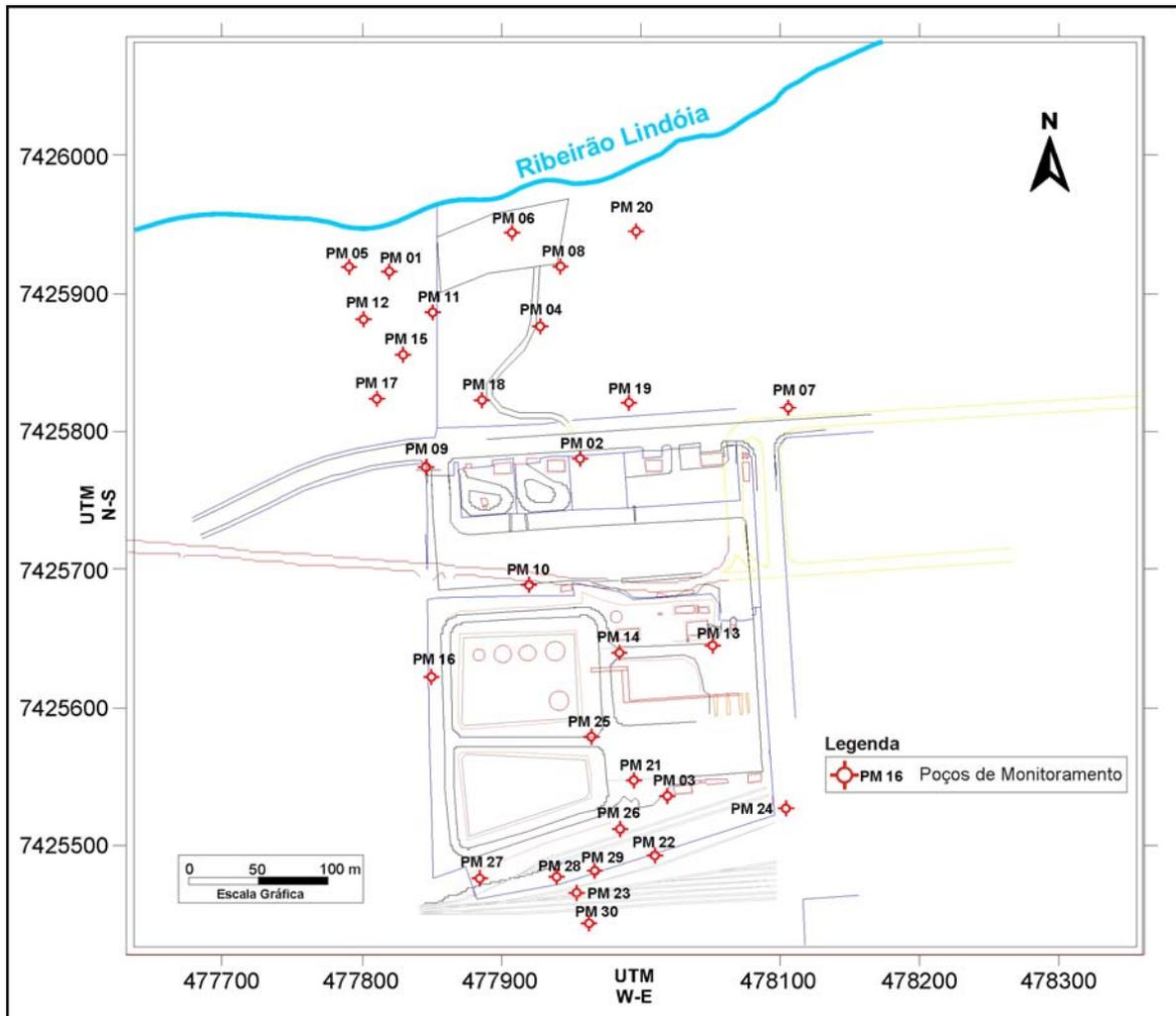


Figura 10 – Mapa de localização dos poços de monitoramento na área de estudo

5.1 - PROFUNDIDADE DO LENÇOL FREÁTICO (D)

A profundidade do lençol freático (D) define a distância vertical que um contaminante tem que atravessar para chegar ao aquífero. No aquífero livre, a profundidade é a distância ao nível freático. Quando maior a profundidade, menor a probabilidade de o contaminante chegar rapidamente ao aquífero. Dessa forma, a vulnerabilidade diminui com a profundidade.

Os valores dos parâmetros correspondentes ao nível d'água estão relacionados na Tabela 3, segundo *Aller et al.* (1987).

Tabela 1 – Classes de valores de pesos e índices de ponderação correspondentes à profundidade do nível d'água.

| Profundidade do Lençol Freático (D) | | |
|--|-----------------|-------------------|
| Profundidades (m) | Peso (p) | Índice (c) |
| < 1,5 | 5 | 10 |
| 1,5 – 5 | 5 | 9 |
| 5 – 10 | 5 | 7 |
| 10 - 15 | 5 | 5 |
| 15 - 23 | 5 | 3 |
| 23 - 30 | 5 | 2 |
| > 30 | 5 | 1 |

Fonte: *Aller et al.* (1987).

A profundidade do lençol freático foi determinada medindo-se os níveis de água dos poços de monitoramento, durante mês de maio de 2002, localizados na vertente direita do ribeirão Lindóia (vide Figura 32) e compilados na Tabela 4.

O valor relativo à profundidade do nível d'água variou de uma profundidade mínima de 3,32 metros, próximo à drenagem do ribeirão Lindóia, a 24,12 metros de profundidade nas cotas mais elevadas topograficamente. Tal variação coaduna-se com as características locais de aquífero livre, pois o lençol freático local aproxima-se da superfície à medida que se direciona à drenagem do ribeirão Lindóia (Figura 33).

A profundidade média da área de estudo, no período em que foram tomadas as medições, estava em aproximadamente 13 metros, o que caracteriza um grau de

vulnerabilidade mediana. No entanto, foi traçado um conjunto de isolinhas de profundidade do lençol freático segundo os intervalos das classes de valores adotados na Tabela 3; a partir daí foi construído um mapa local para tal característica (Figura 34).

Tabela 2 – Relação dos poços de monitoramento e seus respectivos níveis d'água.

| Poços de Monitoramento (PM) | | | | | | | |
|------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | PM-01 | PM-02 | PM-03 | PM-04 | PM-05 | PM-06 | PM-07 |
| Nível D'água (NA) | 3,94 | 17,84 | 13,24 | 12,48 | 3,78 | 5,74 | 16,16 |
| | PM-08 | PM-09 | PM-10 | PM-11 | PM-12 | PM-13 | PM-14 |
| Nível D'água (NA) | 10,01 | 20,04 | 16,71 | 8,14 | 7,71 | 20,55 | 21,55 |
| | PM-15 | PM-16 | PM-17 | PM-18 | PM-19 | PM-20 | PM-21 |
| Nível D'água (NA) | 11,09 | 24,55 | 14,85 | 16,39 | 17,33 | 8,03 | 13,54 |
| | PM-22 | PM-23 | PM-24 | PM-25 | PM-26 | PM-27 | PM-28 |
| Nível D'água (NA) | 11,75 | 11,95 | 13,31 | 15,69 | 13,33 | 13,15 | 11,98 |
| | PM-29 | PM-30 | | | | | |
| Nível D'água (NA) | 11,47 | 11,15 | | | | | |

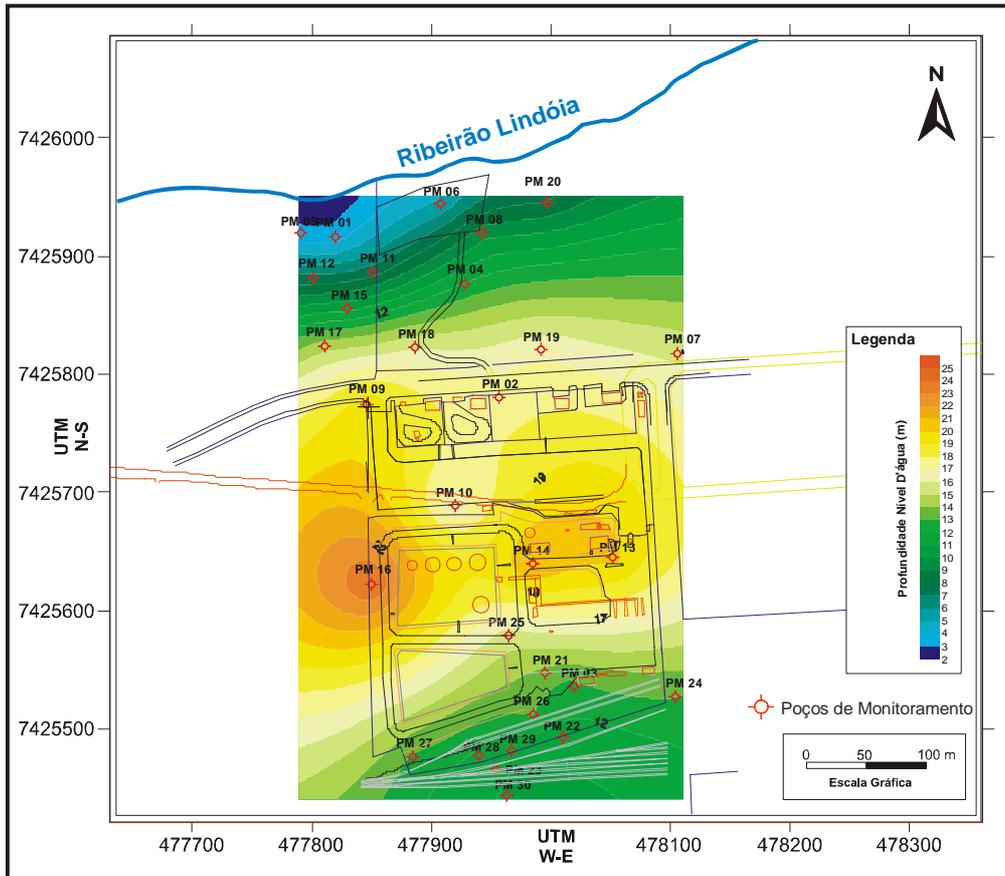


Figura 11 – Mapa de profundidade do Lençol Freático (NA).

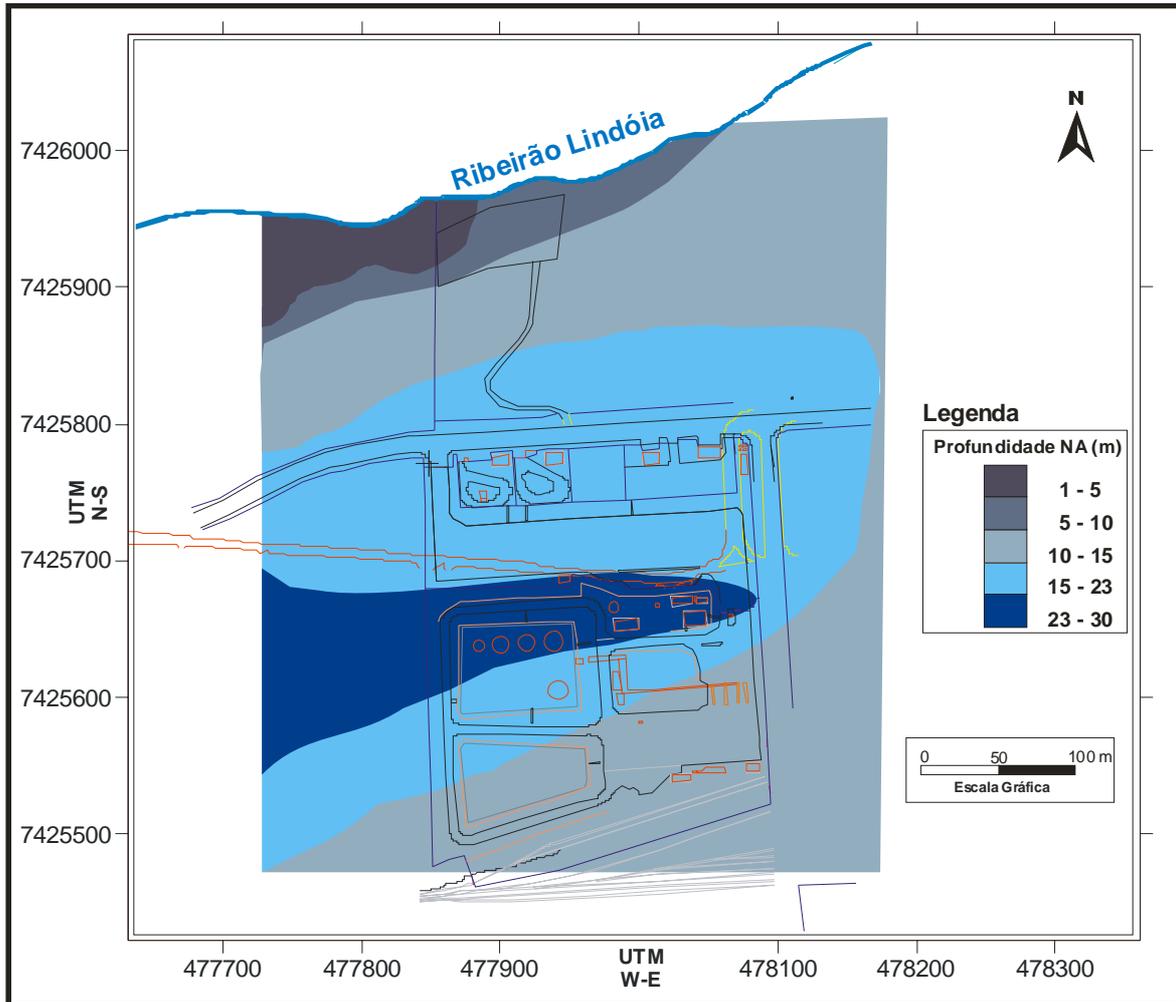


Figura 12 – Profundidade do lençol freático segundo os intervalos de classes de profundidade (vide Tabela 3).

5.2 - RECARGA DO AQÜÍFERO (R)

A recarga (R) representa a quantidade de água que chega anualmente ao aquífero através da precipitação, configurando-se em um dos parâmetros mais importantes para a avaliação da vulnerabilidade natural de um aquífero. Considera-se que uma recarga elevada aumenta a lixiviação dos contaminantes para o aquífero e assim aumentando sua vulnerabilidade. A Tabela 5 apresenta valores para cada classe de volume de recarga que infiltra em uma dada região anualmente.

Tabela 3 – Classes de recarga e valores correspondentes aos pesos e índices de ponderação.

| Recarga (R) | | |
|--------------|----------|------------|
| Recarga (mm) | Peso (p) | Índice (c) |
| 0 - 50 | 4 | 1 |
| 50 - 100 | 4 | 3 |
| 100 - 180 | 4 | 6 |
| 180 - 255 | 4 | 8 |
| > 255 | 4 | 9 |

Fonte: Aller *et al.* (1987).

A partir desse contexto, optou-se pela realização de um balanço hídrico regional, pois a quantidade de precipitação e a temperatura durante o ano ocorrem de forma irregular, influenciando diretamente o comportamento do nível freático local, pois o mesmo está associado ao volume de infiltração.

Nesse sentido, o balanço hídrico na área em estudo tem por finalidade principal a compreensão dos ganhos e perdas constantes no ciclo hidrológico.

Como citado anteriormente, o método utilizado para o cálculo do balanço hídrico regional foi o Thornthwaite & Mather (1955), o qual se baseia em dois elementos climáticos: a precipitação pluviométrica e a evapotranspiração potencial.

Segundo Velásquez (1996) este método, adaptado para as condições climatológicas brasileiras, tem sido amplamente aplicado, visto sua viabilidade perante a disponibilidade de dados (vide p. 59).

5.2.1 - Balanço Hídrico

O primeiro passo para obtenção do balanço hídrico regional foi a análise dos dados pluviométricos e de temperatura de uma série histórica entre os anos de 1993 a 2001, obtidos junto ao IAPAR (Instituto Agrônomo do Paraná), referentes à estação de Londrina. Além disso, a análise apresentada é própria para confirmação das características climáticas regionais, conforme descreve Nimer (1989) para o norte paranaense (vide pág. 58).

As Figuras 35, 36 e 37 evidenciam excedente hídrico para quase todos os meses do ano, apresentando um pequeno déficit no mês de agosto, quando os valores médios de evapotranspiração potencial superam ligeiramente os de precipitação pluviométrica.

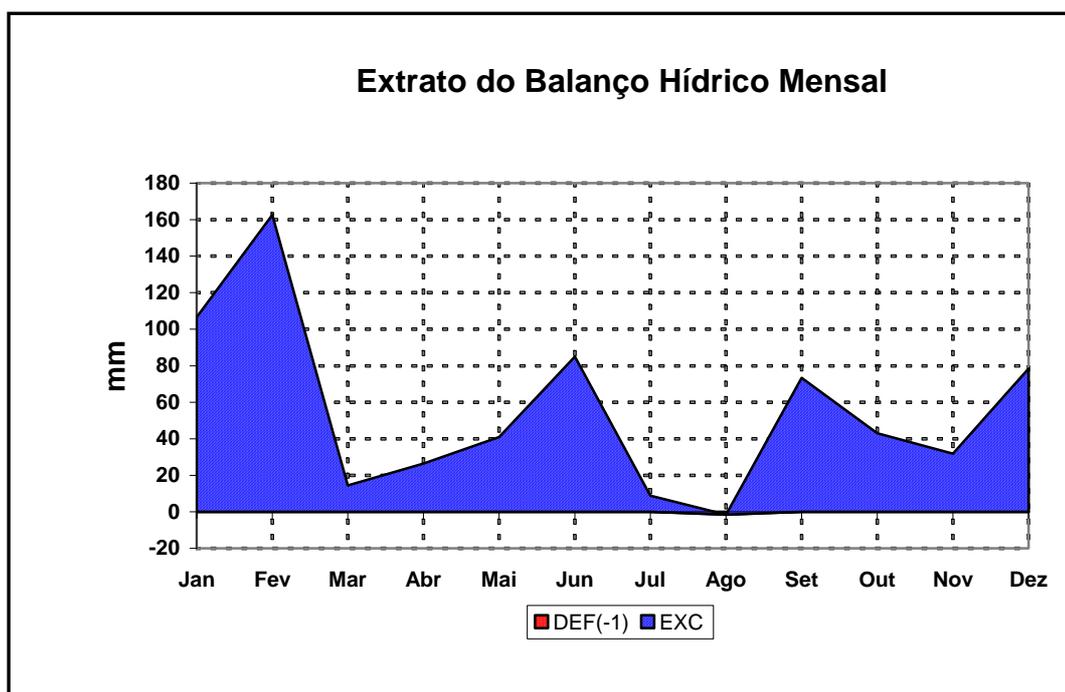


Figura 1 – Gráfico exibindo o extrato do balanço hídrico médio mensal entre 1993 e 2001.

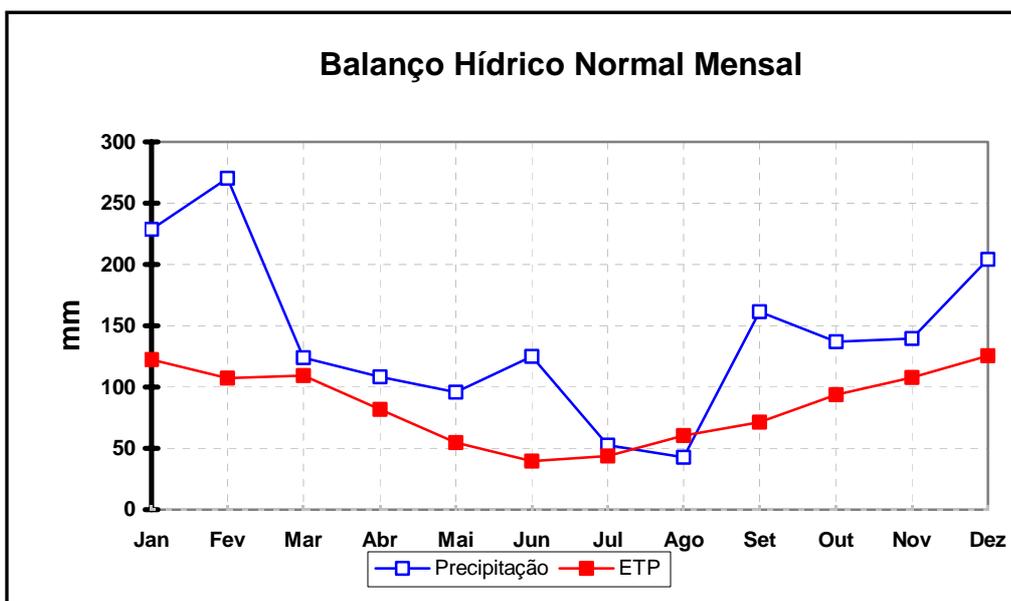


Figura 2 – Gráfico exibindo distribuição de precipitação, dos valores médios mensais de temperatura e evapotranspiração potencial (ETP) no período entre 1993 a 2001.

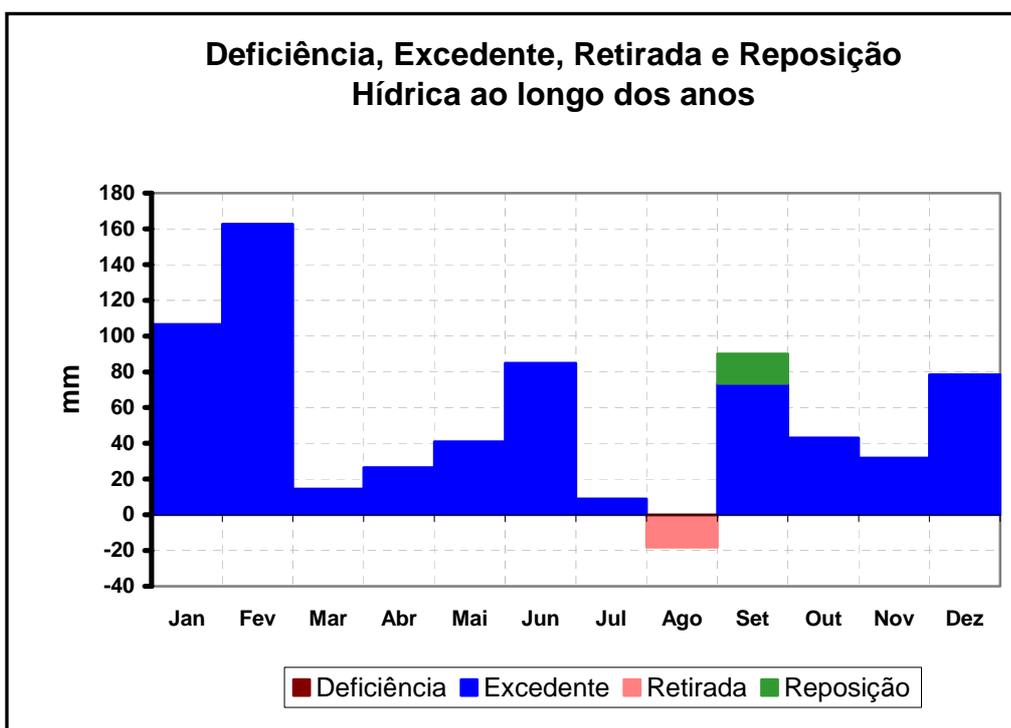


Figura 3 – Gráfico de deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica médio mensal para os anos de 1993 a 2001.

Dessa forma, com base na amostragem dos dados referente ao balanço hídrico regional entre 1993 e 2001, pode-se afirmar que o aquífero freático, localizado na vertente esquerda do ribeirão Lindóia, recebe em geral recargas distribuídas durante

todos os períodos dos anos, exceto em um período, correspondente ao mês agosto onde se verifica uma pequena retirada hídrica. O excedente hídrico calculado, segundo o método proposto por Thornthwaite & Mather (1955), foi de 670,13 mm/anuais para o período amostrado.

A parcela que se infiltra deste total, favorece a migração de contaminantes e/ou poluentes pela zona não-saturada, podendo assim atingir o aquífero.

5.2.2 - Recarga Anual

Os dados referentes à recarga anual foram obtidos a partir do trabalho de Celligoi & Vianna (2002) para o sistema aquífero Serra Geral na região de Londrina. Os autores utilizaram para o cálculo da recarga o método da curva de recessão de um rio. O termo recessão refere-se ao declínio da descarga natural de uma drenagem na ausência de entrada por precipitação, e é regida por leis de decaimento exponencial, conforme a equação (Rosa Filho, 1993):

$$Q = Q_0 e^{-kt} \quad (13)$$

Então:

$$V_0 = \frac{Q_0 \cdot 86400}{\alpha} \quad (14)$$

Onde, Q_0 representa a descarga do Ribeirão Cafezal no início da recessão (m^3/s); Q = a descarga (m^3/s) do Ribeirão Cafezal após um período t (dias); α = constante de recessão; e V_0 o volume total infiltrado na área da bacia contribuinte do Ribeirão Cafezal.

Segundo Celligoi & Vianna (*op. cit.*), o critério para a escolha do período de recessão do ribeirão Cafezal baseou-se nas características da curva de recessão do mesmo. O gráfico de vazão do ribeirão para o ano de 1996, mostrou uma curva de

recessão enfática, com os períodos inicial e final da recessão bastante evidentes (Figura 38). A queda da curva de recessão representa uma diminuição das águas pluviais na formação do fluxo de base do ribeirão, resultando na diminuição da vazão do mesmo.

O volume total infiltrado na área, V_0 , corresponde a $28,992 \times 10^6 \text{ m}^3$. Sabendo que a área da bacia do ribeirão Cafezal (A) demarcada pelos autores atinge $150 \times 10^6 \text{ m}^2$, pode-se, a partir daí, calcular a altura média da água (H) destinada à recarga do sistema aquífero:

$$H = \frac{V_0}{A} \quad (15)$$

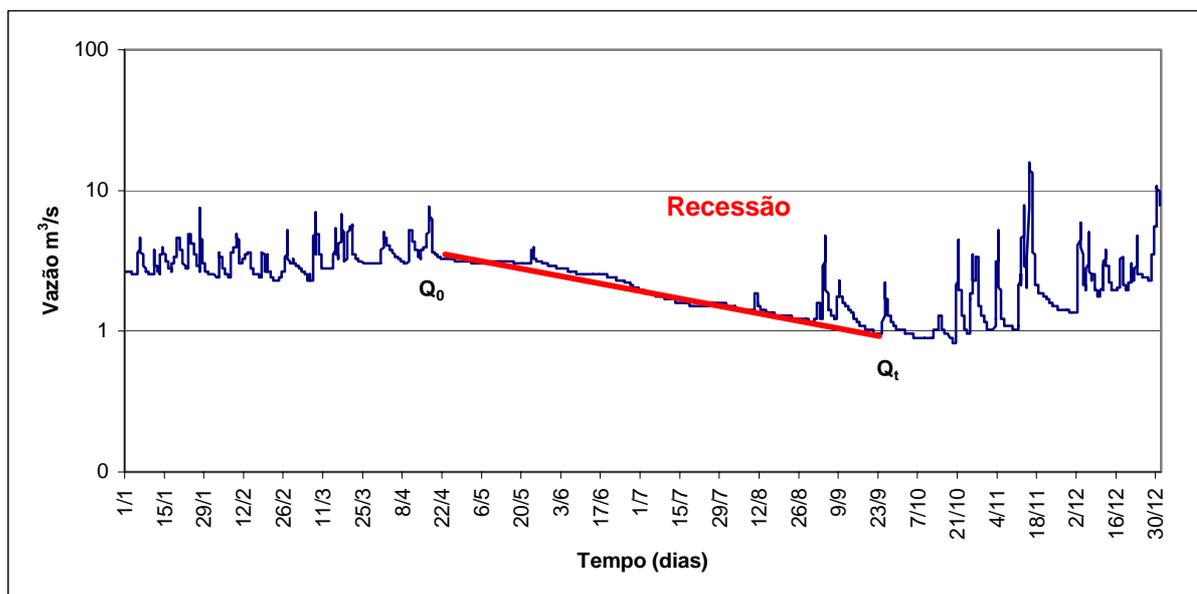


Figura 4 - Gráfico da vazão do ribeirão Cafezal evidenciando o período de recessão.

Com base no cálculo da curva de recessão, a altura média da água infiltrada ou o que é disponível anualmente pela precipitação como recarga do aquífero freático é de aproximadamente 0,193 metros, ou 193 milímetros (Celligoi & Vianna, 2002). Com um total da média pluviométrica de 1.399,4 mm (1996), pode-se verificar que

aproximadamente 13,5% do total das chuvas foram destinadas à recarga do aquífero, ou equivalente a 28,8% da parcela do excedente hídrico médio anual.

O valor da recarga encontrado é relativamente alto, baseando-se nos valores para as classes de recarga (vide Tabela 5), mas coaduna-se com o balanço hídrico verificado para o município de Londrina, o que determina para a área de estudo um índice igual a 8 para o parâmetro (R).

Para obtenção desse índice, foram utilizados valores de recarga atribuídos à bacia do ribeirão Cafezal (vide Figura 20), cuja área localiza-se no perímetro urbano de Londrina, uma vez que não existiam dados fluviométricos atribuído ao ribeirão Lindóia. Por isso, os resultados encontrados por esses autores para a recarga regional foram reproduzidos para a área de estudo, uma vez que a região como um todo apresenta certa homogeneidade físico natural. Essa homogeneidade é representada principalmente pela geologia constante e a semelhança das características dos solos predominantes.

Além disso, a recarga do aquífero freático que recobre as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral se processa essencialmente pela infiltração das águas de chuva. Assim que as águas pluviais atingem a superfície do terreno, uma parte volta-se ao escoamento superficial, uma outra retorna à atmosfera via evaporação e ainda uma outra parcela se infiltra no solo, percolando as rochas até atingir as áreas mais baixas, contribuindo para o escoamento de base.

O ano utilizado como base para a realização dos cálculos foi o de 1996, porém, os resultados podem ser estendidos, uma vez que se verificaram excedentes hídricos para todos os anos amostrados (670,13 mm) (1993 a 2001).

5.3 – MATERIAL DO AQUIFERO (A)

A importância do material do aquífero (A) baseia-se, sobretudo, em sua capacidade de atenuar os efeitos dos poluentes. Para além desse efeito principal, o material do aquífero condiciona o fluxo da água subterrânea que, em conjunto com a condutividade hidráulica e o gradiente hidráulico, determinam o tempo disponível para a ocorrência dos processos de atenuação (Oliveira & Lobo Ferreira, 2004).

As propriedades relacionadas às densidades de fraturas do material do aquífero são imprescindíveis para esse parâmetro, pois quanto maior a densidade de diáclases, maior o grau de vulnerabilidade do aquífero devido, teoricamente, ao aumento de velocidade do fluido na zona saturada e, portanto, menor é o tempo de ação dos processos atenuadores sobre os contaminantes.

Dessa forma, com base nas informações das amostras recuperadas dos poços de monitoramento, foram construídas duas seções litofaciológicas para melhor averiguação dos materiais que compõem o aquífero freático na área de estudo (Figuras 40 e 41). A localização em planta das seções A-B e C-D podem ser observadas na Figura 39.

Aller *et al.* (1987) consideram os seguintes materiais de aquíferos com importância para a atenuação do potencial de poluição (Tabela 6).

Tabela 1 - Descrição do material do aquífero e seus respectivos pesos e índices de ponderação.

| Material do Aquífero (A) | | |
|---|----------------------------|-------------------|
| Descrição | Pesos Relativos (p) | Índice (c) |
| Folhelho argiloso, argilito | 3 | 1-3 (2) |
| Rocha metamórfica/ígnea | 3 | 2-5 (3) |
| Rocha metamórfica/Ígnea alterada | 3 | 3-5 (4) |
| Arenito, calcário e argilito estratificados | 3 | 5-9 (6) |
| Arenito maciço | 3 | 4-9 (6) |
| Calcário maciço | 3 | 4-9 (6) |
| Areia | 3 | 4-9 (8) |
| Basalto | 3 | 2-10 (9) |
| Calcário carsificado | 3 | 9-10 (10) |

Fonte: Aller *et al.* (1987).

Na Tabela 6 são apresentados os intervalos de índices de ponderação para cada material que compõem aquíferos. Entre parêntesis está o índice típico a atribuir caso não existam maiores informações sobre o material. Estes intervalos devem ser utilizados com base em informações específicas sobre o material estudado.

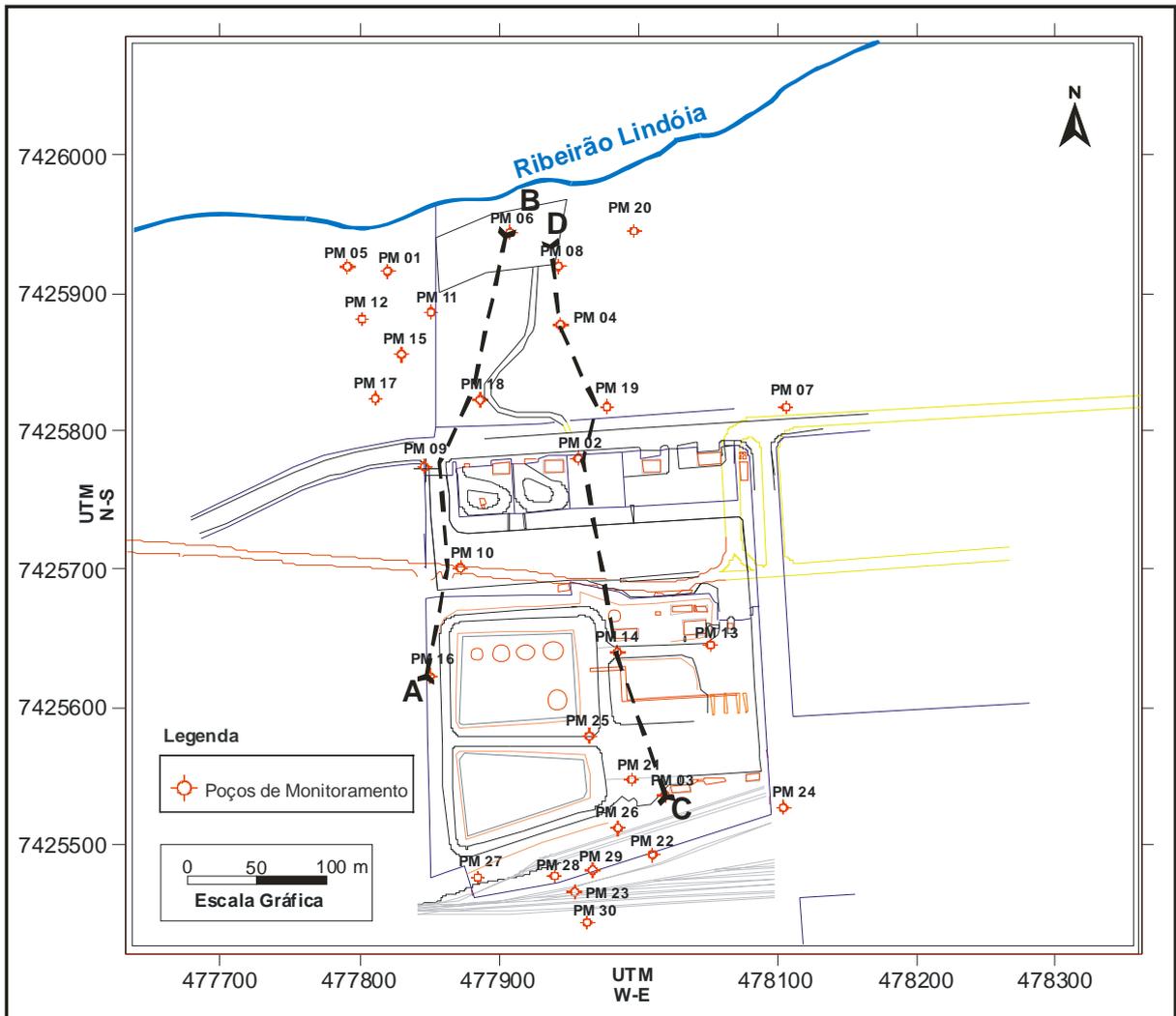


Figura 5 – Mapa de localização das seções litofaciológicas.

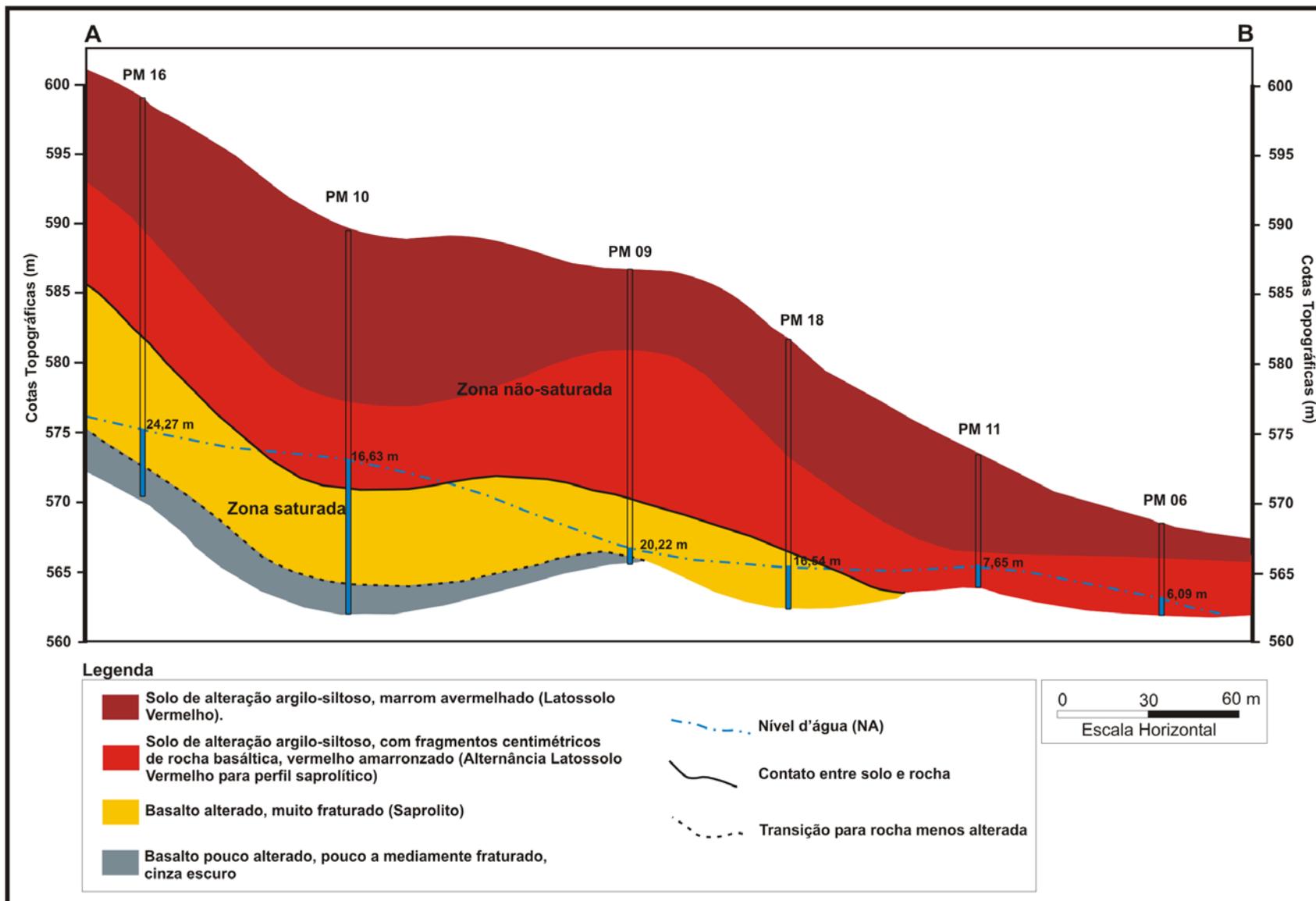


Figura 6 - Seção litofaciológica A-B referente a área de estudo.

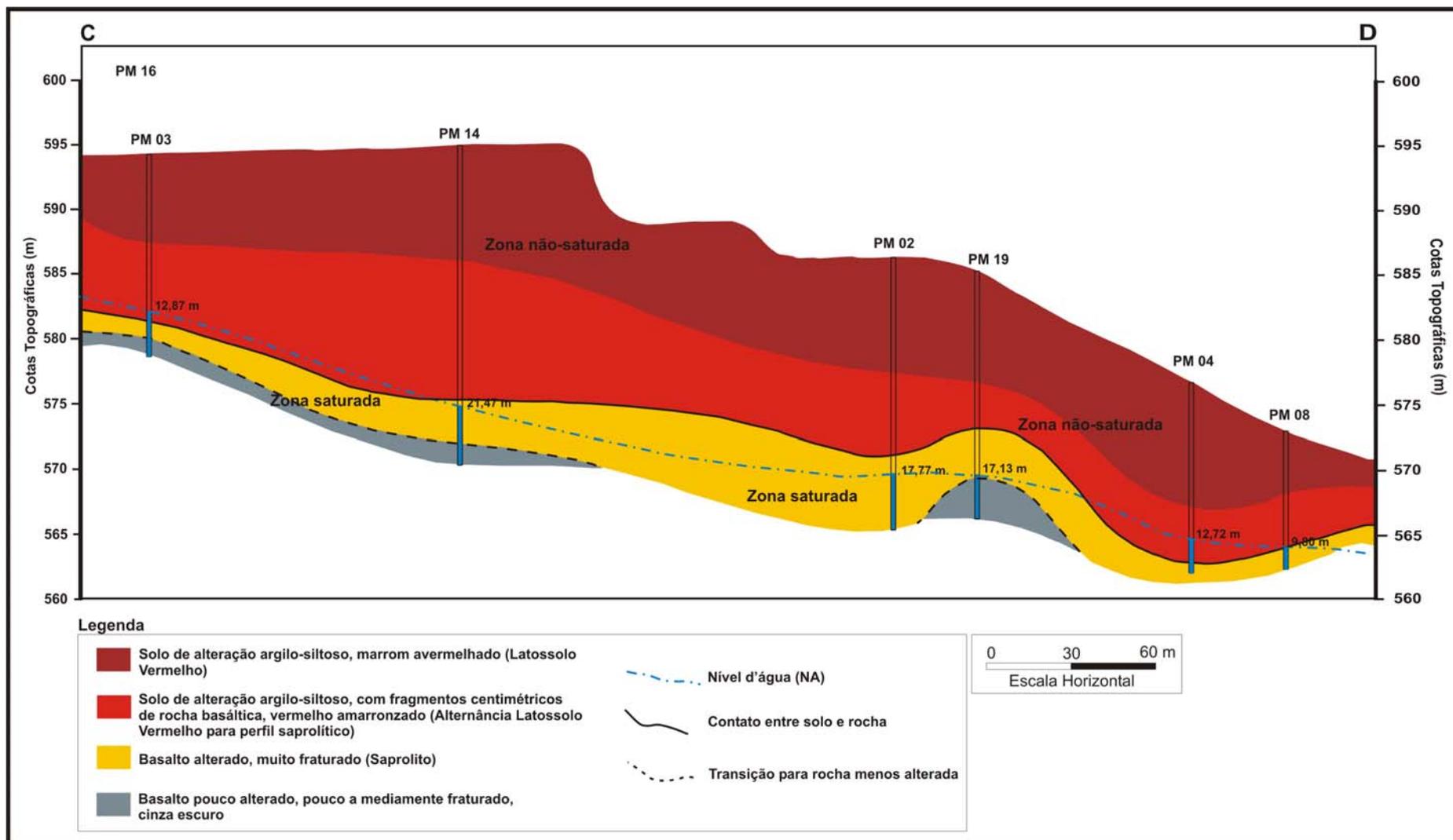


Figura 7 - Seção litofaciológica C-D referente a área de estudo..

Como observado na seção A-B (Figura 40), na zona saturada os PMs 16, 10, 09 e 18 atingiram a rocha basáltica alterada (saprolito), muito fraturada, sendo que as três primeiras sondagens onde foram instalados os poços ultrapassaram essa zona de descontinuidades atingindo o basalto pouco alterado a sã. Na seção C-D (Figura 41), as amostras recuperadas através das sondagens indicaram que todos os poços atingiram ou ultrapassaram o saprolito até atingir a rocha sã ou mediamente fraturada.

Essas características geológicas, especialmente as camadas de saprolito, serão discutidas mais detalhadamente no capítulo 6, destacando principalmente os testes de *slug* realizados em meio saturado, pois a presença de fraturamentos, sobretudo sub-verticais e sub-horizontais existentes nessa zona, afeta o deslocamento horizontal da água no aquífero freático local e, por conseguinte, a pluma de poluição, admitindo-se sua existência no meio.

As informações específicas do material do aquífero na área de estudo, evidenciam que a zona saturada ocorre principalmente em basaltos altamente fraturados, que minimizam a atenuação natural de contaminantes. No entanto, é necessário destacar que nessa zona ocorrem ainda materiais constituídos ora pela rocha sã mediamente fraturada, ora por materiais altamente alterados provindos da mesma rocha, como visto nas sondagens 10, 11 e 6 na seção A-B (Figura 40). Com base nessas informações e na Tabela 6, para o material do aquífero, cujo peso é igual a 3, o índice de ponderação atribuído a esse parâmetro para estimação da vulnerabilidade será igual a 8, uma vez que se constatou a existência (em menor proporção) de materiais que beneficiam a atenuação de contaminantes, devido à maior retenção do fluido.

Por esse motivo não foi atribuído o índice típico, pois se fossem considerados apenas os basaltos altamente fraturados, provavelmente o índice seria igual a 10, dado a transmissividade da água nessa zona.

5.4 - TIPO DE SOLO (S)

O tipo de solo influencia diretamente no deslocamento vertical de um contaminante, pois à medida que o percolado infiltra-se nos solos, estes atuam como um dos principais agentes atenuadores de áreas impactadas. Assim, quanto maior sua espessura e mais fina sua textura, maior proteção os solos garantem ao aquífero.

Como mencionado no capítulo 4, os tipos de solos predominantes na área de estudo são o Latossolo Vermelho e o Nitossolo, ambos provenientes do intemperismo das rochas basálticas, com textura muito argilosa (superior a 60%).

Análises granulométricas destacam ainda a presença de quantidades expressivas de silte e areia, com predominância de fração argila, em perfis pedológicos de Latossolos originados da decomposição de basaltos, como os encontrados por Santos (2003) em dois perfis analisados no município de Rolândia, no estado do Paraná (vide Figura 1) (Tabela 7). Essas concentrações, segundo a classificação textural americana (Figura 42), indicam textura argilosa para o tipo de solo da região amostrada.

As porosidades efetivas dessas amostras são também apresentadas na Tabela 7.

Tabela 2 - Concentrações de silte, argila e areia e valores de porosidade efetiva presentes em latossolos do município de Rolândia.

| Amostras | Argila (%) | Silte (%) | Areia (%) | Porosidade Efetiva (%) |
|-----------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|
| 1 | 54 | 25 | 21 | 9,6 |
| 2 | 58 | 25 | 17 | 8,8 |
| Média | 56 | 25 | 19 | 9,2 |

Fonte: Santos, 2003.

Segundo Santos (1975), a capacidade de adsorção e troca catiônica dos minerais de argila é consequência do desequilíbrio das cargas elétricas determinadas pela substituição isomórfica no próprio reticulado cristalino, por ligações químicas quebradas nas arestas das partículas e pela substituição de hidrogênio por hidroxilas. Os argilominerais possuem a capacidade de adsorver determinados cátions e ânions, além de poder trocar esses íons. Tais propriedades geralmente ocorrem em solução aquosa. A capacidade de troca catiônica é uma propriedade importante dos argilominerais, pois íons permutáveis influem poderosamente nas propriedades macroscópicas das argilas. Quanto menor for o grão de argila, e dependendo de sua constituição mineralógica, maior será a capacidade de troca iônica, devido à maior área superficial disponível por unidade de volume.

A Tabela 8 destaca valores para a estimação do índice DRASTIC para texturas predominantes e tipos de solos (Aller *et al.* 1987).

Tabela 3 – Tipos de solos e seus respectivos pesos e índices de ponderação.

| Tipos de Solos (S) | | |
|--------------------------------|----------------------------|-------------------|
| Descrição | Pesos Relativos (p) | Índice (c) |
| Fino ou ausente | 2 | 10 |
| Saibro | 2 | 10 |
| Areia | 2 | 9 |
| Turfa | 2 | 8 |
| Argila expansiva e/ou agregada | 2 | 7 |
| Franco arenoso | 2 | 6 |
| Franco siltoso | 2 | 4 |
| Franco argiloso | 2 | 3 |

| | | |
|--------------------------------------|---|---|
| Calcário | 2 | 2 |
| Argila não agregada e não expansível | 2 | 1 |

Fonte: Aller *et al.* (1987).

O solo encontrado na área de estudo apresenta grandes espessuras nas porções mais elevadas topograficamente, sendo constituído de textura predominantemente argilosa. Dessa forma, o coeficiente que melhor representa a realidade local com base nos tipos de solos (Tabela 9), é o índice de ponderação igual a 3 ou equivalente a franco argiloso.

5.5 – TOPOGRAFIA (T)

A topografia (T) define as declividades do terreno que, quanto mais elevadas maiores são a erosão do solo e o escoamento superficial da água, inibindo a infiltração e, por sua vez, a diminuição da lixiviação dos contaminantes caso existam. Dependendo da intensidade do escoamento e da cobertura vegetal da área, pode-se ter como resultado alguns processos erosivos, como sulcos, ravinas, voçorocas, entre outros.

As declividades também influenciam na formação dos solos, pois quanto mais acentuado for o declive, maior será o escoamento superficial em detrimento da infiltração. Conseqüentemente, ocorrerá o transporte de maior quantidade de material intemperizado e a pouca infiltração reduzirá a alteração dos materiais pedológicos, gerando solos pouco espessos.

Os valores dos parâmetros correspondentes às classes de declividade para a determinação do índice DRASTIC estão relacionados na Tabela 9.

Tabela 4 – Classes de valores de declividade e seus respectivos pesos e índices de ponderação.

Topografía (T)

| Declividade (%) | Pesos Relativos (p) | Índice (c) |
|------------------------|----------------------------|-------------------|
| < 2 | 1 | 10 |
| 2 - 6 | 1 | 9 |
| 6 - 12 | 1 | 5 |
| 12 - 18 | 1 | 3 |
| > 18 | 1 | 1 |

Fonte: Aller *et al.* (1987).

Como visto no Capítulo 4, a região de estudo possui relevo suave a suavemente ondulado, com vertentes longas e com baixa declividade.

Contudo, visando uma melhor estimativa para o índice DRASTIC, foi realizada uma análise topográfica pormenorizada da vertente do ribeirão Lindóia, na área de estudo. Para a determinação da declividade utilizou-se de base topográfica com cotas altimétricas. A partir daí os valores foram compilados e inseridos no software *Arcview* para geração do mapa de declividade local (Figura 43).

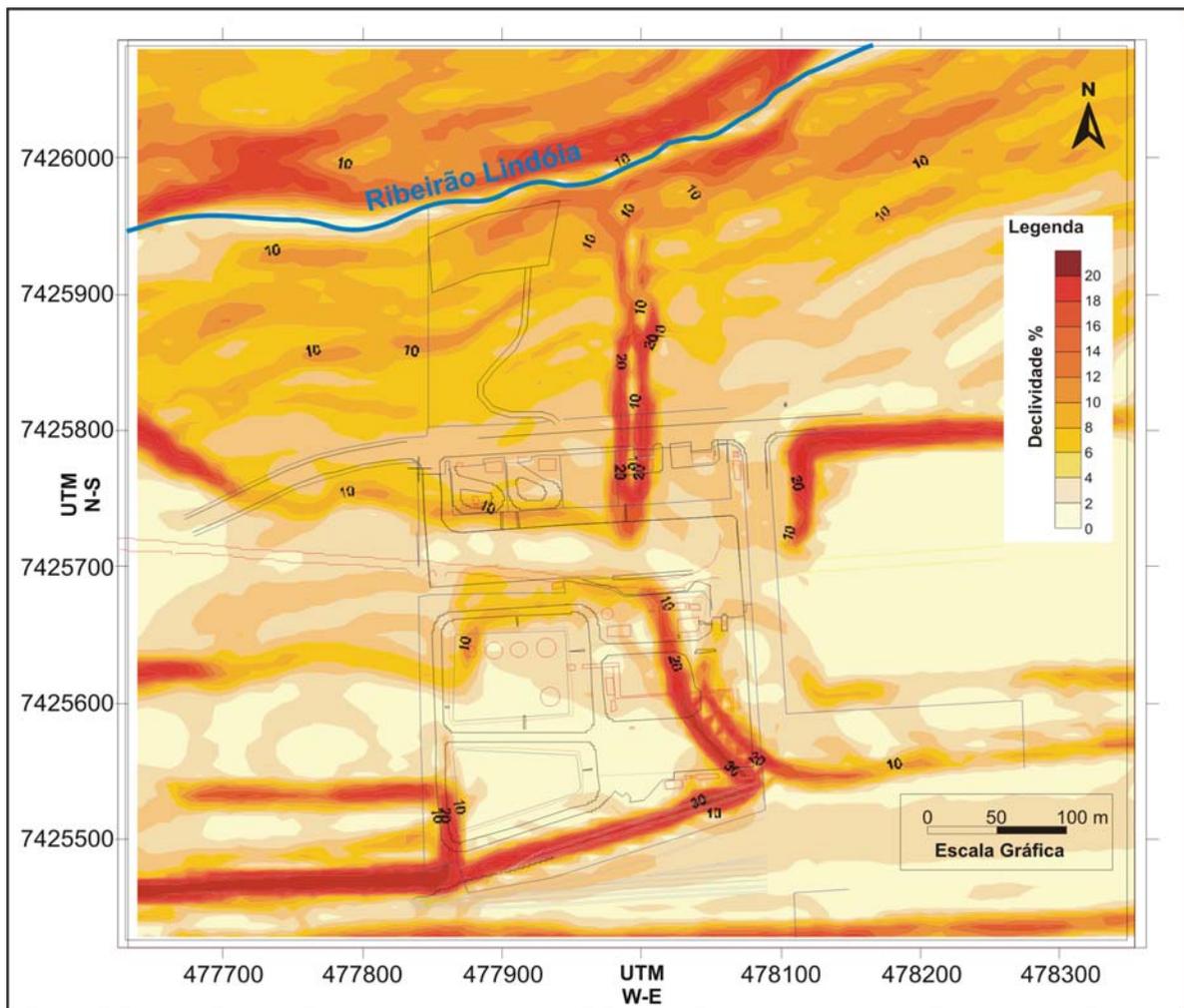


Figura 9 – Mapa de declividades referente à área de estudo.

Conforme a Figura 43, as declividades da bacia são mais amenas próximas aos topos e divisores de água (entre 0 a 10%) e mais acentuadas próximo aos fundos de vales, variando entre 10, 20 e até 30% em alguns locais. Variações maiores são notadas nos locais que margeiam o ribeirão Lindóia e um dos seus ravinamentos no sentido N-S, que atingem declividades de até 20%.

Em geral, as variações de declividade oscilam de 0 a 6% nos fundos de vales e até 12% nas porções inferiores das encostas; já nos topos, a declividade varia entre 0 a 12%, porém com um grande predomínio de baixas declividades (0 a 2%), o que se traduz em favorecimento da infiltração da água, confirmando, que as

áreas mais elevadas topograficamente são as mais favoráveis à recarga pluviométrica.

5.6 - IMPACTO DA ZONA NÃO-SATURADA (I)

O impacto da zona não saturada (I) está relacionado ao tipo de material que a compõe. Esse condicionante afeta o tempo de contato do poluente com o meio subterrâneo, permitindo a ocorrência de diversos processos naturais: biodegradação, neutralização, reações químicas, volatilização e dispersão.

Dessa forma, para melhor contextualização do comportamento do material que compõem a zona não-saturada, foram realizados 17 ensaios de condutividade hidráulica *in situ* utilizando o permeâmetro *Guelph*, localizados na Figura 43. Tais ensaios possibilitaram o cálculo dos valores condutividade hidráulica (K) que conduziram, por sua vez, ao cálculo da permeabilidade intrínseca do aquífero conforme Fetter (1988) (vide equação 11 p. 42).

Nenhuma outra referência bibliográfica indica a utilização de ensaios de infiltração que objetivam auxiliar à caracterização da zona não-saturada de aquíferos para análise de vulnerabilidade. Assim, esses ensaios realizados no presente estudo podem ser considerados uma inovação perante o escopo do trabalho, uma vez que cada material possui propriedades que respondem diferentemente ao processo natural de infiltração.

Concomitante à análise dos resultados de permeabilidade intrínseca, foram levados em consideração os perfis descritivos dos poços de monitoramento relacionados nas Figuras 40 e 41, com a finalidade de auxiliar na atribuição do índice relativo à esse parâmetro.

Aller *et al.* (1987) consideram os materiais da zona não-saturada listados na Tabela 10, com importância para a atenuação do potencial de poluição ou contaminação do aquífero.

Tabela 5 - Valores correspondentes aos pesos e índices de ponderação para os materiais que compõem a zona não-saturada.

| Impacto da Zona Não Saturada | | |
|--|----------------------------|-------------------|
| Descrição | Pesos Relativos (p) | Índice (c) |
| Camada confinante | 5 | 1 |
| Argila/Silte | 5 | 2-6 (3) |
| Folhelho argiloso, argilito | 5 | 3-5 (3) |
| Calcário | 5 | 2-7 (6) |
| Arenito | 5 | 4-8 (6) |
| Arenito, calcário e argilito estratificado | 5 | 4-8 (6) |
| Rocha metamórfica e ígnea intrusiva | 5 | 2-8 (4) |
| Basalto | 5 | 2-10 (9) |
| Calcário carsificado | 5 | 9-10 (10) |

Fonte: Aller *et al.* (1987).

Na Tabela 10 são apresentados os intervalos de índices de ponderação para cada material que compõem aquíferos. Entre parêntesis está o índice típico a atribuir caso não existam maiores informações sobre o material. Estes intervalos devem ser utilizados com base em informações específicas sobre o material estudado.

5.6.1 – Ensaio de Condutividade Hidráulica na Zona Não-Saturada

Os ensaios de infiltração com permeâmetro *Guelph (in situ)* foram realizados em média a uma profundidade de aproximadamente 45 cm, no horizonte B dos latossolos oriundos do basalto. Os ensaios foram distribuídos pela área, geralmente ao lado de poços de monitoramento, de forma que os dados relativos à condutividade fossem bem distribuídos (Figura 44). No entanto, uma distribuição

menos efetiva dos ensaios ocorreu na área de armazenamento de combustíveis, por se tratar de um local de mais difícil acesso devido às atividades exercidas no terminal de combustível e/ou, na maior parte de sua extensão o solo estar impermeabilizado.

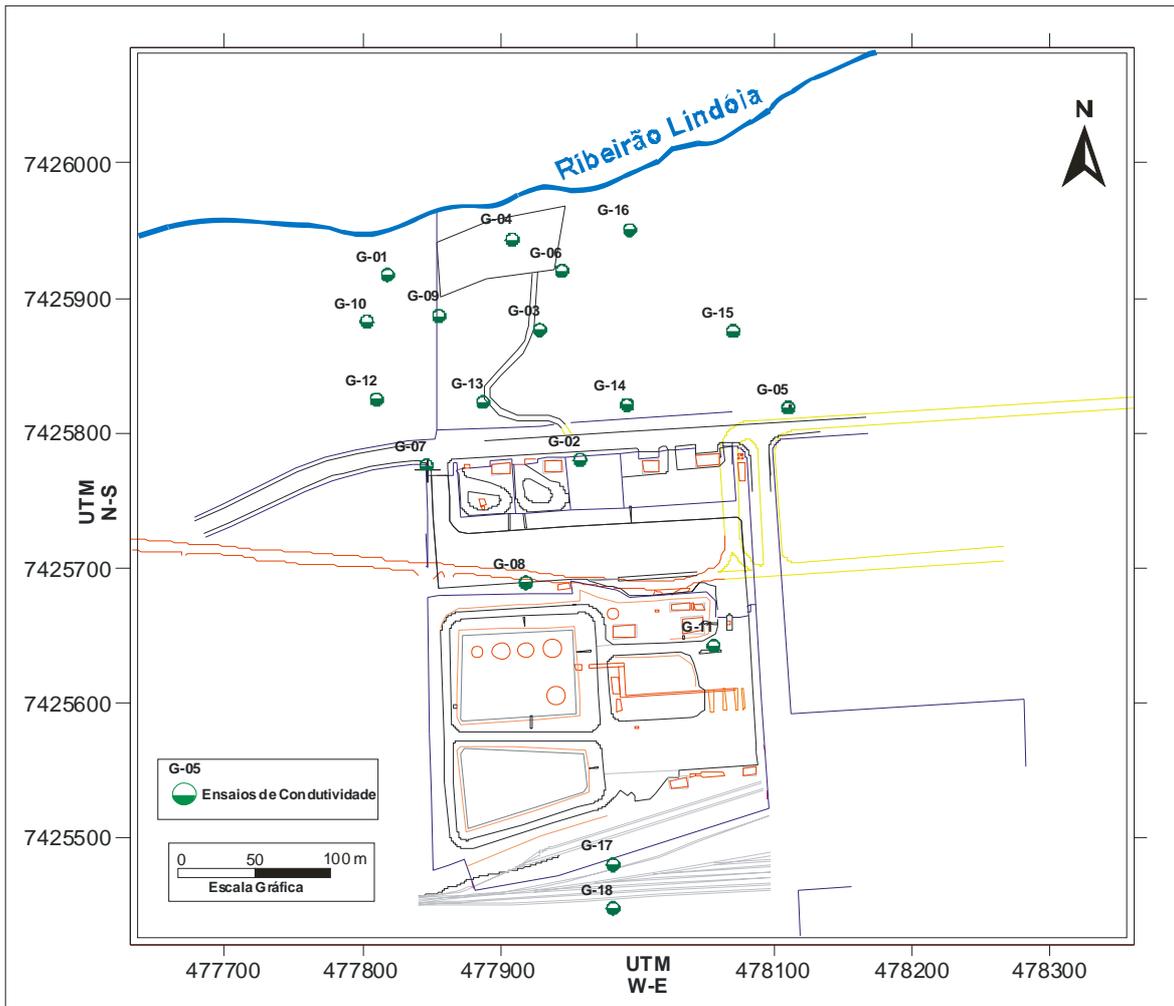


Figura 10 – Mapa indicando a localização dos ensaios de infiltração *in situ* do tipo *Guelph* na área de estudo.

A Tabela 11 indica os valores dos ensaios de condutividade hidráulica *in situ*, em centímetros por segundo, convertidos para metros por dia e depois para valores de permeabilidade intrínseca.

Tabela 6 – Valores de condutividade hidráulica (K) e permeabilidade intrínseca (k_i), calculados através dos ensaios de infiltração com permeâmetro *Guelph*.

| Guelph | K em cm/s | K em m/dia | K_i em cm² |
|---------------|-------------------------------|--------------------------------|---|
| 1 | 6,6E-04 | 5,7E-01 | 6,04E-09 |
| 2 | 4,7E-04 | 4,0E-01 | 4,30E-09 |
| 3 | 1,9E-04 | 1,6E-01 | 1,74E-09 |
| 4 | 3,3E-04 | 2,8E-01 | 3,02E-09 |
| 5 | inexequível | - | - |
| 6 | 2,9E-05 | 2,5E-02 | 2,65E-10 |
| 7 | inexequível | - | - |
| 8 | 1,8E-04 | 1,5E-01 | 1,65E-09 |
| 9 | 1,8E-04 | 1,5E-01 | 1,65E-09 |
| 10 | 8,0E-05 | 7,0E-02 | 7,32E-10 |
| 11 | 3,3E-05 | 3,0E-02 | 3,02E-10 |
| 12 | 1,8E-04 | 1,5E-01 | 1,65E-09 |
| 13 | 2,6E-04 | 2,2E-01 | 2,38E-09 |
| 14 | 3,3E-05 | 3,0E-02 | 3,02E-10 |
| 15 | 1,7E-03 | 1,4E+01 | 1,58E-08 |
| 16 | 1,2E-03 | 1,0E+01 | 1,14E-08 |

Em geral, os resultados encontrados indicam permeabilidade intrínseca de 10^{-8} cm^2 a 10^{-10} cm^2 , obtendo-se uma média geral de permeabilidade para área em torno de 10^{-9} cm^2 . Esses resultados, confrontados com os valores do Quadro 3 (vide p.43), indicam permeabilidade correspondente a areia fina, não correspondendo assim às

características texturais dos materiais da zona não-saturada que compõem os solos da região.

Como observado na Tabela 11, os ensaios de infiltração com permeâmetro *Guelph*, de números 5 e 7, não forneceram valores pois ambos foram locados em porções em que não ocorreu o processo de infiltração. Provavelmente, esses dois resultados são reflexo da maior compactação do solo nos locais de ensaio. Isso foi constatado através da recuperação do material retirado após o furo a trado manual. Além disso, como pode se observar na Figura 44, os ensaios de condutividade hidráulica de números 5 e 7 foram locados próximos à rua, onde o trânsito de veículos, transeuntes e animais contribuem para o adensamento do solo.

Os resultados de condutividade hidráulica foram comparados, do mesmo modo, com o Quadro 2 (vide p. 35). Nota-se que os valores de condutividades hidráulicas correspondentes aos ensaios *in situ* (Tabela 11), variam de 10^{-3} cm/s a 10^{-5} cm/s, caracterizando o solo de alteração como um meio de grau de permeabilidade hidráulica médio a baixo, de acordo com o Grau de Permeabilidade da classificação de Terzaghi & Peck (1967) (vide Quadro 2). Ao mesmo tempo, se comparado com a classificação de Mello & Teixeira (1967) atribui-se aos resultados de condutividade hidráulica na área de estudo classificação de a textura argilosa a areia fina, condizendo parcialmente com os resultados obtidos para permeabilidade intrínseca segundo Sanders (1998) (areia fina) (vide Quadro 1) e ao tipo de solo predominante na área (textura argilosa a muito argilosa).

5.6.2 – Análise dos Perfis Descritivos dos Poços de Monitoramento

A análise dos perfis das amostras recuperadas nos poços de monitoramento permitiu a identificação, na zona não-saturada, da presença de solo de alteração com textura predominante argilo-siltosa. Entretanto, ao analisar as seções litofaciológicas apresentadas nas Figuras 40 e 41 (vide p. 91 e 92), é possível constatar, a partir de uma diferenciação táctil visual, a certa profundidade (cerca de 8 metros nos locais de maior elevação topográfica e 2 metros nos de menor), a presença de horizontes com grãos maiores, se comparados aos dos horizontes próximos à superfície do terreno. Esses grãos maiores ocorrem devido à presença

de fragmentos centimétricos de rocha basáltica alterada; tal característica possibilita, teoricamente, uma maior permeabilidade nessas camadas.

Além disso, em maiores profundidades, como identificado na Seção A – B para o PM 16 (aproximadamente 15 metros), já é possível evidenciar a ocorrência de material saprolítico na zona não-saturada, sendo esse, por definição, possuidor de alto grau de fraturamento que o torna pouco útil à atenuação de quaisquer fontes de poluição caso atinja essa profundidade.

Assim, com base nos ensaios de permeabilidade hidráulica e os perfis descritivos, destaca-se que a zona não-saturada ocorre fundamentalmente sobre materiais de constituição argilosa com baixo grau de permeabilidade. No entanto, em menor frequência e em maiores profundidades, constatou-se a presença de materiais com menor grau de alteração, visto que na mesma análise foi evidenciada a ocorrência de saprolitos. Dessa forma, baseado na Tabela 10 o índice a atribuir será igual a 6, correspondente ao máximo do item argila/silte.

5.7- CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (C)

Como já citado, a condutividade hidráulica é um coeficiente de proporcionalidade que leva em consideração as características físicas do meio, incluindo porosidade, tamanho e distribuição das partículas, bem como as características do fluido que atravessa o manto de alteração. Assim, esse parâmetro quantifica o grau de facilidade com que a água flui em meio poroso.

O transporte de um poluente na zona saturada depende da permeabilidade hidráulica do fluxo subterrâneo, pois quanto maior for a condutividade hidráulica do aquífero maior será a taxa de transporte de um dado poluente e/ou contaminante. Para esse fim, foram realizados ensaios de *slug test* em meio saturado.

Com base em Aller *et al.* (1987) foram determinadas as seguintes classes e valores de condutividade para a estimativa do índice de vulnerabilidade DRASTIC na área de estudo (Tabela 12).

Tabela 1 – Classes e valores de condutividade hidráulica (metros/dia) e seus respectivos pesos e índices de ponderação.

| Condutividade Hidráulica (C) | | |
|------------------------------|---------------------|------------|
| Condutividade (m/d) | Pesos Relativos (p) | Índice (c) |
| < 4,1 | 3 | 1 |
| 4,1 – 12,2 | 3 | 2 |
| 12,2 – 28,5 | 3 | 4 |
| 28,5 – 40,7 | 3 | 6 |
| 40,7 – 81,5 | 3 | 8 |
| >81,5 | 3 | 10 |

Fonte: Aller *et al.* (1987).

Os valores de condutividade hidráulica foram calculados para os poços de monitoramento PM-06, PM-08, PM-18 e PM-19 (Tabela 13).

Tabela 2 – Valores de condutividade hidráulica obtidos através de ensaios de *slug*, segundo Hvorslev.

| Poço (PM) | Profundidade | K (em cm/s) | K (em m/d) |
|------------------------|--------------|-----------------------|------------|
| PM-06 | 6,77 | $1,07 \times 10^{-1}$ | 92,4 |
| PM-08 | 10,28 | $2,47 \times 10^{-1}$ | 213,4 |
| PM-18 | 19,50 | $2,97 \times 10^{-2}$ | 25,6 |
| PM-19 | 19,59 | $1,50 \times 10^{-4}$ | 0,12 |
| Média =====> | 14,03 | $9,60 \times 10^{-2}$ | 82,88 |
| Média Harmônica | - | $6,00 \times 10^{-4}$ | 0,48 |

A média aritmética estabelecida através da aplicação do teste de *slug*, foi de 82,88 metros/dia (Tabela 13), o que corresponde ao máximo do índice de ponderação, (valor igual a 10, vide Tabela 12). A média harmônica foi calculada (0,48 metros/dia) para melhor representatividade dos resultados, uma vez que o ensaio de *slug* para o PM 19 apresentou valor discrepante se comparado aos PMs 06, 08 e 18.

Contudo, o valor de condutividade hidráulica para o PM 19 está associado ao perfil litológico descrito para o PM 19, onde o coeficiente *K* atingiu $1,50 \times 10^{-4}$ cm/s ou 0,12 m/d, verifica-se que foi atingido o basalto pouco fraturado a são (vide Figura 41 p. 92), possuidor de menor permeabilidade hidráulica.

Se reunidos apenas os ensaios dos poços que atingiram o saprolito e que representam melhor a litologia dos aquíferos aqui estudados, obtém-se a média aritmética de 110 m/d, ou a média harmônica de 54,97 m/d (Tabela 14).

Tabela 3 - Valores de condutividade hidráulica obtidos através de ensaios de *slug* nos poços de monitoramento que atingem o saprolito.

| Poço (PM) | Profundidade | <i>K</i> (em cm/s) | <i>K</i> (em m/d) |
|------------------------|--------------|-----------------------|-------------------|
| PM-06 | 6,77 | $1,07 \times 10^{-1}$ | 92,4 |
| PM-08 | 10,28 | $2,47 \times 10^{-1}$ | 213,4 |
| PM-18 | 19,50 | $2,97 \times 10^{-2}$ | 25,6 |
| Média =====> | 14,03 | $1,28 \times 10^{-1}$ | 110,47 |

O valor alcançado a partir dessa nova consideração para os ensaios de condutividade hidráulica (110,47 m/d), continua indicando para o máximo do índice de ponderação. Resta salientar que a exclusão do ensaio realizado no PM 19, elevou ainda mais a média aritmética, constituindo um meio ainda mais condutivo.

5.8 - MAPA DE VULNERABILIDADE LOCAL

O mapa de vulnerabilidade local é a última etapa de procedimento para definição do índice DRASTIC. A função principal dessa etapa é representar cartograficamente todos os intervalos de vulnerabilidade resultantes da interpretação dos parâmetros utilizados. Por isso, o mapa representa os dados qualitativos e quantitativos de acordo com as classes dos valores de vulnerabilidade natural propostos no capítulo 3 (Tabela 2, pág. 30), contemplando a integração dos dados e análises dos resultados obtidos.

Os 7 parâmetros pertencente ao índice foram organizados na Tabela 15 de acordo com o modo de ocorrência na área de estudo, destacando as características fundamentais, os índices atribuídos e seus respectivos parâmetros. A partir desta tabela, o DRASTIC foi calculado multiplicando-se o valor do índice atribuído (c) ao parâmetro pelo seu peso relativo (p) (vide equação 1 p. 29), cada parâmetro possui um peso pré-determinado que reflete sua importância relativa na quantificação da vulnerabilidade.

Então, os índices de vulnerabilidade foram obtidos fazendo a somatória ponderada dos produtos calculados e dividindo-os em classes de vulnerabilidade, obtendo-se assim o mapa de vulnerabilidade natural do aquífero freático local (Figura 45). A somatória do índice DRASTIC indicou 3 diferentes graus de vulnerabilidade natural na área de estudo, nas quais foram divididas em 3 classes de vulnerabilidades a seguir: baixa, moderada e alta.

De acordo com o método do índice DRASTIC, a vulnerabilidade natural à poluição ou a contaminação das águas subterrâneas é tanto maior quanto maior o índice (vide Tabela 2).

Tabela 4 – Valores representativos do peso do índice DRASTIC e os seus índices de ponderação de acordo com os parâmetros analisados.

| Índice DRASTIC | | | |
|----------------------------------|-------------------|--|--|
| Parâmetros | Peso Relativo (p) | Características | Índice Atribuído (c) |
| Profundidade Nível D'água (D) | 5 | O nível d'água varia de 3 a 24 metros de profundidade no período amostrado. | Varia com a profundidade (Vide Tabela 3) |
| Recarga (R) | 4 | A recarga do aquífero freático está em aproximadamente 193 milímetros, coadunando-se com excedente hídrico verificado na área. | 8 |
| Material do Aquífero (A) | 3 | A zona saturada é constituída por basaltos altamente fraturados, que minimizam a atenuação natural de contaminantes, porém ocorrem também materiais constituídos ora pela rocha são mediamente fraturada, ora por materiais altamente alterados provindos da mesma rocha. | 8 |
| Solos (S) | 2 | O solo encontrado na área de estudo é constituído de textura predominantemente argilosa que auxilia na atenuação dos poluentes. | 3 |
| Topografia (T) | 1 | As declividades oscilam de 0 a 6% nos fundos de vales e até 12% nas porções inferiores das encostas; já nos topos, a declividade varia entre 0 a 12%, porém com um grande predomínio de baixas declividades (0 a 2%), favorecendo a infiltração da água. | Varia com a declividade (vide Tabela 9) |
| Impacto da Zona Não Saturada (I) | 5 | A zona não-saturada ocorre sobre materiais de constituição argilosa com baixo grau de permeabilidade. No entanto, em menor frequência e em maiores profundidades, constatou-se a presença de materiais com menor grau de alteração, visto que na mesma análise foi evidenciada a ocorrência de saprolitos. | 6 |
| Condutividade (C) | 3 | O valor médio estabelecido para condutividade hidráulica através da aplicação do teste de slug foi de (110,47 m/dia). | 10 |

Calculado o índice, primeiramente foram conjugados os mapas de profundidade do lençol freático com o mapa de declividade, pois os índices relativos a estes parâmetros, são os únicos que variam de acordo com o modo de ocorrência na área de estudo (Tabela 15). Então, o produto dessas variações foi somado com os demais índices obtidos permitindo a construção de isolinhas divididas conforme as classes de vulnerabilidade. Cartograficamente optou-se por três cores, sendo o vermelho associado à alta vulnerabilidade, pela sua característica de cor quente e que chama a atenção, as demais cores são o verde (baixa vulnerabilidade) e amarelo (moderada vulnerabilidade).

Obedecendo à escala mínima necessária para aplicação do índice DRASTIC, foram realizadas análises qualitativas de vulnerabilidade na área de estudo em locais desprovidos de dados referentes aos poços de monitoramento, como na vertente esquerda do ribeirão Lindóia e em alguns locais nos extremos W e E do mapa. Foram levadas em consideração nesta análise, as características físicas fundamentais do aquífero objeto de estudo, como a homogeneidade litológica, as características do solo, topografia e condições de armazenamento (aquífero livre).

Conforme apresenta a Figura 45, os graus de vulnerabilidade natural variam de baixa a alta, mas com predominância na maior parte da área de vulnerabilidade moderada (índice de 140 a 159). Como esperado, a profundidade do nível d'água foi o principal fator de ponderação para a construção do mapa de vulnerabilidade (Figura 45), pois o aquífero freático local é distribuído pelo manto de alteração que se caracteriza por ser um meio poroso relativamente homogêneo e livre em toda sua extensão. A vulnerabilidade de grau baixo ocorreu sobretudo devido às irregularidades do terreno (diferenças de declividade).

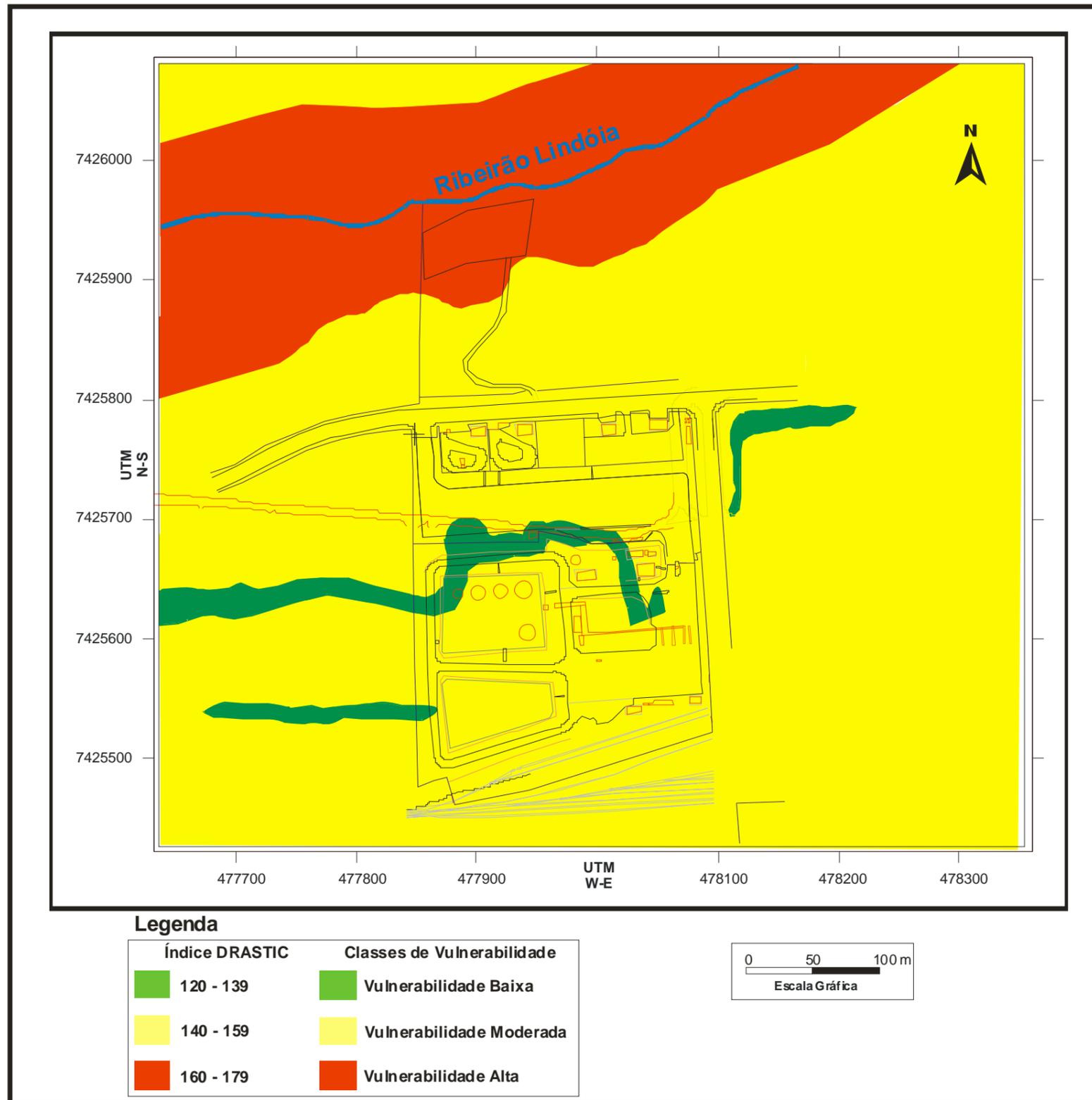


Figura 1 - Mapa de vulnerabilidade natural à poluição do aquífero freático local.

CAPÍTULO 6 – AVALIAÇÃO DO FLUXO SUBTERRÂNEO

Neste capítulo são apresentadas as bases para análise do fluxo subterrâneo na área de estudo. Os trabalhos abordarão a superfície de tendência do lençol freático à montante do ribeirão Lindóia. Na área de abrangência será determinada ainda a velocidade linear média de fluxo em duas zonas dentro do perfil de alteração.

6.1 – SUPERFÍCIE FREÁTICA

A superfície freática foi determinada medindo-se os níveis de água dos poços de monitoramento nas vizinhanças do Ribeirão Lindóia e correlacionando-os com as cotas de altitudes acima do nível do mar. Como resultado obteve-se a superfície potenciométrica (Figura 46).

Como observado na Figura 45, o gradiente hidráulico apresenta-se claramente orientado de sul para norte, seguindo grosso modo o declive do terreno, em direção à margem oeste da drenagem do ribeirão Lindóia. Exceção é feita em relação à porção sudoeste da área, onde o fluxo se apresenta de forma radial.

Os gradientes hidráulicos, bem como os fluxos subterrâneos conseqüentes, são direcionados da parte alta para a parte baixa do terreno, isto é, ortogonalmente às linhas equipotenciais, em direção à drenagem do ribeirão Lindóia no fundo do vale, a exemplo do modelo conceitual apresentado (Figura 4). Este fato já era de uma certa forma esperado, uma vez que o aquífero é livre, com a recarga local feita a partir da precipitação pluviométrica.

O gradiente hidráulico médio para a área, determinado através dos níveis d'água nos poços de observação, é de 0,046, ou 4,6%, enquanto que a declividade média do terreno para a mesma região é de 0,11, ou 11%. Tal fato indica, que a superfície saturada se aproxima da superfície do terreno.

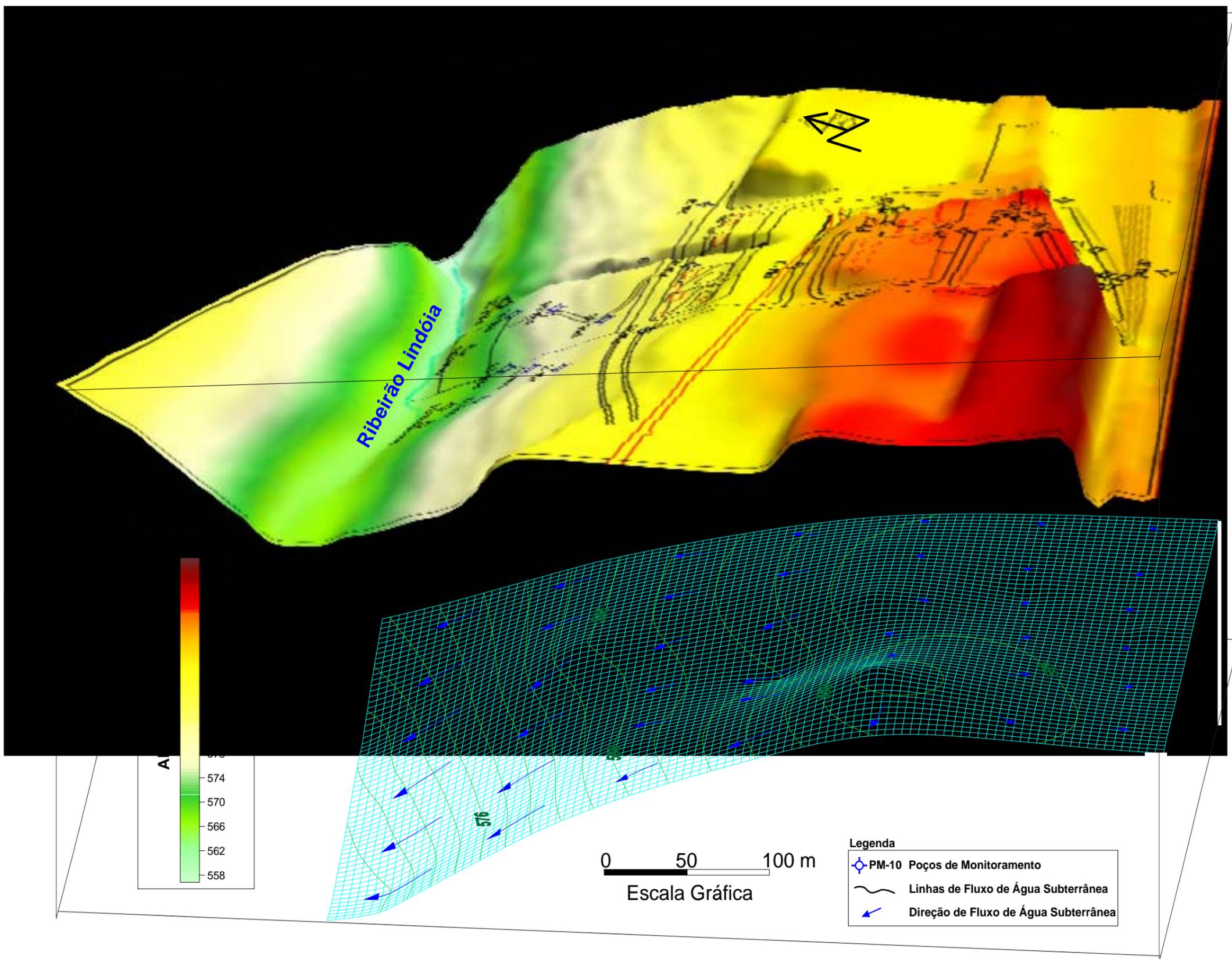


Figura 2 – Bloco diagrama ilustrando a superfície potenciométrica do lençol freático na área de estudo.

6.2 – VELOCIDADE LINEAR DE FLUXO DO AQÜÍFERO

A determinação precisa dos valores de condutividade hidráulica, somado ao gradiente hidráulico da área são necessários para estimar a velocidade de fluxo da água subterrânea.

A condutividade hidráulica do aquífero na área foi determinada em duas zonas distintas dentro do perfil do manto de alteração: uma entre a camada de solo e rocha semi-alterada e outra no meio do perfil do solo propriamente dito. A primeira foi calculada pelo método do *slug test* que permite avaliar a permeabilidade média das camadas ao redor do filtro (vide Figura 12). O segundo ensaio foi feito com permeâmetro *Guelph*, em que a carga constante nos horizontes não saturados do solo funciona segundo o princípio do Sifão de Mariotte (vide Figura 10).

6.2.1 – Velocidade Linear na Zona Saturada

O coeficientes K foram calculados para os poços de monitoramento PM-06, PM-08, PM-18 e PM-19 e os resultados estão dispostos na Tabela 13 (vide p. 105) . Os valores referentes aos ensaios indicam que a camada entre o solo e a rocha semi-alterada apresenta condutividade hidráulica extremamente elevada, com um gradiente hidráulico relativamente alto, e velocidades de fluxo consideravelmente altas .

Utilizando-se as condutividades hidráulicas determinadas nos testes de *slug*, os gradientes hidráulicos retirados da superfície potenciométrica na área de estudo (Figura 45), adotando-se o valor médio de $k = 1,28 \times 10^{-1}$ cm/s determinado pelos ensaios do *slug* para os poços de monitoramento e porosidade efetiva igual a 9% retirado de Santos (2002) (vide Tabela 7), obtém-se a velocidade linear média no aquífero de 49,2 m/dia (Tabela 16).

Tabela 5 - Velocidade linear média da área de estudo. K = condutividade hidráulica. dh/dl = gradiente hidráulico. n_e = porosidade efetiva. V_x = velocidade linear média.

| K (cm/s) | dh/dl | n_e | K (m/s) | V (m/s) | V (m/d) | V (m/ano) |
|------------|----------|-------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| 1,28E-01 | 4,00E-02 | 0,09 | 1,28E-03 | 5,69E-04 | 4,92E+01 | 1,79E+04 |

Este valor se coaduna com materiais de permeabilidade extremamente alta. A exceção é notada para o ensaio realizado no PM 19, onde o coeficiente K atingiu $1,50 \times 10^{-4}$ cm/s (vide tabela 13). Observando o perfil descritivo do poço PM 29 (vide Figura 41 p. 92), verifica-se que o mesmo atingiu o basalto pouco fraturado, ou seja, material menos permeável se confrontado com o horizonte saprolítico, invariavelmente alterado e muito fraturado.

6.2.2 – Velocidade Linear na Zona Não-Saturada

Com base nos resultados dos ensaios de infiltração com o permeâmetro Guelph, foram calculados os valores condutividade hidráulica (K), obtendo-se a média de $3,9 \times 10^{-4}$ cm/s. Como esperado, esse resultado mostrou-se distinto nesse meio se comparado ao meio saturado para o qual utilizou-se do teste de *slug*. Para melhor averiguação foi delineado um mapa de condutividade para a área de estudo (Figura 47) e calculada a velocidade linear média (Tabela 17). Para a composição do mesmo, não foram levados em consideração os ensaios que obtiveram resultados nulos.

Tabela 6 - Velocidade linear média da área de estudo. K = condutividade hidráulica. dh/dl = gradiente do terreno. n_e = porosidade efetiva. V_x = velocidade linear média.

| K (cm/s) | dh/dl | ne | K (m/s) | V (m/s) | V (m/d) | V (m/ano) |
|-----------------|--------------|-----------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| 3,90E-04 | 4,00E-02 | 0,10 | 3,90E-06 | 4,77E-06 | 4,12E-01 | 1,50E+02 |

Portanto, a velocidade linear de percolação no solo para a área de estudo é de 0,412 m/dia, ou igual a 150 m/ano, o que lhe confere características de um material pouco permeável.

Algumas feições ainda podem ser verificadas nos resultados dos ensaios de infiltração, conforme evidencia a Figura 47. A porção norte-nordeste da área, onde foram realizados os ensaios de números 15 e 16, apresenta as maiores condutividades. Tal fato é condicionado pela existência de vegetação, confirmando, dessa forma, sua importância para uma melhor infiltração das águas pluviais, que alimentam o aquífero livre que, por sua vez, contribui para o escoamento de base dos rios, mantendo perene a drenagem do ribeirão Lindóia.

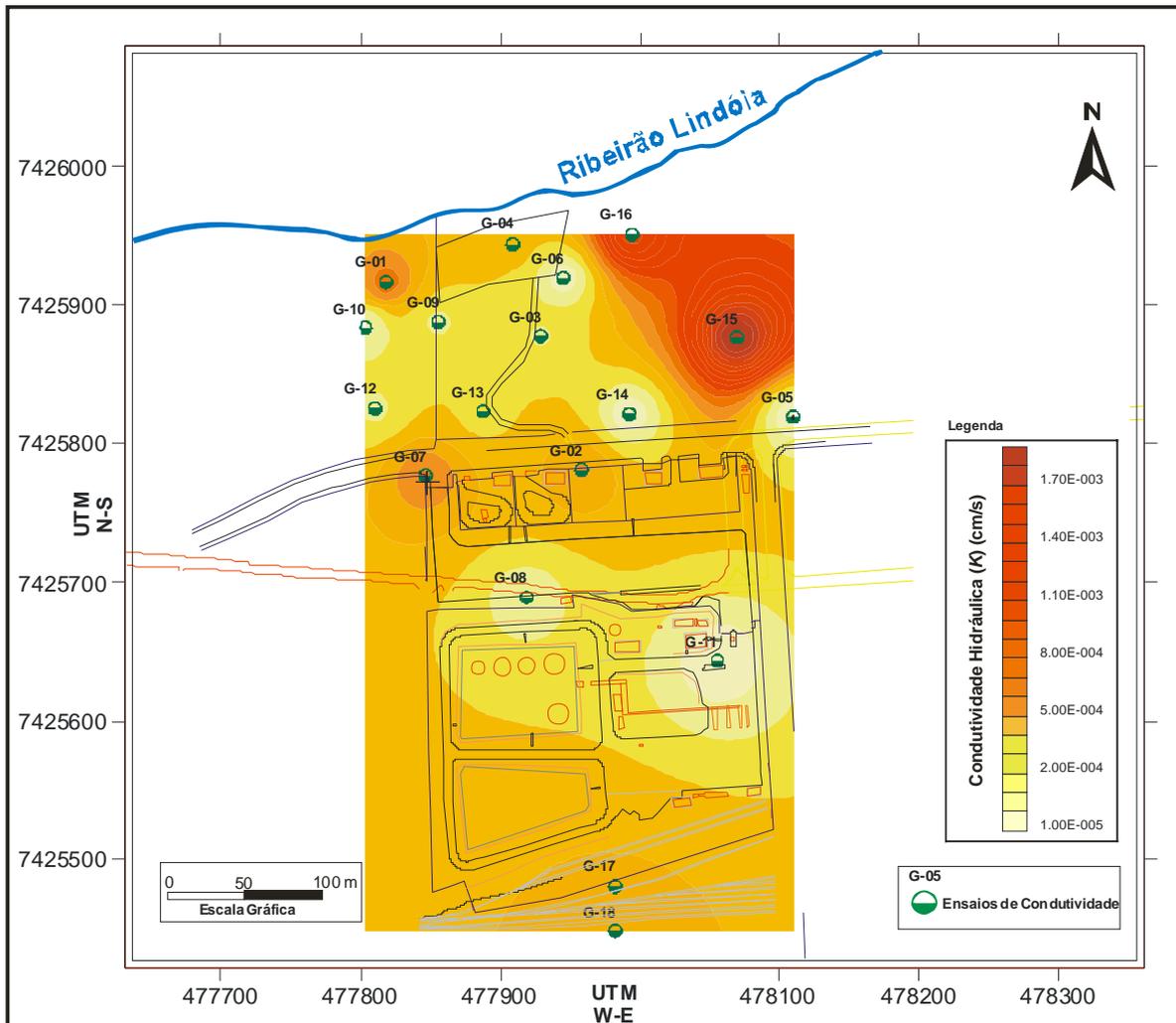


Figura 3 – Mapa de condutividade hidráulica referente à área de estudo utilizando o permeâmetro *Guelph*.

A cobertura vegetal é do tipo ciliar, pois está localizada próxima a margem direita do ribeirão Lindóia; é composta principalmente por árvores de médio a pequeno porte, pois a área foi recentemente reflorestada por espécies nativas (Figura 48).

Em contraposição, nos locais mais próximos às ruas e ou edificações, os resultados se mostraram menos efetivos quanto à infiltração.

Conforme os resultados apresentados para os ensaios de condutividade *in situ*, os solos de alteração respondem à infiltração por alguns aspectos já mencionados. Onde a superfície é impactada por diversas atividades, o manto de alteração se

mostrou praticamente impermeável; em contrapartida, áreas recobertas por vegetação apresentam bons resultados de infiltração.



Figura 4 – Mata ciliar reposta. Em destaque, espécies de árvores nativas replantadas, de pequeno a médio porte.

Como resultado final de análise da velocidade de fluxo linear, é necessário salientar as diferentes permeabilidades auferidas para o aquífero livre na área de estudo. Os ensaios de *slug* responderam às características apresentadas pelo aquífero raso da área em torno do Ribeirão Lindóia, que devido à presença de solo estruturado ou horizonte saprolítico diretamente assentado sobre rochas relativamente sãs, amplifica a velocidade de fluxo, sobretudo pela presença de fraturas, tanto sub-verticais quanto sub-horizontais. Já nos ensaios com o permeâmetro *Guelph*, os resultados foram condicionados pelos tipos de solos na área, ou seja, predominantemente constituídos por argilominerais, que apesar de possuírem boa porosidade não se caracterizam como grandes transmissores de água.

CAPÍTULO 7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

As inúmeras atividades humanas ligadas ao processo desenvolvimentista provocam sérios impactos ao meio ambiente, especialmente em áreas urbanizadas. Isto se avalia mediante os estudos focados na preservação ambiental, que na atualidade estão voltados cada vez mais para a proteção dos recursos hídricos, em especial os subterrâneos. Para tanto, os índices de vulnerabilidade se constituem em uma ferramenta útil para tomada de decisões que visam a proteção da qualidade das águas subterrâneas.

Da mesma maneira, os índices de vulnerabilidade servem como ferramenta na gestão do uso e ocupação do solo, ajudando na definição de sítios aptos para expansão urbana, diminuindo os riscos de poluição dos aquíferos.

Para o presente estudo foi considerada a utilização de um método paramétrico, o índice DRASTIC, onde se tomam 7 parâmetros diferenciados. Esse índice foi escolhido por ser tratar de um dos métodos de avaliação de vulnerabilidade natural mais difundidos no mundo, além de se apresentar como um dos mais completos da atualidade, por considerar os principais aspectos diretos e indiretos que se relacionam com os diversos processos que envolvem o armazenamento e a complexa circulação das águas subterrâneas.

As considerações finais e principais conclusões deste trabalho são abaixo elencadas.

- A fundamentação teórica teve vital importância no desenvolvimento da pesquisa, principalmente por apresentar tópicos importantes sobre os recursos hídricos, a hidrogeologia, aspectos de poluição e contaminação das águas subterrâneas e, sobretudo definições sobre a vulnerabilidade natural à poluição, principal escopo da pesquisa.

- A área definida para estudo está localizada no terceiro planalto paranaense; possui em geral um relevo ondulado a suavemente ondulado, com vales pouco entalhados, vertentes longas e com baixa declividade. Com cotas topográficas variando entre 605 a 560 metros acima do nível do mar, a conformação topográfica da área de estudo possui inclinação suave no sentido N, obedecendo à drenagem do ribeirão Lindóia. Em geral, as variações de declividade oscilam de 0 a 6% nos fundos de vales e até 12% nas porções inferiores das encostas; já nos topos, a declividade varia entre 0 a 12%, porém com um grande predomínio de baixas declividades (0 a 2%).
- O histórico de Londrina mostra que desde muito cedo a cidade alcançou grande desenvolvimento sócio-econômico, paralelamente ao crescimento populacional. No entanto, como na maioria dos centros urbanos brasileiros, esse crescimento trouxe consigo problemas de ordem social e ambiental.
- O levantamento do uso e ocupação do solo na área de estudo revelou a presença de atividades que trazem sérios riscos à qualidade das águas subterrâneas, especialmente pela presença de terminais de combustíveis, reforçando assim a necessidade de estudos que avaliem a vulnerabilidade natural do aquífero freático nas proximidades desses locais.
- O Latossolo Vermelho e o Nitossolo são as unidades pedológicas predominantes. Os solos da região em estudo vão de muito argiloso a argiloso. Assim, a predominância de textura argilosa é importantíssima para a atenuação de possíveis contaminantes existentes nos aquíferos.
- Em relação ao contexto geológico, a área de estudo está inserida nos limites da Bacia Sedimentar do Paraná, no domínio das rochas basálticas da Formação Serra Geral. Esta formação é composta principalmente por rochas vulcânicas básicas toleíticas e andesitos basálticos, ocorrendo subordinadas quantidades de riodacitos e riolitos, de textura afanítica, coloração cinza e negra.

- A Formação Serra Geral possui duas formas de ocorrência de águas subterrâneas: o aquífero freático, condicionado ao manto de alteração, o qual possui características de aquífero livre, e o aquífero Serra Geral, condicionado às descontinuidades das rochas.
- A análise de fotografias aéreas indicou a presença de diversos lineamentos estruturais de fraturas e/ou falhas, com direção principal NE-SW coadunando com o sentido principal das fraturas no município de Londrina, alinhamentos E-W acompanhando trechos do ribeirão Lindóia e, sentidos NW e N, subordinados a drenagem dos seus afluentes.
- Foram cadastrados 30 poços de monitoramento que evidenciaram, através da medição do nível estático, que a superfície freática acompanha de forma geral a topografia do terreno. Esta conformação demonstra que a área de recarga local do aquífero freático se encontra nas porções mais elevadas do terreno, sendo a área de descarga localizada nas partes mais rebaixadas do relevo, em direção à calha do ribeirão Lindóia. A análise do nível d'água revelou espessuras da zona não-saturada da ordem de 3 a 24 metros.
- Os volumes de recarga anual para o aquífero freático, um dos parâmetros mais importantes para a obtenção do índice de vulnerabilidade, se mostraram elevados, em conformidade com o excedente hídrico verificado ao longo desses últimos anos para a região do município de Londrina.
- A análise das seções litofaciológicas, construídas fundamentalmente a partir da descrição dos perfis dos poços existentes na área de estudo, revelaram que o manto de alteração de origem basáltica é formado principalmente por argilas-siltosas de coloração marrom a vermelho, o que garante certa proteção ao aquífero. Contudo, a uma profundidade maior, grande parte dos poços atravessam um material constituído por basaltos alterados muito fraturados (saprolito), o que favorece o fluxo subterrâneo.
- Os resultados obtidos por meio dos ensaios de infiltração *in situ* com o permeâmetro *Guelph* revelaram condutividades hidráulicas que variam de

10^{-3} cm/s a 10^{-5} cm/s, caracterizando o solo de alteração como um meio mediantemente permeável a pouco permeável; porém, em maiores profundidades, a análise dos perfis descritivos dos poços revelou a presença de material saprolítico na zona não-saturada, o que favorece a migração de possíveis poluentes.

- As diferenças de condutividades citadas acima respondem à relação de intensidade de impacto no solo, pois locais compactados por atividades antrópicas comportaram-se praticamente como material impermeável, ao mesmo tempo que áreas com cobertura vegetal se mostraram importantíssimas para a infiltração. Já os ensaios de condutividade hidráulica em meio saturado, calculado para os poços de monitoramento PM-06, PM-08 e PM-18 através da aplicação do teste de *slug*, obtiveram valor médio de 110,47 m/dia.
- O cálculo da velocidade linear média confirmou a baixa permeabilidade dos solos, constituídos predominantemente por textura argilosa, ao mesmo tempo em que os ensaios na zona saturada em conjunto com o gradiente hidráulico da área e a porosidade efetiva indicaram alta velocidade linear da água, devido à existência dos perfis saprolíticos. A análise de fluxo mostrou que o gradiente hidráulico apresenta-se orientado de sul para norte, seguindo de modo geral o declive do terreno, em direção à margem oeste da drenagem do ribeirão Lindóia.
- O índice DRASTIC corresponde à média ponderada de sete valores correspondentes aos seguintes sete parâmetros ou indicadores hidrogeológicos: profundidade da zona não-saturada, recarga do aquífero, material do aquífero, tipos de solos, topografia, impacto da zona não-saturada e condutividade hidráulica.
- O produto final gerado pela análise do índice DRASTIC, para os diferentes parâmetros, é o mapa de vulnerabilidade natural do aquífero freático, localizado na área de estudo, na vertente direita do ribeirão Lindóia. Os resultados evidenciaram vulnerabilidades que variam de baixa a alta, com

predomínio de vulnerabilidade moderada. Através do mapa é possível identificar que a vulnerabilidade aumenta com a proximidade do ribeirão e torna-se menos vulnerável nos divisores d'água. Em locais de declividade superior a 20% e com a profundidade do nível freático superior a 23 metros, foi obtido a vulnerabilidade baixa.

- Atualmente, a área com vulnerabilidade moderada é ocupada por atividades que envolvem estocagem e distribuição de combustíveis. Tendo em vista os resultados da avaliação hidrogeológica, mesmo em locais em que o aquífero freático local foi mapeado como vulnerabilidade natural baixa, o poluente, uma vez atingindo a zona dos saprolitos, tende a se espalhar rapidamente através das linhas de fluxo subterrâneo, atingindo em poucos dias as nascentes de água do Ribeirão Lindóia. Dessa forma, a partir dos resultados obtidos na presente pesquisa, conclui-se que essas atividades devem ser continuamente monitoradas devido aos riscos que trazem à qualidade das águas subterrâneas. Já a área considerada muito vulnerável não possui atividades que constituem sérios riscos. No entanto, não é aconselhável a ocupação deste local e o que resta de mata ciliar deve ser preservada, para que as metas vinculadas ao desenvolvimento sustentado sejam respeitadas.

Finalizando, os resultados obtidos nesta dissertação demonstraram a necessidade de estudos para avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos, concomitante a análises hidrogeológicas, a partir de uma perspectiva ambiental, mesmo se tratando de áreas em escala local, como a escolhida para este trabalho.

A avaliação da vulnerabilidade na área de estudo fornece os subsídios necessários para apoio ao monitoramento do aquífero freático local, auxiliando na tomada de decisões quanto ao uso e ocupação do solo e conseqüentemente ao planejamento sócio-econômico do município de Londrina, contribuindo assim para a preservação ambiental e a manutenção da qualidade de vida da população.

CAPÍTULO 8 - BIBLIOGRAFIA

ARTUSO, E.; OLIVEIRA, M. M.; FERREIRA, J. J. P. C. L. Avaliação da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas do sector de Évora do sistema aquífero de Évora-Montemor-Cuba. In: CABRAL, J. J. S. P.; LOBO FERREIRA, J. P. C.; MONTENEGRO S. M. G. L.; COSTA, W. D. (Orgs). **Água Subterrânea: Aquíferos costeiros e aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento**. Recife: Universitária da UFPB, 2004, p. 223-276.

AB' SÁBER, A. N. Relevo, estrutura e rede hidrográfica do Brasil. **Boletim Geográfico**, ano XV nº 132, maio – junho: conselho nacional de geografia. Rio de Janeiro, 1956.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 13895** - Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 21 p.

AGUIAR, C. P. A. **Avaliação quantitativa de propriedades geotécnicas e hidrogeológicas com vista à vulnerabilidade do aquífero Bauru em São José do Rio Preto**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2001.

ALBINET, M.; MARGAT, J. Cartographie de la vulnérabilité a la pollution des nappes d'eau souterraine. **Bulletin BRGM ZME**. 2nd Series v. 3, nº4. 1970, p 13-22.

ALLER, L., BENNET, T., LEHR, J.H. e PETTY, R.J. **DRASTIC**: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. EPA, 1987. Report 600/2-85/018.

ARANTES, M. R. L. **Relações entre o processo de urbanização e a qualidade da água de uma bacia de abastecimento urbano: ribeirão Cafezal / Pr.**

Dissertação (Mestrado) - Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2002.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI,; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo: Prantice Hall, 2002. 305 p.

BRANCO, C. J. M da C.; MIGUEL, M. G.; PINESE, P. P. e TEIXEIRA, R S. Implantação do Campo Experimental de Engenharia Geotécnica no Campus da UEL. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. 11., 1998. Brasília. **Anais...** Brasília/DF: ABPV v. II 1998.

CAETANO CHANG, M. R. **A Formação Pirambóia no centro-leste do Estado de São Paulo**. Concurso (Livre-Docente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1997.

CELLIGOI, A; VIANNA, T. R. Análise das reservas de água subterrânea do aquífero Serra Geral em Londrina: Recarga e Consumo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 12., 2002. Florianópolis. **Anais...**, Florianópolis: ABAS, 2002. CD ROM.

CELLIGOI, A; DUARTE, U. Critérios hidrogeológicos na locação de poços tubulares em rochas basálticas da Formação Serra Geral. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 8., 1994. Salvador. **Anais...**, Salvador: ABAS, 1994.

CELLIGOI, A. **Recursos hídricos subterrâneos da Formação Serra Geral em Londrina – PR**. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

CELLIGOI, A.; SANTOS, M. M.; VIANNA, T. R. Análise e interpretação do gradiente hidráulico do aquífero freático em uma área na região sul de Londrina-PR. **Revista do Departamento de Geociências**. UEL, v. 10, n. 1, 2001, p. 79-87.

CHAVES, S. T. **Análise da evolução das formas do relevo da bacia hidrográfica do ribeirão Lindóia Londrina/Pr.** Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2002.

CUNHA, F. C. A. **Crescimento Urbano e Poluição Hídrica na Zona Norte de Londrina – PR.** Dissertação (Mestrado) - Departamento de Geografia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 1996.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Brasília: Embrapa Produção da Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

FERREIRA, S. T. **Estudo da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas na região de Ribeirão Preto – SP.** Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1992.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology.** 3 ed: Prentice Hall, New Jersey, 1988. 691 p.

FETTER, C. W. **Contaminant hydrogeology.** New York: Macmillan Publish Company, 1993. 458 p.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data.** Lima: World Health Organization, Pan American Health Organization, Centre for Sanitary Engineering and Environmental Sciences, 1988. Technical Report.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes.** São Paulo: Instituto Geológico, 1993. 92 p.

FRANÇA, de V. O rio Tibagi no contexto hidrogeográfico paranaense. In: MEDRI, M. E. BIANCHINI, E., SHIBATTA, O. A., PIMENTA, J. A. (Eds). **A bacia do rio Tibagi**. Londrina: Editora da Universidade Estadual de Londrina, 2002. p. 45 – 62.

FREEZE, R. A. & CHERRY, J.A. **Groundwater**. Prentice-Hall inc., New Jersey, 1979. 604 p.

HASHIMOTO, T., STEDINGER, J.R. e LOUCKS, D.P. Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resource System Performance Evaluation. *Water Resources Research*, 18(1), 1982, p 14-20.

IBGE. **Censo Demográfico**. Estimativa: Paraná 2003. Curitiba: IBGE n. 27, 2003.

IPPUL – INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE LONDRINA. **Levantamento planialtimétrico da cidade de Londrina/Pr**. Londrina: IPPUL, 2001.

KARMANN, I. Águas subterrâneas. In: TEIXEIRA, W.; MOTTA, T, M.C.; FAIRCHILD, T, R.; TAIOLI, F. (Ed). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de textos, 2000, p. 113-138.

LASTORIA, G. **Hidrogeologia da formação Serra Geral no Estado do Mato Grosso do Sul**. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

LEINZ, V. Contribuição à geologia dos derrames basálticos do sul do Brasil. **Bol. Fac. Filos. Ciências e Letras**. São Paulo: EDUSP (geol. 5), 1949.

LOBATO, Roberto C. **O espaço Urbano**. Editora Ática S.A. São Paulo, 1989.

LOBO-FERREIRA, J.P., OLIVEIRA, M.M., MOINANTE, M.J., THEVES, T.; DIAMANTINO, C. Mapeamento das Águas Subterrâneas da Faixa Costeira Litoral e da Vulnerabilidade dos seus Aqüíferos à Poluição. **Relatório 237/95- GIAS**. Lisboa: LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1995. 585 p

LOBO-FERREIRA, J.P. OLIVEIRA, M.M. **Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal**. Caracterização dos recursos Hídricos Subterrâneos e Mapeamento DRASTIC da Vulnerabilidade dos Aqüíferos de Portugal. **Relatório 179/93 – GIAS**. Lisboa: LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1993.

MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. Rio de Janeiro/Curitiba: Secretaria da Cultura e do Esporte do Governo do Estado do Paraná, 1981.

MEAULO, F.J. **Vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara (SP)**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

MELLO, V. F. B. de & TEIXEIRA, A. H. **Mecânica dos Solos**. São Carlos: Escola de Engenharia, 1967.

MENDONÇA, F. de A. **O clima e o planejamento urbano de cidade de porte médio e pequeno: proposição metodológica para estudo e sua aplicação à cidade de Londrina/PR**. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

National Research Council (NRC). **Groundwater Vulnerability**. Assessment: Predicting Relative Contamination Potential under Conditions of Uncertainty. National Academy Press, Washington, DC, USA, 1993.

COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a Geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia**: uma atualização de bases e conceitos (Orgs). 3ªed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. p. 93-148.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil** - Rio de Janeiro: IBGE, 2º ed., Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989.

OLIVA, A. **Estudo hidrogeológico da Formação Rio Claro no município de Rio Claro-SP**. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

OLIVEIRA, M. M.; LOBO FERREIRA, J. P. C. Cartografia da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas do conselho de Montemor-o-Novo utilizando o método DRASTIC. In: CABRAL, J. J. S. P.; LOBO FERREIRA, J. P. C.; MONTENEGRO S. M. G. L.; COSTA, W. D. (Orgs). **Água Subterrânea: Aquíferos costeiros e aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento**. Recife: Universitária da UFPB, 2004, p. 223-276.

PARALTA, E. A. & FRANCÉS A. P. **Avaliação da vulnerabilidade à poluição DRASTIC e cartografia de risco do aquífero Gabro Diorítico da região de Beja**. Artigo capturado da Internet em 25/06/2005: http://www.aprh.pt/congressoagua2000/COMUNIC/R_58.PDF

PARANÁ (Estado). Minerais do Paraná S.A. **Mapa geológico do Estado do Paraná**. Curitiba: MME / DNPM, 1989.

PASTORE, E. L.; FONTES, R. M. Caracterização e classificação de solos. In: OLIVEIRA, S.A. M.; BRITO, N. A. (Eds). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998, p. 197-210.

PEDE, M. A. Z. **Caracterização da condutividade hidráulica do embasamento cristalino alterado saturado na região metropolitana de São Paulo**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.

PETRI, S. FÚLFARO, V. J. **Geologia do Brasil**. São Paulo: EDUSP, 1983.

PINTO, M. S. **A coleta e disposição do lixo no Brasil**. 11ª ed. Rio de Janeiro: FGV, 1979.

PUERARI, E. M.; COSTA, C. T.; CASTRO, M. A. H. Utilização do método DRASTIC na análise de vulnerabilidade natural do complexo industrial e portuário do Pacém – Fortaleza-CE. In: SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA DO SUDESTE, 1. 2003. Petrópolis. **Anais...** Petrópolis: ABAS, 2003.

REBOUÇAS, A. C. Potencialidades hidrogeológicas dos basaltos da bacia do Paraná no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978. Recife. **Anais...** Recife: SBG 1978.

ROSA FILHO, E. F. Caracterização da depleção de um aquífero através do coeficiente de descarga, α , de Maillet. **Boletim Paranaense de Geociências**. Curitiba: UFPR, 1993, v. 41, p. 125-144.

ROSA, M. J.; NUNES, L. M.; CAMPINAS, M.; STIGTER, T. Y.; TEIXEIRA, M. R.; VIEIRA, J.; **Recursos hídricos para rega de campos de golfe no concelho de Albufeira**, Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências do Mar e do Ambiente, 2001. Laudo Técnico.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo: EDUSP, 1994, v.8, p 63 77.

RUBIO, C. X.; SÁNCHEZ, R. G. Análisis comparativo de la vulnerabilidad del acuífero norte de Quito. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 12., 2002. Florianópolis. **Anais...**, Florianópolis: ABAS, 2002. CD ROM.

SANDERS L. L. **Manual of Field Hydrogeology**. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 381 p.

SANTOS, P.S. **Tecnologias das argilas**. São Paulo: EDUSP, 1975. 802 p.

SANTOS, M. M. **Avaliação do aquífero freático a jusante de um antigo depósito de resíduos em Rolândia - Pr.** Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2003.

SCHINEIDER, R.L. ; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A .; DAEMON, R.F.; NOGUEIRA, A . A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In:

CONGRESSO DE GEOLOGIA. 28., Porto Alegre. **Anais...**Porto Alegre-RS: SBG. 1974.

SCHOBENHAUS, C. ; CAMPOS, D. A .; DERZ, G. R. ; HAROLDO, E . A. **Geologia do Brasil**. Brasília, Df: DNPM. 1984.

SOIL MOISTURE CORP. Model 2800K1, **Guelph Permeameter**: Operating Instructions. Santa Bárbara, CA 93105, 28p.

STIPP, N. A. F.; Principais tipos de solos da bacia do rio Tibagi. In: MEDRI, M. E. BIANCHINI, E., SHIBATTA, O. A., PIMENTA. J. A; (Ed) **A bacia do rio Tibagi**. Londrina: UEL, 2002, p. 39-44.

TERZAGUI, K. & PECK, R. B. **Soil Mechanics and Engineering Practice**. Wiley, New York 1967.

THORNTHWAITE, C.W. & MATHER, J.R. The water balance. **Publications in climatology**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, v.8, 1955, 104 p.

TRINDADE, A. M. **Considerações ambientais em decorrência das formações dos lagos na zona norte de Londrina – Pr: uma abordagem do lago Milton Gavetti**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2004.

VELÁSQUEZ, L. N. M. **Efeitos da urbanização sobre o sistema hidrológico: Aspectos da recarga no aquífero freático e escoamento superficial – área piloto: Sub-bacias Sumaré e Pompéia, Município de São Paulo**. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996.

VIEIRA S.A. **Manual da ciência do solo**. São Paulo: Agronômica Ceres LTDA. 1995.

ZORTÉA. A. J. **Londrina Através dos Tempos e a Crônica da Vida**. São Paulo: Juriscredi, 19