



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 001**

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE CAMPO PARA A  
DETERMINAÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM  
MEIOS SATURADOS E NÃO SATURADOS**

**Área de Concentração: Hidrogeologia e Meio Ambiente**

**JOYCE PINHEIRO DE OLIVEIRA FIORI**

**Orientador: Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos**

**Brasília, Março de 2010**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 001**

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE CAMPO PARA A  
DETERMINAÇÃO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM  
MEIOS SATURADOS E NÃO SATURADOS**

**JOYCE PINHEIRO DE OLIVEIRA FIORI**

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. **José Eloi Guimarães Campos** Orientador

Prof. Dr. **Alterêdo Oliveira Cutrim** (UFMT)

Prof. Dr. **Augusto César Bittencourt Pires** (UnB)



## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Dr. José Eloi Guimarães Campos, orientador dessa pesquisa, orientador na minha vida profissional e um irmão, que me foi dado pela vida. Agradeço por sua amizade em todos os momentos, por sua paciência e por sua confiança em mim, como pessoa e como profissional.

Ao Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha, por sua ajuda absolutamente relevante no tratamento dos dados, pelas trocas de ideias em relação à pesquisa, por sua amizade e por sua paciência.

Aos alunos da disciplina Hidrogeologia do Instituto de Geociências da UnB, no ano de 2009, cujo auxílio na execução dos ensaios no DF foi fundamental.

À Universidade de Brasília e ao Programa de Pós Graduação do Instituto de Geociências pela oportunidade de desenvolvimento desse trabalho.

À Empresa Enerpeixe, pelo acesso aos poços de monitoramento instalados nas cidades no sul do estado do Tocantins, nos quais foram obtidos dados para elaboração dessa dissertação.

À Empresa Água & Terra, em especial ao Geólogo Leonardo de Melo Santos, pela parceria profissional, pela confiança e principalmente por sua amizade.

Aos membros da banca pela presença e por disporem de seu tempo na leitura deste trabalho.

À minha família, em especial à minha mãe Zenilda, que me fez ser quem sou, que me ensinou a ser forte e perseverante.

À todos os amigos do mestrado, do primeiro semestre de 2008, com os quais compartilhei aulas e aprendizado; em especial à Thaísa com quem compartilhei momentos de “tensão” e com a qual criei vínculos de amizade fundamentais.

A todos os amigos que, por meio de simples palavras, me incentivaram a continuar; em especial minha amiga Taty Melo, que agora finalmente não vai mais me ouvir dizer que não consigo escrever nada.

E a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a finalização dessa pesquisa.

Meus sinceros agradecimentos!

## SUMÁRIO

|  |            |
|--|------------|
| <b>CAPÍTULO I - APRESENTAÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                   | <b>8</b>   |
| <b>1.1. INTRODUÇÃO</b>   | <b>8</b>   |
| 1.1.1. OBJETIVOS   | 8          |
| 1.1.2. JUSTIFICATIVAS  | 9          |
| 1.1.3. LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO                                     | 10         |
| <b>1.2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>  | <b>10</b>  |
| 1.2.1. ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO  | 13         |
| 1.2.2. <i>SLUG TEST</i>  | 14         |
| <b>CAPÍTULO II - CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS ESTUDADAS</b>                    | <b>19</b>  |
| <b>2.1. DISTRITO FEDERAL</b>   | <b>19</b>  |
| 2.1.1. CONTEXTO GEOLÓGICO  | 19         |
| 2.1.2. PEDOLOGIA   | 25         |
| 2.1.3. GEOMORFOLOGIA   | 30         |
| 2.1.4. HIDROGEOLOGIA   | 33         |
| 2.1.5. CARACTERIZAÇÃO LOCAL DA ÁREA ESTUDADA NO DISTRITO FEDERAL           | 39         |
| <b>2.2. SUL DO ESTADO DO TOCANTINS</b>                                     | <b>44</b>  |
| 2.2.1. CONTEXTO GEOLÓGICO  | 44         |
| 2.2.2. PEDOLOGIA   | 47         |
| 2.2.3. HIDROGEOLOGIA   | 51         |
| 2.2.4. CARACTERIZAÇÃO LOCAL DA ÁREA ESTUDADA NO SUL DO ESTADO DO TOCANTINS | 53         |
| <b>CAPÍTULO III - AQUISIÇÃO DOS DADOS E RESULTADOS</b>                     | <b>65</b>  |
| <b>3.1. AQUISIÇÃO DOS DADOS</b>  | <b>65</b>  |
| <b>3.2. RESULTADOS</b>   | <b>66</b>  |
| 3.2.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE INFILTRAÇÃO <i>IN SITU</i>                | 66         |
| 3.2.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE <i>SLUG TEST</i>                          | 83         |
| <b>CAPÍTULO IV - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>                              | <b>87</b>  |
| <b>4.1. ZONA NÃO SATURADA</b>  | <b>87</b>  |
| 4.1.1. ANÉIS CONCÊNTRICOS  | 87         |
| 4.1.2. <i>OPEN END HOLE</i>  | 88         |
| <b>4.2. ZONA SATURADA</b>  | <b>90</b>  |
| 4.2.1. AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE AQUISIÇÃO DOS DADOS EM CAMPO               | 90         |
| 4.2.2. AVALIAÇÃO DO MÉTODO DA VAZÃO  | 90         |
| 4.2.3. AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE <i>Hvorslev</i>                              | 91         |
| 4.2.4. AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE <i>Bouwer &amp; Rice</i>                     | 94         |
| 4.2.5. AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE <i>Cooper et. al</i>                         | 95         |
| 4.2.6. AVALIAÇÃO DOS VALORES REAIS DE K EM PROFUNDIDADE                    | 96         |
| <b>CAPÍTULO V - CONCLUSÕES</b>   | <b>99</b>  |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>  | <b>103</b> |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Mapa de localização dos pontos de amostragem na Área I, no Distrito Federal.....   | 11 |
| Figura 2. Mapa de localização dos pontos de amostragem na Área II, no estado do Tocantins.....   | 12 |
| Figura 3. Esquema do método dos anéis concêntricos para ensaios de infiltração. I - seção cravada no solo, $h_0$ - distância do nível d'água inicial à superfície do terreno, $h_f$ - distância do nível d'água final à superfície do terreno e $Q$ - volume de água inserido..... | 13 |
| Figura 4. Ilustração esquemática do método open end hole para ensaios de infiltração in situ.....  | 14 |
| Figura 5. Perfil esquemático de um poço hipotético mostrando a evolução de slug test. (onde " $r_w$ " é o raio de perfuração do poço, " $r_c$ " é o raio do revestimento do poço, " $b$ " é a espessura do aquífero).....  | 15 |
| Figura 6. Ilustração da aplicação de ensaio tipo Slug test e Bail Test.....  | 16 |
| Figura 7. Estratigrafia do Grupo Canastra, conforme Freitas-Silva & Dardenne (1994).....   | 20 |
| Figura 8. Estratigrafia do Grupo Paranoá na área-tipo de Alto Paraíso de Goiás - São João D'Aliança. A - argila, S - silte, AF - areia fina, AM - areia média, AG - areia grossa e C - cascalho.....   | 21 |
| Figura 9. Coluna estratigráfica referida ao Grupo Bambuí definida por Dardenne (1978).....   | 23 |
| Figura 10. Mapa geológico da bacia do alto rio Jardim (Lousada 2005).....  | 24 |
| Figura 11. Mapa de solos da bacia do alto rio Jardim (Lousada 2005).....   | 26 |
| Figura 12. Mapa geomorfológico da bacia do alto rio Jardim (Lousada 2005).....   | 33 |
| Figura 13. Perfis dos poços estudados no Distrito Federal.....   | 44 |
| Figura 14. Mapa imagem da Vila do Retiro com poços de monitoramento e a distribuição dos materiais em superfície.....  | 54 |
| Figura 15. Mapa imagem de São Salvador com poços de monitoramento e a distribuição dos materiais em superfície.....  | 55 |
| Figura 16. Mapa imagem de Paranã com poços de monitoramento e a distribuição dos materiais em superfície.....  | 56 |
| Figura 17. Perfis dos poços estudados no estado do Tocantins.....  | 64 |
| Figura 18. Esquema para o método dos anéis concêntricos.....   | 65 |
| Figura 19. Esquema para o método open end hole.....  | 65 |
| Figura 20. Medidor de nível.....   | 65 |
| Figura 21. Diver (transdutor de pressão).....  | 65 |
| Figura 22. Ilustração gráfica dos valores médios de $K$ em superfície (método dos anéis concêntricos) - DF.....  | 70 |
| Figura 23. Ilustração gráfica dos valores médios de $K$ em 50 cm de profundidade (método open end hole) - DF.....  | 70 |
| Figura 24. Ilustração gráfica dos valores médios de $K$ em 100 cm de profundidade (método open end hole) - DF.....   | 71 |
| Figura 25. Ilustração gráfica dos valores médios de $K$ em 150 cm de profundidade (método open end hole) - DF.....   | 71 |
| Figura 26. Ilustração gráfica dos valores médios de $K$ em 200 cm de profundidade (método open end hole) - DF.....   | 72 |
| Figura 27. Ilustração gráfica dos valores de $K$ em superfície (método dos anéis concêntricos) - TO.....   | 78 |
| Figura 28. Ilustração gráfica dos valores médios de $K$ em 50 cm de profundidade (método open end hole) - TO.....  | 79 |
| Figura 29. Ilustração gráfica dos valores médios de $K$ em 100 cm de profundidade (método open end hole) - TO.....   | 80 |
| Figura 30. Ilustração gráfica dos valores médios de $K$ em 150 cm de profundidade (método open end hole) - TO.....   | 81 |
| Figura 31. Ilustração gráfica dos valores médios de $K$ em 200 cm de profundidade (método open end hole) - TO.....   | 82 |
| Figura 32. Exemplo de gráfico gerado para obtenção do tempo em 37% do rebaixamento, a partir dos dados obtidos manualmente (gerado no Programa Excel).....   | 92 |
| Figura 33. Exemplo de gráfico gerado para obtenção do tempo em 37% do rebaixamento a partir dos dados obtidos com o diver (gerado no Programa Excel).....  | 92 |
| Figura 34. Exemplo de gráfico utilizando a curva geral, que se adequa aos dados até que o rebaixamento tenda a estabilizar (produzido diretamente pelo Programa Aquífer Test).....   | 93 |
| Figura 35. Exemplo de gráfico utilizando a curva inicial, que se adequa aos dados até que o rebaixamento tenda a estabilização (gerado no Programa Aquífer Test).....  | 93 |
| Figura 36. Exemplo gráfico que mostra três intervalos do rebaixamento, onde o primeiro, mais influenciado pelos parâmetros construtivos do poço de monitoramento, foi desconsiderado (gerado no Programa Aquífer Test).....  | 95 |



## ÍNDICE DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <i>Tabela 1. Resumo da classificação dos Domínios, Sistemas/Subsistemas aquíferos do Distrito Federal com respectivas vazões médias. Fonte: Adaptado de Campos &amp; Freitas-Silva (1999).</i>   | 35 |
| <i>Tabela 2. Dados construtivos e de localização dos poços de monitoramento estudados.</i>   | 40 |
| <i>Tabela 3. Dados construtivos e de localização dos piezômetros estudados.</i>  | 56 |
| <i>Tabela 4. Resultados de ensaios realizados em Neossolo Quartzarênico.</i>   | 66 |
| <i>Tabela 5. Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho-Amarelo Arenoso.</i>   | 66 |
| <i>Tabela 6. Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho Argiloso.</i>  | 66 |
| <i>Tabela 7. Resultados de ensaios realizados em Neossolo Regolítico Psamítico.</i>  | 67 |
| <i>Tabela 8. Resultados de ensaios realizados em Neossolo Regolítico Psamítico (compactado).</i>   | 67 |
| <i>Tabela 9. Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho Distrófico com textura arenosa, e estrutura granular nos horizontes superficiais.</i>  | 67 |
| <i>Tabela 10. Resultados de ensaios realizados em Latossolo Amarelo Distrófico, textura argilosa.</i>  | 67 |
| <i>Tabela 11. Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho Amarelo Ácrico com textura arenosa.</i>   | 67 |
| <i>Tabela 12. Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho Distrófico com textura arenosa.</i>   | 68 |
| <i>Tabela 13. Resultados de ensaios realizados em Cambissolo Háptico Distrófico.</i>   | 68 |
| <i>Tabela 14. Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho Distrófico com textura argilosa.</i>  | 68 |
| <i>Tabela 15. Resultados de ensaios realizados em Latossolo Amarelo Distrófico Argiloso.</i>   | 68 |
| <i>Tabela 16. Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho Distrófico com textura arenosa.</i>   | 68 |
| <i>Tabela 17. Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho Distrófico com textura arenosa.</i>   | 69 |
| <i>Tabela 18. Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho Distrófico com textura arenosa e estrutura granular nos horizontes superficiais.</i>  | 69 |
| <i>Tabela 19. Resultados de ensaios realizados em Gleissolo Háptico (drenado).</i>   | 69 |
| <i>Tabela 20. Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho Distrófico com textura argilosa.</i>  | 69 |
| <i>Tabela 21. Neossolo Flúvico rico em areia de coloração amarela. A partir de 190 cm, iniciou-se um nível de cascalho grosso.</i>   | 72 |
| <i>Tabela 22. Material areno-argiloso (Neossolo Flúvico) onde o topo do horizonte de cascalho inicia-se a 163 cm.</i>  | 72 |
| <i>Tabela 23. Material arenoso amarelo, em área natural de pasto abandonado com pouco pisoteio.</i>  | 73 |
| <i>Tabela 24. Material Areno-Siltoso típico de origem fluvial, sem cascalho. A 175 cm, alcançou-se a zona saturada.</i>  | 73 |
| <i>Tabela 25. Neossolo Flúvico, com evidência de latossolização. Nível de cascalho a 186 cm. Textura areno-argilosa.</i>   | 73 |
| <i>Tabela 26. Material Arenoso, com passagens de horizontes mais finos. Todo o perfil apresenta cores amareladas e mais escurecidas no topo (devido à maior contribuição de matéria orgânica).</i>   | 73 |
| <i>Tabela 27. Área natural próxima ao rio. Aluvião composto essencialmente de areias amarelas.</i>   | 73 |
| <i>Tabela 28. Material de origem fluvial areno-argiloso de coloração amarelada. A fração arenosa predomina e não é observada estruturação importante (apenas pode-se caracterizar pequenos grumos em horizontes isolados). Topo do horizonte de cascalho a 210 cm.</i> | 74 |
| <i>Tabela 29. Material arenoso com restrita contribuição silto-argilosa. Não foi observado nível de cascalho.</i>  | 74 |
| <i>Tabela 30. Material Arenoso de origem fluvial com contribuição variável de finos (silte + argila).</i>  | 74 |
| <i>Tabela 31. Material amarelado de origem fluvial. A partir de 117 cm inicia nível de concreções lateríticas endurecidas. O nível mosqueado ocorre a partir de 87 cm.</i>   | 74 |
| <i>Tabela 32. Material areno-argiloso. A 152 cm iniciou horizonte petroplúntico sem cascalho aluvionar.</i>  | 74 |
| <i>Tabela 33. Latossolo Vermelho-Amarelo, argiloso. A 208 cm ocorre nível de plintita, onde o horizonte fica mais denso e endurecido com o aumento da profundidade.</i>  | 75 |
| <i>Tabela 34. Latossolo Vermelho, textura franca.</i>  | 75 |
| <i>Tabela 35. Latossolo Vermelho-Amarelo. A 126 cm inicia nível de cascalho com quartzo e concreções lateríticas finas. Os clastos arredondados apresentam diâmetro médio de 1 cm.</i>   | 75 |
| <i>Tabela 36. Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso, sem qualquer nível com cascalho ou pedregosidade. Estrutura granular fina e grumosa com aumento da profundidade.</i>  | 75 |
| <i>Tabela 37. Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso. Horizonte petroplúntico concrecionário a 135 cm. A feição do silto-argiloso indica que o material de partida que sofreu latossolização era representado por sedimentos fluviais.</i>                                | 76 |
| <i>Tabela 38. Aluvião com intercalação de cascalhos finos e médios com pouca matriz arenosa. Há pequena contribuição argilosa. Material pouco compactado comum de aluviões recentes.</i>   | 76 |
| <i>Tabela 39. Ensaio realizado diretamente sobre o cascalho aflorante. Os anéis foram cravados sobre os seixos. Os tubos foram cravados em furos perfurados por cavadeira.</i>   | 76 |
| <i>Tabela 40. Neossolo Flúvico com nível de cascalho grosso a partir de 50 cm. Cobertura superficial areno-argilosa.</i>   | 76 |



|  |           |
|--|-----------|
| <i>Tabela 41. Solo areno-argiloso (Latosolo Vermelho-Amarelo) com nível de plintita a partir de 80 cm. O nível de mosqueados para um horizonte plíntico na base do furo. Solo compactado na superfície. ....</i> | <i>76</i> |
| <i>Tabela 42. Latossolo Vermelho-Amarelo, areno-silto-argiloso. A textura rica na fração silte indica que o material parental foi um antigo solo fluvial que sofreu latossolização.....</i>                      | <i>77</i> |
| <i>Tabela 43. Latossolo Vermelho-Amarelo com horizonte petroplíntico a partir de 120 cm. ....</i>  | <i>77</i> |
| <i>Tabela 44. Terreno muito compactado até os 20 cm. Provável Cambissolo, com cascalho rico em quartzo de veio anguloso a partir de 40 cm. ....</i>  | <i>77</i> |
| <i>Tabela 45. Latossolo Vermelho-Amarelo areno-argilo, com textura franca, provavelmente derivado da pedogênese de material original fluvial. ....</i>   | <i>77</i> |
| <i>Tabela 46. Dados dos ensaios realizados no DF, tratados com planilhas eletrônicas no Programa Excel.....</i>  | <i>83</i> |
| <i>Tabela 47. Dados dos ensaios realizados no DF, tratados no Programa Aquifer Test. ....</i>  | <i>84</i> |
| <i>Tabela 48. Dados dos ensaios realizados no TO, tratados com planilhas eletrônicas no Programa Excel.....</i>  | <i>84</i> |
| <i>Tabela 49. Dados dos ensaios realizados no TO, tratados no Programa Aquifer Test. ....</i>  | <i>85</i> |
| <i>Tabela 50. Resultados hipotéticos de condutividade hidráulica a partir de simulação com variáveis fixadas. ....</i>   | <i>87</i> |
| <i>Tabela 51. Resultados hipotéticos de condutividade hidráulica em m/s a partir de simulação com variáveis fixadas. ....</i>  | <i>89</i> |
| <i>Tabela 52. Classificação de magnitudes da condutividade hidráulica (adaptado de Freeze &amp; Cherry 1996 e Fetter 1994). ....</i>   | <i>97</i> |



## ÍNDICE DE EQUAÇÕES

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Equação 1. Lei de Darcy.....</i>                                 | <i>10</i> |
| <i>Equação 2. Condutividade vertical em superfície.....</i>         | <i>13</i> |
| <i>Equação 3. Condutividade vertical em profundidade.....</i>       | <i>14</i> |
| <i>Equação 4. Condutividade - Método da Vazão.....</i>              | <i>16</i> |
| <i>Equação 5. Condutividade - Método de Hvorslev. ....</i>          | <i>17</i> |
| <i>Equação 6. Condutividade - Método de Bouwer &amp; Rice. ....</i> | <i>17</i> |
| <i>Equação 7. Condutividade - Método de Cooper et al. ....</i>      | <i>18</i> |



## RESUMO

A determinação da condutividade hidráulica de meios não saturados e saturados, em pesquisas hidrogeológicas, é uma atividade cotidiana, tanto para estudos acadêmicos quanto para trabalhos práticos. Esse parâmetro hidrodinâmico é obtido por medidas *in situ*, para os meios não saturados são aplicadas as metodologias dos anéis concêntricos e *open end hole* e para a zona saturada são comumente utilizados o *slug test* ou *bail test*.

Para a determinação da condutividade hidráulica, a obtenção dos dados de campo pode ser realizada de diferentes maneiras e o tratamento desses dados pode ser efetuado pelo uso de diferentes equações, gerando muitas vezes, resultados contraditórios ou totalmente desvinculados da realidade dos sistemas aquíferos estudados.

Esta pesquisa procurou avaliar as metodologias de obtenção dos dados em campo e a melhor solução para o conjunto de dados para estimação da condutividade hidráulica em diferentes meios (intergranular com grãos simples, intergranular com estruturação, fraturado e saprolitos de materiais pelíticos e graníticos), na zona vadosa e na zona saturada.

Foram realizados ensaios de infiltração *in situ* para a zona não saturada e *slug test* para a zona saturada, em poços de monitoramento no Distrito Federal e no sul do estado do Tocantins. Os dados foram obtidos manualmente e automaticamente (com uso de transdutor de pressão) e foram tratados por meio de planilhas eletrônicas e por *softwares* comerciais, utilizando-se quatro soluções matemáticas intituladas métodos da vazão; de *Hvorslev*; de *Bouwer & Rice* e de *Cooper et al.*

Para a zona não saturada observou-se que a estruturação dos solos e a biopedoturbação são fatores fundamentais no controle da condutividade hidráulica. As variações em diferentes solos e em horizontes distintos do mesmo perfil são decorrentes da textura, selecionamento e granulometria dos diferentes materiais.

Para a zona saturada, os diferentes métodos para determinação da condutividade hidráulica, podem resultar em contrastes superiores a 100 vezes. Para os resultados obtidos nesta pesquisa, observou-se que o Método da Vazão pode ser aplicado para responder questões nas quais não se tem acesso aos parâmetros construtivos ou descritivos do poço em estudo. Porém, deve-se avaliar os resultados com cuidado, pois a equação tende a superestimar os valores de condutividade hidráulica.

Os resultados obtidos nos ensaios do tipo *Slug test* somados a avaliação dos resultados dos ensaios de infiltração e às características físicas dos meios e dos materiais presentes em cada meio, levam a considerar que os dados tratados pelo método de *Hvorslev* indicam valores de condutividade hidráulica mais próximos dos esperados para os meios estudados.

Os resultados mostram que ensaios do tipo *Slug Test* podem ser realizados de forma manual, sem necessariamente se dispor de um transdutor de pressão, desde que sejam tomados cuidados especiais como repetir o experimento quando não se tem segurança de que a máxima elevação tenha sido medida e avaliar os intervalos de tempo entre cada medida (de forma que se tenha uma escala aproximadamente logarítmica do rebaixamento *versus* tempo).

Os estudos de campo desenvolvidos neste trabalho mostram que a introdução de um volume de água é mais conveniente que o uso de uma barra para elevação do nível d'água. Este procedimento é viável em casos em que o poço penetra apenas uma reduzida seção da zona saturada, facilita a repetição do ensaio com volumes sucessivamente maiores e permite eliminar mais facilmente os efeitos construtivos sobre os resultados de condutividades hidráulicas obtidos.

## ABSTRACT

The determination of the hydraulic conductivity of saturated insaturated media for hydrogeologic research is a frequent activity, to academic studies and for practical works. This hydrodynamic parameter is determined by *in situ* measures, for the insaturated zone the concentric rings and open end hole methodologies are applied and for the saturated zone the slug and bail test is commonly used.

To the determination of the hydraulic conductivity the field data attainment can be carried out by different ways and the treatment of these data can be developed by the use of different equations, generating contradictory results and some times results totally disconnected to the reality of the studied aquifers systems.

This research looked for the evaluation of the methodologies for field data acquisition and the best solution for the data set for estimation of hydraulic conductivity in different media (sandy-gravel material, structured tropical soils, broken and granite and siltstone saprolite), in the vadose and in the saturated zone.

It was developed *in situ* infiltration tests to the saturated and not saturated zones in soils and monitoring wells in the Federal District and south Tocantins State regions (Brazil). The data were obtained by hand and automatically (with a pressure transducer advice) and were treated by Microsoft Excel and by hydrogeology commercial software using four mathematical solutions: the Yield Method, Hvorslev, Bouwer & Rice and Cooper et al.

For the not saturated zone it was observed that the structured of soils and bioturbation are basic factors in the control of the hydraulic conductivity. The differences in soil types and in different horizons of the same soil profile are due to the texture, grain size and compaction of the different materials.

For the saturated zone the different methods for determining the hydraulic conductivity, can result in contrasts over 100 times. By the results of this research, it was observed that the Yield Method can be applied to answer questions where the constructive or descriptive parameters of the well are not known. However, the results must be evaluated with care, because this equation tends to overestimate the hydraulic conductivity values.

The results of the Slug type test added to the evaluation of the results of the *in situ* infiltration test and to the physical characteristics of the studied media, lead to consider that the data treated by the Hvorslev method indicate hydraulic conductivity values next to the waited for the studied materials.

The results show that the type Slug Test can be carried out by manual form, without necessarily making use of a pressure transducer device, since some special care are considered as the repetition of the experiment when the maximum rise are not well measured and to evaluate the time intervals between each measure (in an approximately logarithmic scale of the drawdown versus time).

The studies developed in this work show that the introduction of a water volume in the well is more convenient than the use of a slug for rising of the water level. This procedure is viable in cases where the well penetrates only one reduced section of the saturated zone, facilitates the repetition of the test with successively larger volumes and allows to more easily eliminate the well constructive effect on the results of hydraulic conductivity.

## CAPÍTULO I - APRESENTAÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 1.1. INTRODUÇÃO

A determinação da condutividade hidráulica de meios não saturados e saturados, em hidrogeologia, é uma atividade cotidiana, tanto em estudos acadêmicos quanto em trabalhos práticos.

Muitas vezes a única maneira para se obter esse importante parâmetro hidrogeológico é por meio dos denominados métodos *in situ*. Em meios não saturados, são utilizados os métodos dos anéis concêntricos e *open end hole*, respectivamente para a determinação da condutividade vertical em superfície e em profundidade.

Para a zona saturada os mais comuns são os métodos chamados genericamente *slug test* ou *bail test*. O problema é que a obtenção dos dados pode ser realizada de diferentes modos e o tratamento dos dados obtidos em campo pode ser feito com auxílio de diferentes equações, gerando resultados muitas vezes contraditórios ou totalmente desvinculados dos sistemas aquíferos em estudo.

Dada a importância dos métodos de campo em hidrogeologia, a facilidade de obtenção dos dados e o baixo custo de operação das diversas técnicas, é fundamental que, estudos visando a adequação de seus resultados sejam realizados de forma a se dar maior confiabilidade aos diferentes estudos hidrogeológicos.

Esses estudos hidrogeológicos são aplicados à remediação de aquíferos contaminados, locação de cemitérios, aterros e indústrias potencialmente poluentes, estudos em ensaios de traçadores, e demais pesquisas que envolvem a zona saturada dos diferentes sistemas aquíferos.

#### 1.1.1. Objetivos

O principal objetivo desta pesquisa é avaliar as metodologias de obtenção dos dados em campo e a melhor solução para o conjunto de dados para estimação da condutividade hidráulica em diferentes meios hidrogeológicos.

Como objetivo secundário buscou-se otimizar as formas de tratamento dos dados obtidos em campo, visando ampliar a confiabilidade dos valores de condutividade obtidos em ensaios *in situ*.

Foram testadas diferentes formas de obtenção dos dados em campo, diferentes meios hidrogeológicos (aquíferos intergranulares e fraturados), na zona vadosa e na zona saturada, em diferentes localidades.

### 1.1.2. Justificativas

Esta pesquisa hidrogeológica aplicada visou preencher uma lacuna ainda existente para se otimizar a obtenção de dados coletados em campo e seu tratamento, de forma a se ampliar a confiabilidade de resultados de métodos para a estimação da condutividade hidráulica de diferentes meios hidrogeológicos.

Além dos métodos tipo *Slug* e *Bail* teste e de infiltração *in situ*, existem outras formas para a estimativa dos valores de condutividade hidráulica, incluindo ensaios de bombeamento (para a zona saturada) e estudos a partir das curvas granulométricas e amostras indeformadas (para a zona não saturada).

De forma geral, os poços de monitoramento não dispõem de ensaios de bombeamento completos de longa duração, pois não apresentam vazão adequada ou em função de seu pequeno diâmetro (comumente de 2 polegadas), que não permite instalação de bombas. Estudos a partir de análises granulométricas, por exemplo, método de Hazen (Hazen 1911), não são aplicados para solos tropicais em função da formação de agregados de partículas de silte e argila (formação da estruturação dos solos).

Nestes casos, solos de textura muito argilosa com estruturação granular comum, resultam em valores muito reduzidos de condutividade hidráulica obtidos pelo método de Hazen e valores da ordem de  $10^{-5}$  m/s quando obtidos por ensaios *in situ*, uma vez que a estruturação resulta na formação de uma ampla macro-porosidade do solo (Gaspar *et al.* 2007).

O uso de amostras indeformadas também é pouco usual em função da grande dificuldade e custo de retirada deste tipo de amostras de solos e outros corpos de prova. Neste caso, há a vantagem de se realizar ensaios de condutividade hidráulica horizontal e vertical, entretanto a obtenção de amostras de materiais inconsolidados (solos) é apenas viável na superfície ou próximo dela. Para amostras de rocha os ensaios são apenas possíveis em testemunhos de sondagens rotativas, os quais, em função do elevado custo, são pouco usuais nos estudos hidrogeológicos.

Em maciços rochosos fraturados ou intergranulares a condutividade hidráulica pode ser obtida a partir de ensaios de perda d'água sob pressão onde os dados são aplicados em equações adequadas para este tipo de meio. A aplicabilidade deste tipo de método é apenas limitada a sítios de obras civis nas fases de construção e tratamento de fundações, pois requer sondagens rotativas, uso de compressores, além de técnicos experientes.

Assim, fica claro que os ensaios de infiltração *in situ* e testes do tipo *Slug* e *Bail* apresentam maiores vantagens, pois, são de fácil realização em campo, de baixo custo, possibilidade de replicação, versatilidade no tratamento dos dados, possibilidade de

desenvolvimento em grande número de pontos (para avaliação estatística e de possíveis anisotropias), dentre outros aspectos.

Estes tipos de ensaios também apresentam limitações como variações em função da mudança da umidade (nos casos de determinação da condutividade hidráulica na zona vadosa), impossibilidade de determinação do coeficiente de armazenamento (nos casos de estudos na zona saturada) e incertezas dos resultados obtidos em casos em que os perfis construtivos dos poços não são conhecidos.

Outra questão importante que justifica o desenvolvimento da presente pesquisa é o fato de que os mesmos dados submetidos a diferentes métodos de tratamento resultam em valores contrastantes, os quais podem diferenciar em até 3 ordens de grandeza (1000 vezes).

A determinação do melhor método para cada tipo de técnica de obtenção em campo ou para cada tipo de meio aquífero (intergranular em sedimentos arenosos, intergranular em solos, fraturados, etc) é fundamental para a otimização do uso destes métodos de determinação de condutividade hidráulica.

### **1.1.3. Localização das Áreas de Estudo**

O trabalho foi desenvolvido em baterias de poços de monitoramento situados no Distrito Federal e no sul do estado do Tocantins. Os mapas das Figuras 1 e 2 mostram a situação das áreas em que foram realizados os diversos ensaios de campo. A escolha destas localidades se deveu à disponibilidade de número expressivo de poços, com perfil construtivo conhecido e com perfil descritivo também disponível.

## **1.2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Em 1856, o engenheiro francês Henry Darcy formulou a primeira teoria referente ao fluxo das águas subterrâneas. Darcy mostrou que o escoamento da água através de uma coluna de areia saturada é proporcional à diferença de carga hidráulica nos extremos da coluna e inversamente proporcional ao comprimento da coluna.

Ou seja, o fluxo que atravessa a coluna de areia, em seu experimento, era diretamente proporcional à área  $A$  de sua seção transversal, à diferença de carga piezométrica ( $h_0-h$ ) e inversamente proporcional ao comprimento  $L$  da coluna de areia.

$$Q = K.A \frac{(h_0 - h)}{L} \quad \text{Equação 1. Lei de Darcy.}$$

A Lei de Darcy é utilizada ainda hoje como princípio básico do escoamento das águas subterrâneas.

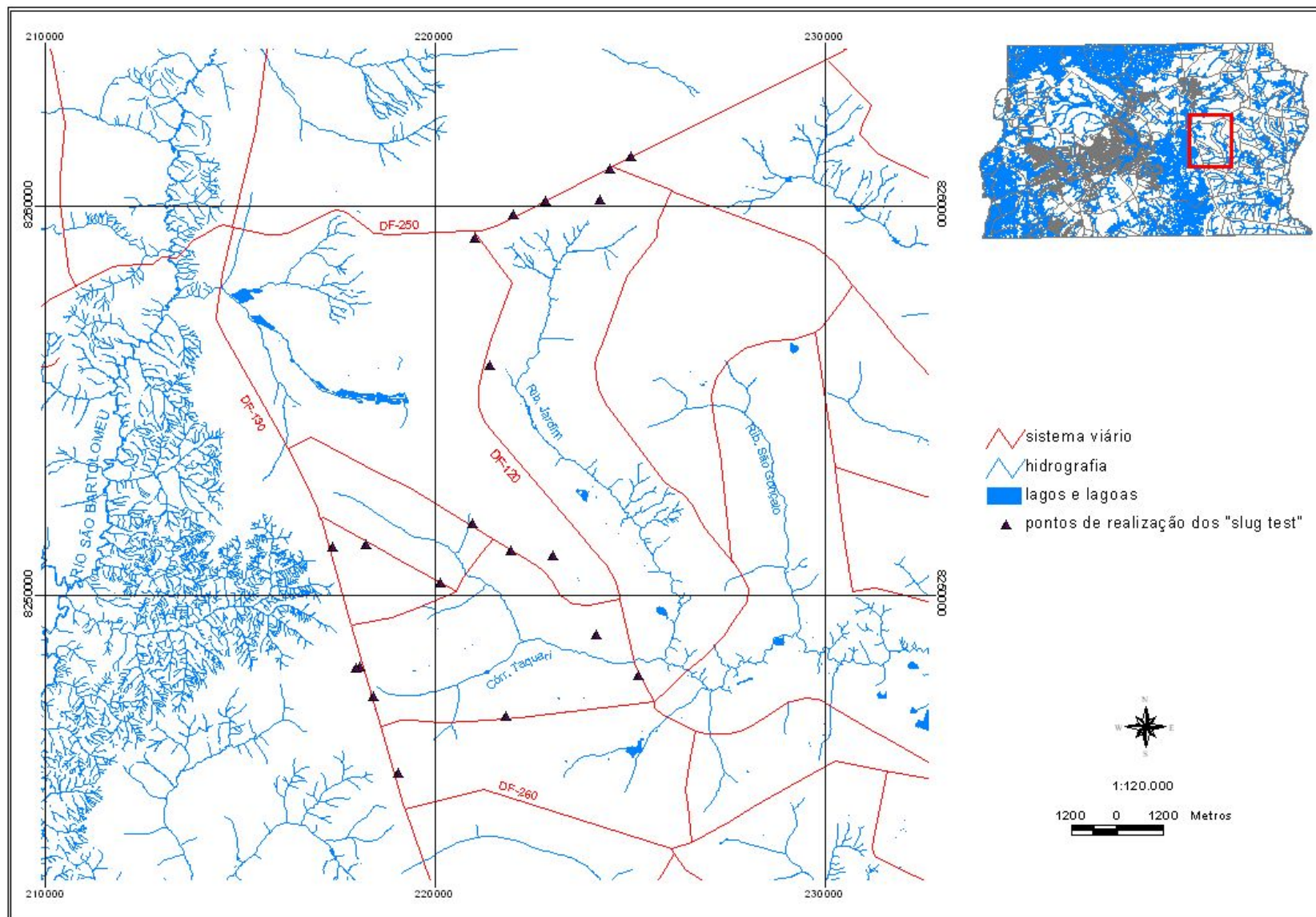


Figura 1. Mapa de localização dos pontos de amostragem na Área I, no Distrito Federal.

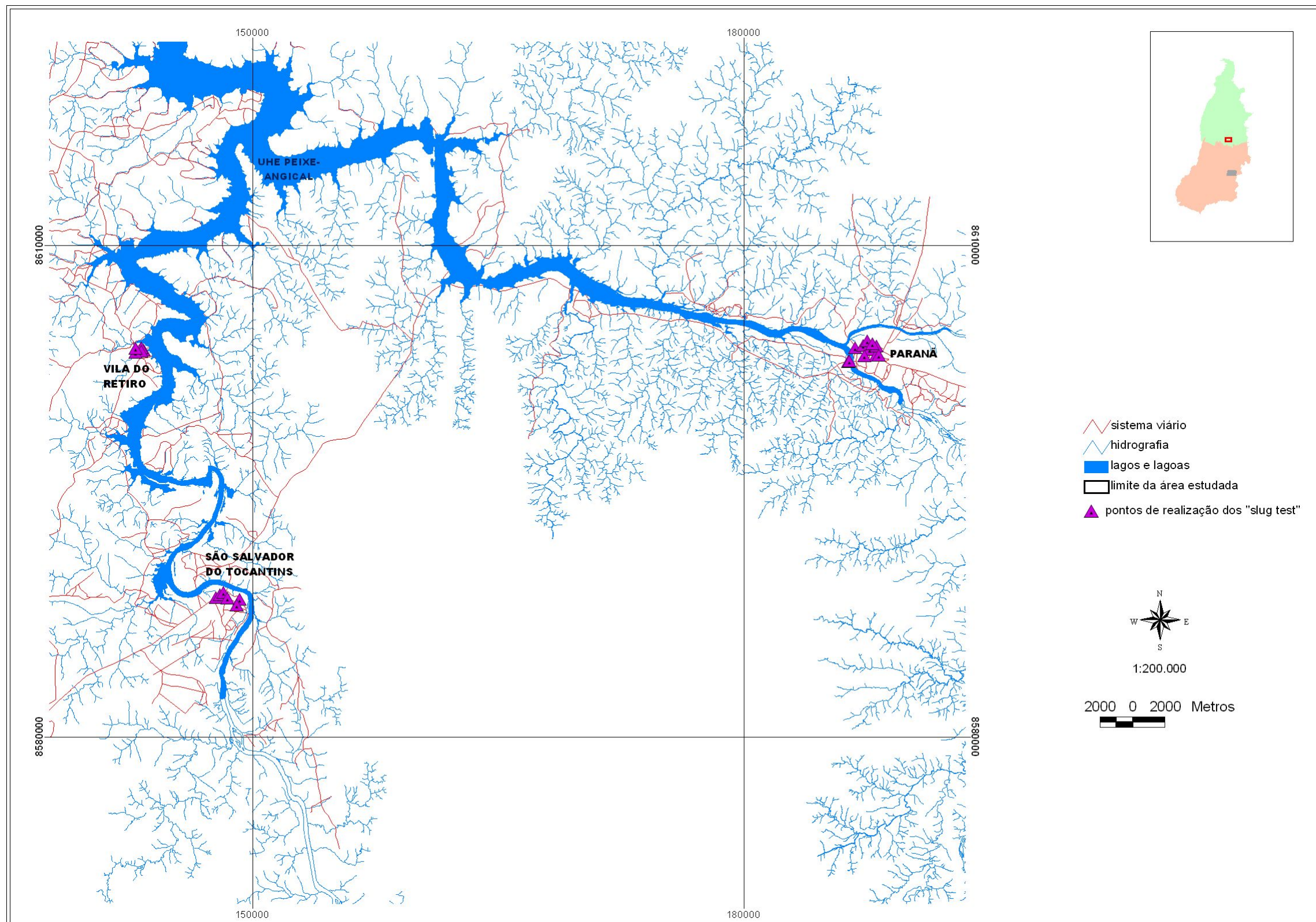


Figura 2. Mapa de localização dos pontos de amostragem na Área II, no estado do Tocantins.

### 1.2.1. Ensaio de Infiltração

Para a determinação de valores de condutividades hidráulica vertical na superfície e em profundidades crescentes (até 260 cm), na zona não saturada, aplica-se o método do infiltrômetro de anéis concêntricos e o método denominado *open end hole*.

Para o método dos anéis concêntricos, utilizam-se dois cilindros dispostos de forma concêntrica, que são cravados alguns centímetros no solo para impedir a dispersão lateral da água inserida (Figura 3). Mede-se a seção do cilindro abaixo da superfície do solo, resultando no valor de  $I$ . Inicialmente, preenche-se com água o cilindro externo até a estabilização do nível (quando o solo fica saturado).

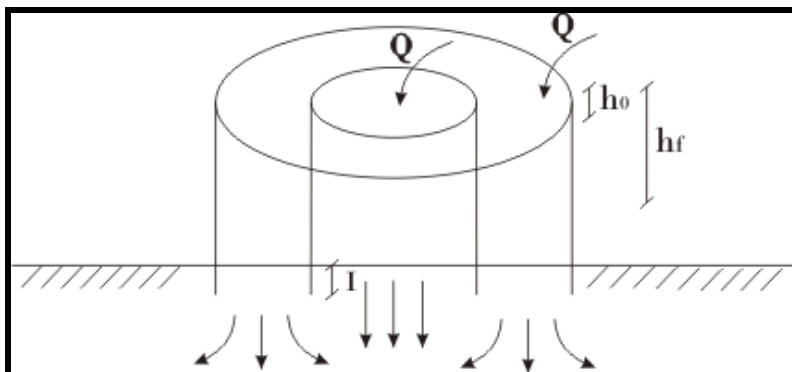
O objetivo desse procedimento é garantir a verticalidade do fluxo, gerando uma parede de umidade em torno do cilindro interno. Posteriormente, preenche-se com água o cilindro interno e adquire-se a medida entre a lâmina d'água e o topo deste cilindro, obtendo-se o parâmetro  $M_i$  (medida inicial). Mede-se a altura total do cilindro ( $H=250$  mm) para se obter a altura da coluna d'água inicial ( $H_i = H - I - M_i$ ).

O tempo de duração dos ensaios varia em decorrência de variações da condutividade hidráulica do meio. Na finalização, obtém-se novamente a distância entre o topo do cilindro e o nível da água, resultando na medida final ( $M_f$ ) e, conseqüentemente, a coluna d'água final ( $H_f = H - I - M_f$ ).

A condutividade vertical ( $K_v$ ) em superfície, para método com carga variável, é obtida com auxílio da fórmula:

$$K = U \times \frac{I}{\Delta t} \times \ln\left(\frac{h_0}{h}\right) \quad \text{Equação 2. Condutividade vertical em superfície.}$$

Onde,  $I$  = profundidade de cravação,  $h_0$  = coluna d'água inicial,  $h$  = coluna d'água final,  $\Delta t$  = tempo de decorrido para o rebaixamento entre  $h_0$  e  $h$  e,  $U$  = fator de conversão de unidades, para passar mm/min para m/s, expresso na fórmula como 1/60000.



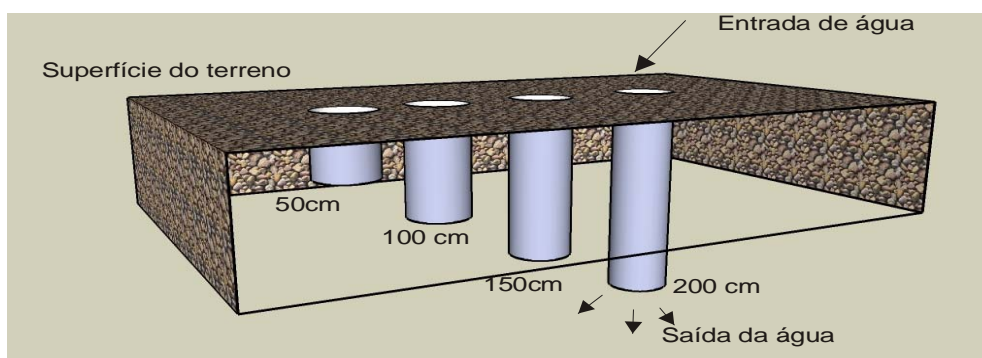
**Figura 3.** Esquema do método dos anéis concêntricos para ensaios de infiltração.  $I$  - seção cravada no solo,  $h_0$  - distância do nível d'água inicial à superfície do terreno,  $h_f$  - distância do nível d'água final à superfície do terreno e  $Q$  - volume de água inserido.



Para a execução do método *open end hole* estabelece-se investigações a diferentes profundidades, visando se buscar informações, sempre que possível, a 50, 100, 150 e 200 cm (Figura 4). São feitos furos utilizando-se trados manuais, sendo colocados, em cada um deles, tubos de PVC com diâmetro adequado para revestir o furo de trado e comprimentos variando conforme as profundidades anteriormente mencionadas.

Os tubos devem ser perfeitamente cravados no solo para se evitar a dispersão lateral da água a ser inserida. Toma-se a medida do parâmetro H (distância entre o topo do tubo e o fundo do furo). Posteriormente, preenche-se o tubo com água e mede-se a distância inicial entre o topo e o nível de água ( $M_i$ ) resultando na altura da coluna d'água inicial ( $h_0 = H - M_i$ ).

Para finalizar, mede-se a nova posição da lâmina d'água ( $M_f$ ), obtendo-se a altura da coluna d'água final ( $h = H - M_f$ ). O tempo decorrido ( $\Delta t$ ) para a coluna d'água variar de  $h_0$  para  $h$  também deve ser medido.



**Figura 4.** Ilustração esquemática do método *open end hole* para ensaios de infiltração *in situ*.

A condutividade hidráulica vertical ( $K_v$ ) em profundidade, utilizando-se carga variável, é obtida com a aplicação da fórmula:

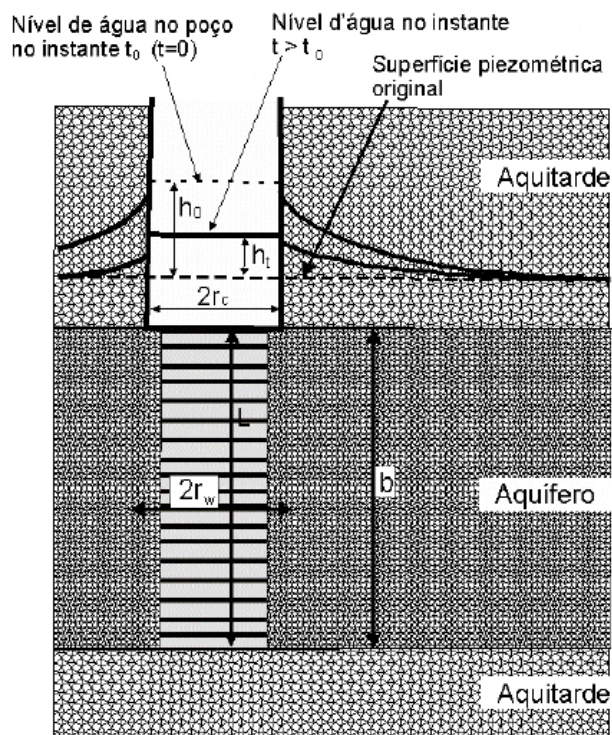
$$K_v = 2,303 \times \left( \frac{R}{4\Delta t} \right) \times \left[ \log \left( \frac{h_0}{h} \right) \right] \quad \text{Equação 3. Condutividade vertical em profundidade.}$$

Onde, R = raio do tubo,  $h_0$  = coluna d'água inicial, h = coluna d'água final,  $\Delta t$  = tempo decorrido para o rebaixamento entre  $h_0$  e h.

### 1.2.2. Slug Test

Para a determinação de parâmetros hidráulicos de poços (de observação ou de exploração de recursos hídricos subterrâneos) e caracterização das propriedades hidrogeológicas do aquífero, pode-se realizar o ensaio de recuperação de nível denominado *Slug test*.

Esse tipo de teste, realizado na zona saturada, consiste, basicamente, no lançamento de um volume conhecido de água ou objeto com volume conhecido, no poço em estudo e a observação das condições para recuperação do nível estático inicial, como ilustra a Figura 5.



**Figura 5.** Perfil esquemático de um poço hipotético mostrando a evolução de *slug test*. (onde “ $r_w$ ” é o raio de perfuração do poço, “ $r_c$ ” é o raio do revestimento do poço, “ $b$ ” é a espessura do aquífero).

Os ensaios podem avaliar a elevação e o tempo para recuperação ou o rebaixamento e, o tempo e condições para retorno às condições originais (nível estático). Assim, é fundamental que o nível estático seja medido previamente ao início do ensaio.

As medições do nível podem ser realizadas manualmente, com auxílio de medidores de nível ou automaticamente, com auxílio de um transdutor de pressão (acoplado a um computador).

O *slug test* muitas vezes é associado a outro ensaio; o *bail test*, considerando que um volume de água conhecido pode ser retirado instantaneamente, sendo retirado no início do teste gerando rebaixamento no nível estático do poço, a recuperação desse nível pode ser acompanhada, obtendo-se assim, também um valor de condutividade. O *bail test* é ilustrado na Figura 6.

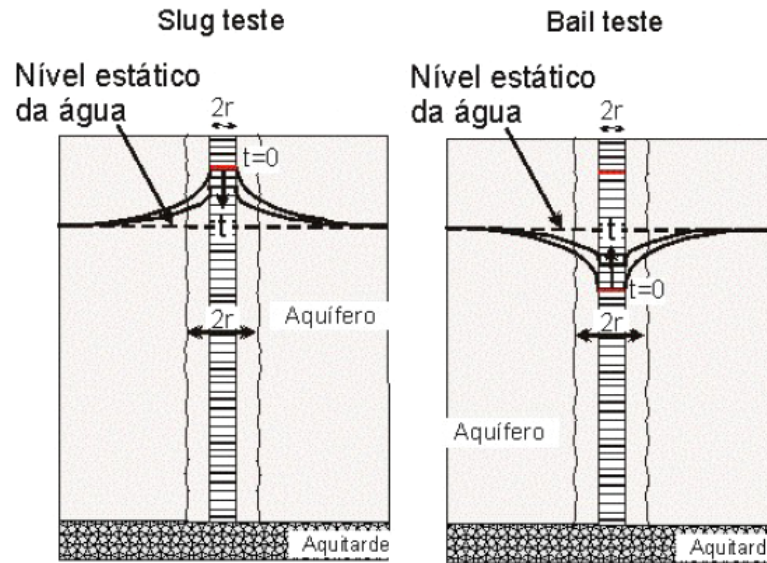


Figura 6. Ilustração da aplicação de ensaio tipo *Slug test* e *Bail Test*.

### Tratamento dos Dados de Campo

Para a etapa de tratamento dos dados obtidos em campo foram aplicados dois métodos: utilizando-se planilhas eletrônicas do programa *Microsoft Excel 2003* e por meio do *software* comercial *Aquifer Test Pro* (versão 4.0, *Schlumberger Ltd.*).

No tratamento por meio de planilhas eletrônicas, todos os dados foram organizados em planilhas eletrônicas, que foram utilizadas para alimentação das fórmulas determinadas pelos métodos da vazão, de *Hvorslev* e *Bouwer & Rice*, que serão descritos a seguir. Posteriormente, foram gerados os gráficos de rebaixamento *versus* tempo, para melhor visualização das curvas do rebaixamento. Por fim os dados obtidos foram tratados nas fórmulas dos métodos anteriormente citados.

No tratamento por meio do programa *Aquifer Test Pro* foram utilizados os métodos de *Hvorslev*, *Bouwer & Rice* e *Cooper-Bredehoeft-Papadoulos*. Para isso, os dados foram distribuídos em tabelas formato txt, que posteriormente foram utilizadas para alimentar a base de dados que foi aplicada ao programa.

### Método da Vazão

A condutividade hidráulica segundo a “função da vazão” é obtida segundo a fórmula descrita a seguir (modificado de ABGE 1996):

$$K = \frac{Q}{5,5\Delta hr} \quad \text{Equação 4. Condutividade - Método da Vazão.}$$

Onde,  $K$  = condutividade hidráulica (m/s);  $Q$  = vazão medida a partir do volume de água lançado e tempo de ensaio, (m<sup>3</sup>/s),  $5,5$  = constante empírica obtida para normalizar a equação e adequação das unidades,  $\Delta h$  = variação da carga hidráulica inicial e final do teste e  $r$  = raio do revestimento do poço de observação testado (m).

Neste método, apenas o raio de revestimento do poço é considerado no tratamento dos dados. Este fato permite que este método seja aplicado para estudos em poços de monitoramento em que tais parâmetros não são conhecidos, entretanto resultados contrastantes podem ser gerados.

#### Método de Hvorslev

Método aplicado para aquíferos confinados e livres, homogêneos, isotrópicos, de espessura uniforme, baixo gradiente hidráulico. A fórmula proposta por *Hvorslev* (1951) é descrita da seguinte forma:

$$K = \frac{r^2 \ln(L/R)}{2LT_L} \quad \text{Equação 5. Condutividade - Método de Hvorslev.}$$

$$\text{Onde: } T_L = \frac{\pi^2}{FK} \quad \text{e} \quad FK = \pi^2 \frac{dr}{dt}$$

Onde,  $r$  = raio do revestimento (m),  $L$  = comprimento da seção de filtro (m),  $R$  = raio contínuo de interferência do poço de observação e  $T_L$  = tempo para 37% de recuperação.

O método pressupõe que: o aquífero é semiconfinado, não drenante, com extensão lateral infinita, homogêneo, isotrópico de espessura uniforme; o lençol freático é horizontal antes do teste; a injeção ou retirada do volume de água resulta em uma mudança instantânea no nível da água; a inércia da coluna de água e perdas não-lineares são insignificantes; o poço é totalmente ou parcialmente penetrante; o poço é considerado de uma largura infinitesimal e que o fluxo é horizontal em direção ou distante do poço.

#### Método de Bouwer & Rice

Utilizado para aquíferos livres, podendo também ser aplicado para aquíferos confinados, desde que a base da camada confinante fique consideravelmente acima do filtro do poço. A solução analítica proposta por *Bouwer & Rice* (1976) é descrita como se segue:

$$K = \frac{r^2 \ln(R_e/R)}{2L} \frac{1}{t} \ln\left(\frac{h}{h_0}\right) \quad \text{Equação 6. Condutividade - Método de Bouwer & Rice.}$$

Onde,  $r$  = raio do revestimento,  $L$  = comprimento da seção de filtro,  $R_e$  = raio efetivo de dissipação da carga hidráulica,  $h_0$  = elevação no tempo  $t = 0$ ,  $h$  = elevação no tempo  $t = t$  e  $t$  = tempo;  $R$  = raio da perfuração do poço.

Esta solução pressupõe o seguinte: o aquífero é livre ou semiconfinado drenante (com drenagem vertical de cima para baixo) com extensão infinita, homogêneo, isotrópico, de espessura uniforme; o lençol freático é horizontal antes do teste; a mudança da carga hidráulica no início do teste é instantânea; a inércia da coluna de água e perdas não-lineares são insignificantes, o poço é total ou parcialmente penetrante, o armazenamento do poço não é desprezível, portanto, é levado em consideração, o fluxo para o poço está em um estado estacionário e que não há fluxo acima do lençol freático.

#### Método de Cooper-Bredehoeft-Papadoulos (Cooper et al.)

Utilizado em aquíferos confinados e em poços com grandes diâmetros. Esta solução analítica é a proposta por Cooper-Bredehoeft-Papadoulos (1967) que é descrita como se segue:

$$s = \frac{2Ho}{\pi} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{\beta u^2}{\alpha}\right) \left( J_0\left(\frac{ur}{r_c}\right) [uY_0(u) - 2\alpha Y_1(u)] - Y_0\left(\frac{ur}{r_c}\right) [uJ_0(u) - 2\alpha J_1(u)] \right) \left( \frac{1}{\Delta(u)} \right) du$$

Equação 7. Condutividade - Método de Cooper et al.

Onde,  $\Delta(u) = [uJ_0(u) - 2\alpha J_1(u)]^2 + [uY_0(u) - 2\alpha Y_1(u)]^2$

$$\alpha = \left( r_w^2 S \right) / r_c^2 \quad \text{e} \quad \beta = (Tt) / r_c^2$$

e  $h_0$  = mudança da carga hidráulica inicial em função da injeção ou retirada da água,  $r$  = distância radial entre o poço de observação e um ponto no cone de depressão radial,  $r_c$  = raio efetivo do poço,  $r_w$  = raio efetivo do poço na seção de filtro,  $T$  = transmissividade,  $S$  = coeficiente de armazenamento,  $t$  = tempo,  $J_0$  = ordem zero da função de Bessel de primeiro tipo,  $J_1$  = primeira ordem da função de Bessel de primeiro tipo,  $Y_0$  = ordem zero da função de Bessel de segundo tipo,  $Y_1$  = primeira ordem da função de Bessel de segundo tipo.

O método pressupõe o seguinte: o aquífero é isotrópico, homogêneo, compressível e elástico; as camadas são horizontais e estendem-se infinitamente na direção radial; a superfície piezométrica inicial (antes da injeção) é horizontal e se estende infinitamente na direção radial, o aquífero é delimitado acima e abaixo por aquícludes; a lei de Darcy é válida para o domínio de fluxo principal; o poço tem seção de filtro totalmente dentro da zona saturada, o poço é totalmente penetrante, o volume de água é injetado ou retirado instantaneamente no tempo  $t = 0$ .

## CAPÍTULO II - CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS ESTUDADAS

### 2.1. DISTRITO FEDERAL

#### 2.1.1. Contexto Geológico

O Distrito Federal está inserido na Faixa de Dobramentos Brasília no domínio da Província Estrutural Tocantins. No Distrito Federal, estão expostas rochas atribuídas aos grupos Canastra, Paranoá, Araxá e Bambuí, os quais apresentam idades proterozóicas (grupos Canastra e Paranoá ~ 1.100 milhões de anos e grupos Araxá e Bambuí ~ 650 milhões de anos).

Os poços estudados estão concentrados na bacia do rio Jardim, no quadrante sudeste do Distrito Federal, onde ocorrem rochas atribuídas aos grupos Canastra, Paranoá e Bambuí, que são descritas a seguir.

#### *Grupo Canastra*

O conjunto de rochas que corresponde ao Grupo Canastra aflora, continuamente, por toda porção sul da Faixa Brasília, desde o sudeste de Minas Gerais até a região sudeste de Goiás e Distrito Federal, na porção centro norte da Faixa Brasília (Barbosa 1955, Barbosa *et al.* 1969, Almeida 1967, Freitas-Silva & Dardenne 1994, Freitas-Silva 1996 e outros).

Esta unidade litoestratigráfica é composta por metassedimentos de baixo grau representados, essencialmente, por quartzitos, quartzitos micáceos, filitos sericíticos e cloríticos, além de lentes de mármore puros e impuros. Esta unidade litoestratigráfica ocorre em contato tectônico por falhas de empurrão com os grupos Paranoá, Bambuí e Vazante.

O Grupo Canastra foi subdividido em três formações: Serra do Landim, Paracatu e Chapada dos Pilões (Figura 7). A Formação Paracatu comporta dois membros: Morro do Ouro e Serra da Anta. Da mesma maneira a Formação Chapada dos Pilões é dividida em dois membros: Serra da Urucânia e Serra da Batalha (Freitas-Silva & Dardenne 1994 e Freitas-Silva 1996).

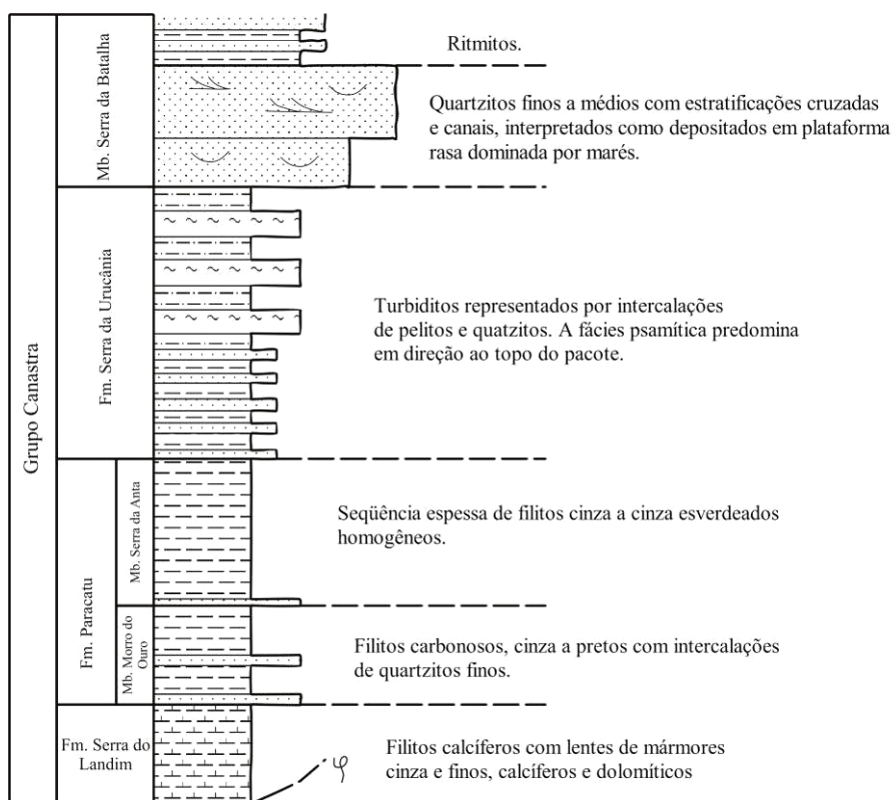


Figura 7. Estratigrafia do Grupo Canastra, conforme Freitas-Silva & Dardenne (1994).

### Grupo Paranoá

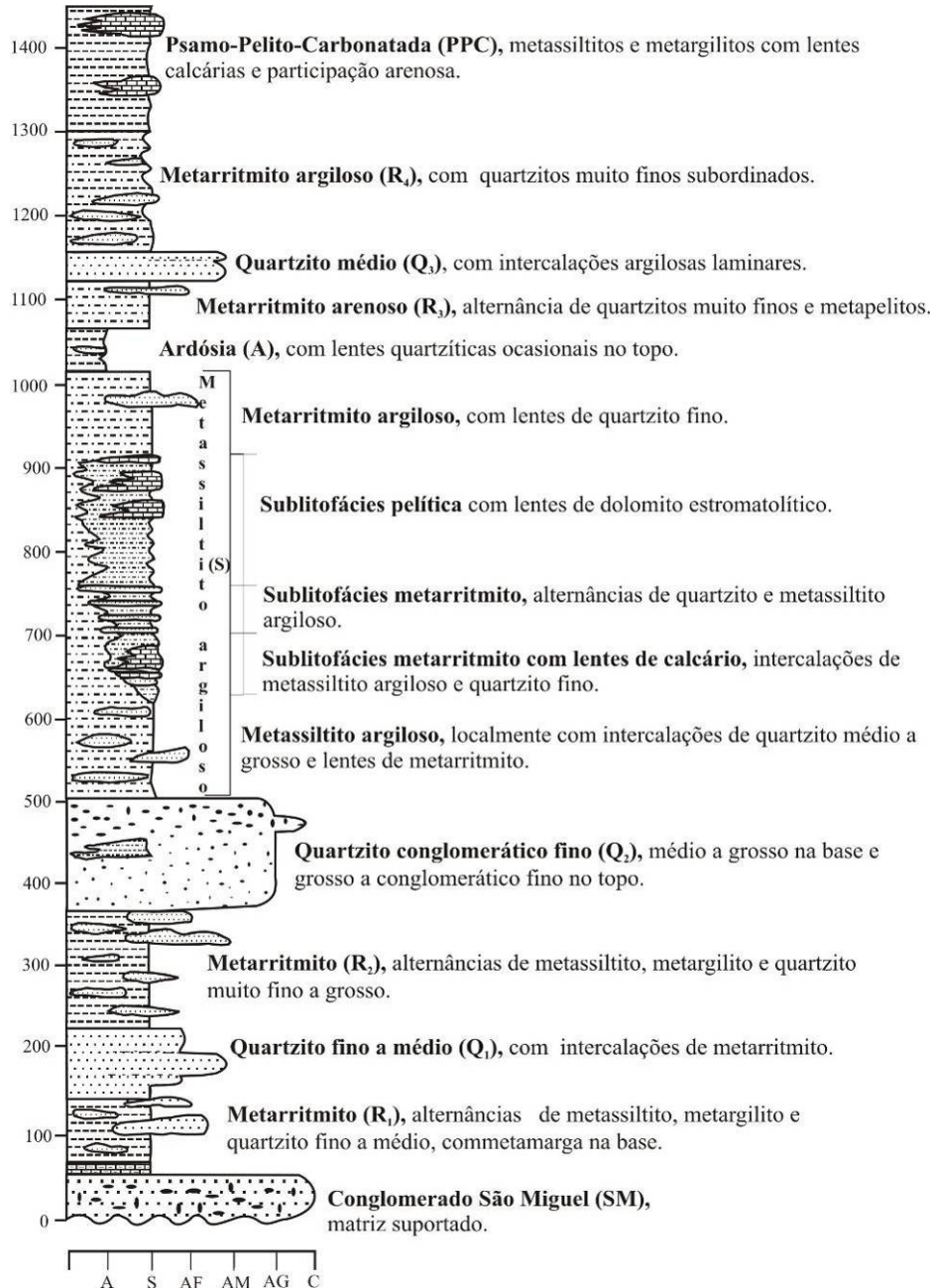
O Grupo Paranoá corresponde a uma unidade psamo-pelito-carbonatada, que se estende em direção ao norte do Distrito Federal até a região de Alto Paraíso de Goiás (Dardenne 1978, Fuck *et al.* 1988, Faria 1985 e 1989 e Freitas-Silva & Campos 1998).

Faria (1995), propõe uma coluna integrada para o Grupo Paranoá, que pode ser correlacionada, regionalmente, na porção mais externa da Faixa Brasília. Está subdividida em 11 litofácies com status de formação, agrupadas em quatro megaciclos sedimentares; os dois primeiros transgressivos, o terceiro regressivo e o último também transgressivo, denominadas pelas letras-código, da base para o topo: **SM, R<sub>1</sub>, Q<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, Q<sub>2</sub>, S, A, R<sub>3</sub>, Q<sub>3</sub>, R<sub>4</sub>, PPC** (Figura 8).

No Distrito Federal, ocorrem as seis unidades do topo, sendo suas principais características descritas a seguir:

- Unidade **S**: é representada por metassiltitos argilosos de aspecto maciço e cor cinza esverdeado. Em direção ao topo, intercalações rítmicas de bancos centimétricos de quartzitos finos a médios, níveis milimétricos de materiais sílticos e argilosos são frequentes. Na unidade **S**, localmente são comuns lentes de calcários e dolomitos estromatolíticos de dimensões variadas;
- Unidade **A**: mostra contato transicional com a Unidade **S**, sendo constituída por ardósias cinza esverdeadas com cor de alteração vermelha característica, neste litotipo são observadas duas foliações representadas por clivagens ardosianas penetrativas;

- Unidade **R<sub>3</sub>**: corresponde a um metarritmito arenoso, caracterizado por intercalações de bancos decimétricos a métricos de quartzitos e materiais pelíticos, compostos por metassiltitos e ardósias. Localmente, são observados pacotes de até 10 m de espessura, que se destacam do conjunto rítmico;



**Figura 8.** Estratigrafia do Grupo Paranoá na área-tipo de Alto Paraíso de Goiás - São João D'Aliança. A - argila, S - silte, AF - areia fina, AM - areia média, AG - areia grossa e C - cascalho.

- Unidade **Q<sub>3</sub>**: composta por quartzitos brancos, finos, bastante silicificados, ricos em estratificações cruzadas tabulares e do tipo espinha de peixe, além de marcas onduladas assimétricas;

- Unidade **R<sub>4</sub>**: metarritmito argiloso, composto por intercalações de materiais sílticos e argilosos além de delgados estratos de quartzitos finos rosados a avermelhados;



- Unidade **PPC**: predominantemente pelítica, com ardósias e metassiltitos cinzas associados com lentes de mármore finos com estruturas algais tipo estromatólitos. São comuns leitões decimétricos a métricos lenticulares ou não, de quartzitos médios a grossos, apresentando tonalidades escuras.

### ***Grupo Bambuí***

O Grupo Bambuí constitui-se numa unidade estratigráfica formada por litofácies siliciclásticas e carbonáticas (químicas, bioquímicas e de retrabalhamento), depositadas sobre uma plataforma marinha epicontinental, no final do Neoproterozóico (700 - 600 Ma).

A distribuição geográfica do Grupo Bambuí, e correlatos, é ampla e contínua ao longo de uma expressiva faixa do Brasil Central. Ocorre ao longo de vastas áreas dos estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás e parte do Distrito Federal. Costa & Branco (1961) e Dardenne (1978, 1981) definiram uma estratigrafia clássica do Grupo Bambuí.

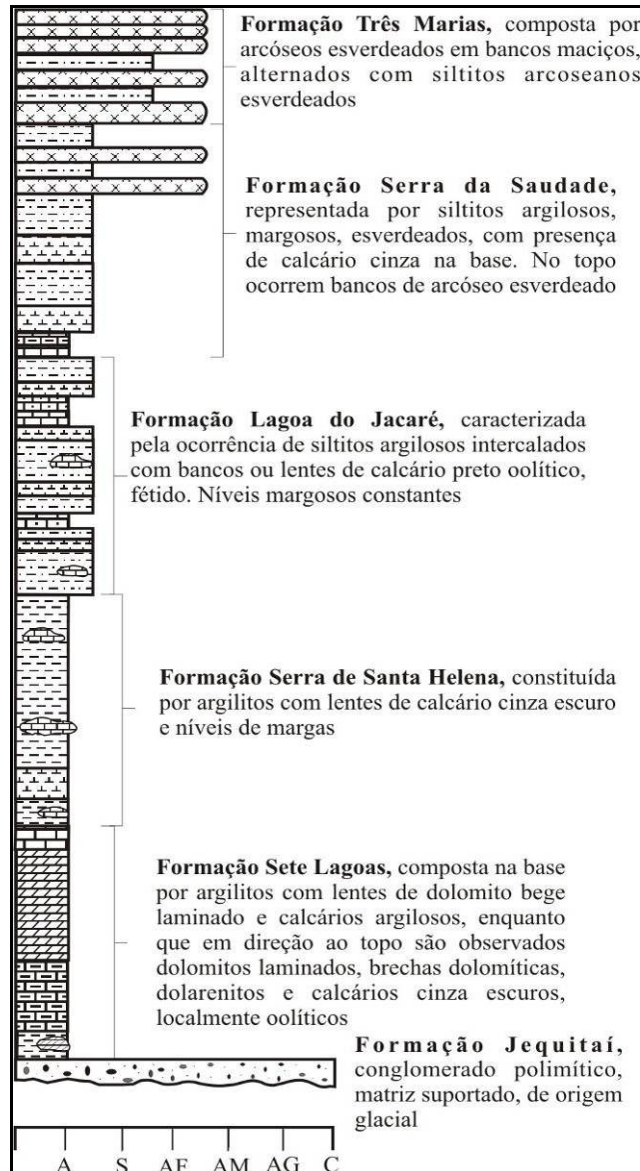
Atualmente, a coluna estratigráfica aplicável para o Grupo Bambuí foi proposta por Dardenne (1978), sendo composta, da base para o topo, pelas formações: Jequitaiá, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias. Esta sequência sedimentar foi depositada sobre uma plataforma estável epicontinental, sendo possível estabelecer uma evolução em três grandes ciclos regressivos (Figura 9).

Na região do Distrito Federal e entorno, este grupo é representado pelas formações Serra da Saudade e Três Marias:

- **Formação Serra da Saudade:** composta por metassiltitos, metargilitos e metafolhelhos, muito raramente contendo lentes de calcários. Na Faixa Brasília, região de Cedro do Abaeté-Quartel Geral (Minas Gerais), onde originalmente foi descrita, são observadas, na porção basal da unidade, pequenas ocorrências de fosforitos (Costa & Branco 1961; Bonhomme 1976 e Bonhomme et al. 1982). Na região de Patos de Minas, os metassiltitos/metargilitos verdes são ricos em potássio e fósforo, sendo localmente referidos como verdetes.

- **Formação Três Marias:** unidade superior, dominada por arenitos arcoseanos médios a finos, mostrando truncamentos de baixo ângulo e estratificação cruzada *hummocky*, intercalados em siltitos e ritmitos, depositados em plataforma siliciclástica dominada pela ação de ondas de tempestade (Chiavegatto 1992). Ocorre recobrimo o Subgrupo Paraopeba, sendo caracterizada por sua ampla distribuição e notável homogeneidade litológica e geoquímica (Chiavegatto & Gomes 1993, Guimarães 1993). É composta por metarcóseos, metarenitos arcoseanos, metassiltitos e intercalações subordinadas de rochas conglomeráticas (Costa & Branco 1961 e Braun 1968). Chiavegatto & Gomes (1993) descrevem nesta unidade estruturas sedimentares,

que indicam deposição em um ambiente marinho plataformar dominado por tempestades, em uma provável margem do tipo rampa. Guimarães (1993) enfatiza o caráter imaturo dos diversos tipos litológicos desta unidade, a ausência de feições de retrabalhamento, a proporção modal dos plagioclásios (em geral superior a 30%) e sua composição An10-15.



**Figura 9.** Coluna estratigráfica referida ao Grupo Bambuí definida por Dardenne (1978).

A Figura 10 mostra o contexto geológico local da área em que os poços de monitoramento no Distrito Federal estão localizados e na qual parte dos ensaios na zona não saturada foi executada.

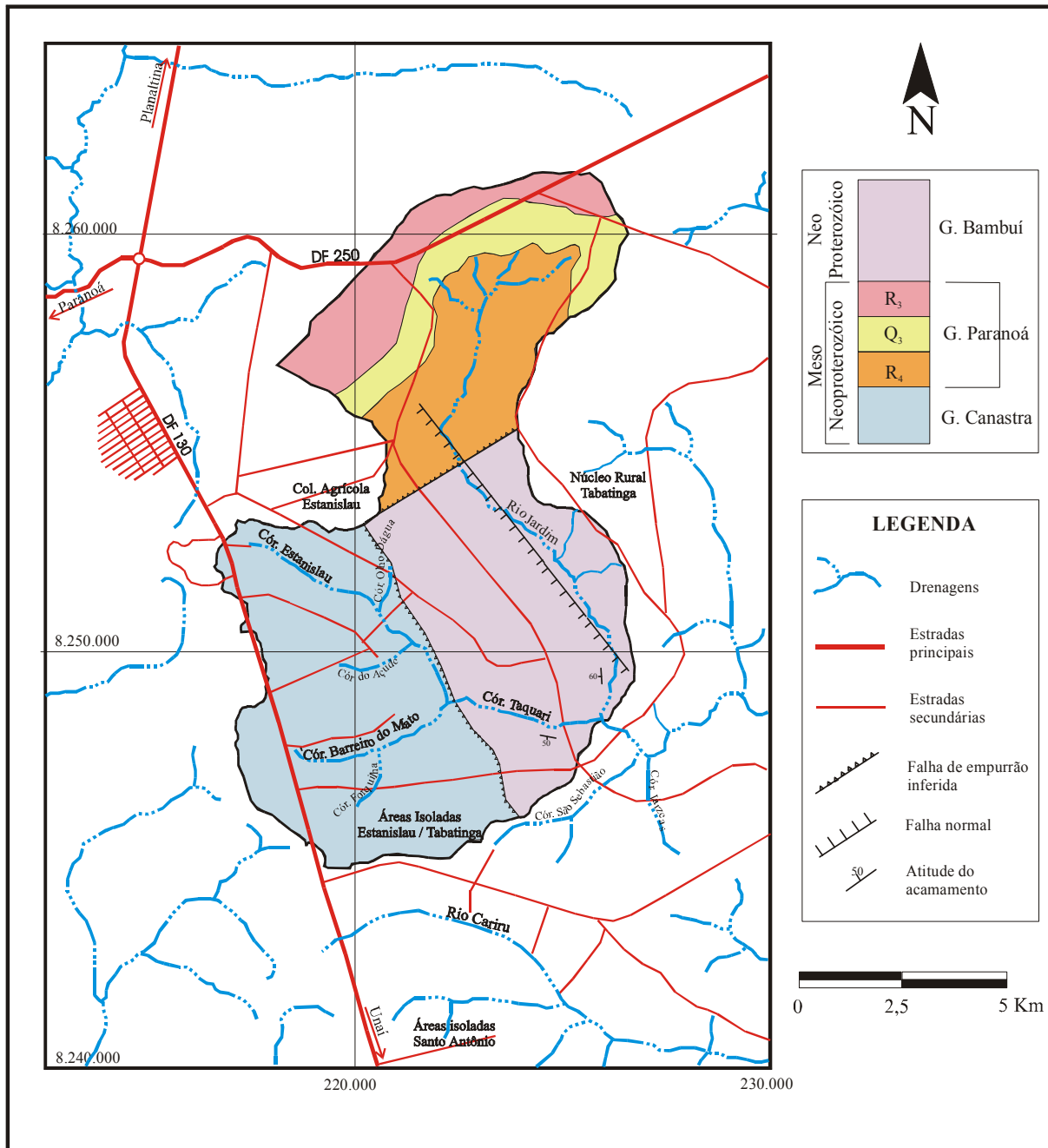


Figura 10. Mapa geológico da bacia do alto rio Jardim (Lousada 2005).

### 2.1.1.2. Geologia Estrutural

No Distrito Federal, a geologia estrutural associa-se ao evento 1 do Ciclo Brasileiro, caracterizado pelo cavalgamento do Grupo Paranoá sobre os metassedimentos do Grupo Bambuí e posterior cavalgamento por falha de empurrão do Grupo Canastra sobre o Grupo Paranoá. A justaposição do Grupo Araxá sobre as rochas do Grupo Paranoá se deve ao último cavalgamento regional.

O evento 2, definido pelo final do Ciclo Brasileiro, é caracterizado por rochas afetadas por uma tectônica predominantemente rúptil, caracterizado por um conjunto de discontinuidades

planares representadas por fraturas e falhas normais nos grupos Canastra, Paranoá, Bambuí e Araxá.

No Grupo Paranoá são observados dobramentos em estilos de *chevrons* apertados e assimétricos (entre Sobradinho e as comunidades da Fercal). Essas estruturas apresentam eixos de dobra em torno de N-S e forte inflexão para E-NE, os flancos de dobras têm direções W-E e SE-NW. Essas dobras foram geradas durante a estruturação do Sistema de Cavalgamento Maranhão.

No Grupo Canastra, as dobras apresentam estilo *chevron*, geralmente, bastante apertadas com eixos de direção geral N-S, e planos axiais NS-W com o desenvolvimento de clivagem penetrativa axial. Estas estruturas foram desenvolvidas durante a estruturação do Sistema de Cavalgamento Maranhão, que foi responsável pela superposição do Grupo Canastra sobre o Grupo Paranoá.

Posteriormente a esta tectônica, ocorreu um estágio deformacional com desenvolvimento de amplas dobras abertas e ondulações responsáveis pela estruturação de domos e bacias no Distrito Federal.

### **2.1.2. Pedologia**

O Distrito Federal é caracterizado por solos que representam as principais classes de solo do Bioma Cerrado. Nessa região, baseando-se nos trabalhos realizados pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (EMBRAPA 1978), identifica-se que as classes mais importantes são denominadas: Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo, que representam mais de 85% do território no Distrito Federal.

As outras classes de solo cobrem um pouco mais que 9% do total, sendo representadas por: Argissolos, Nitossolos, Neossolos Flúvicos, Gleissolos, Neossolos Quartzarênicos; o restante da área é representado por superfície aquática e áreas urbanas.

Na área em estudo, ocorrem latossolos, cambissolos, neossolos quartzarênico, gleissolos e plitossolos (Figura 11). Os solos nos quais foram desenvolvidos ensaios de infiltração *in situ* são a seguir descritos.

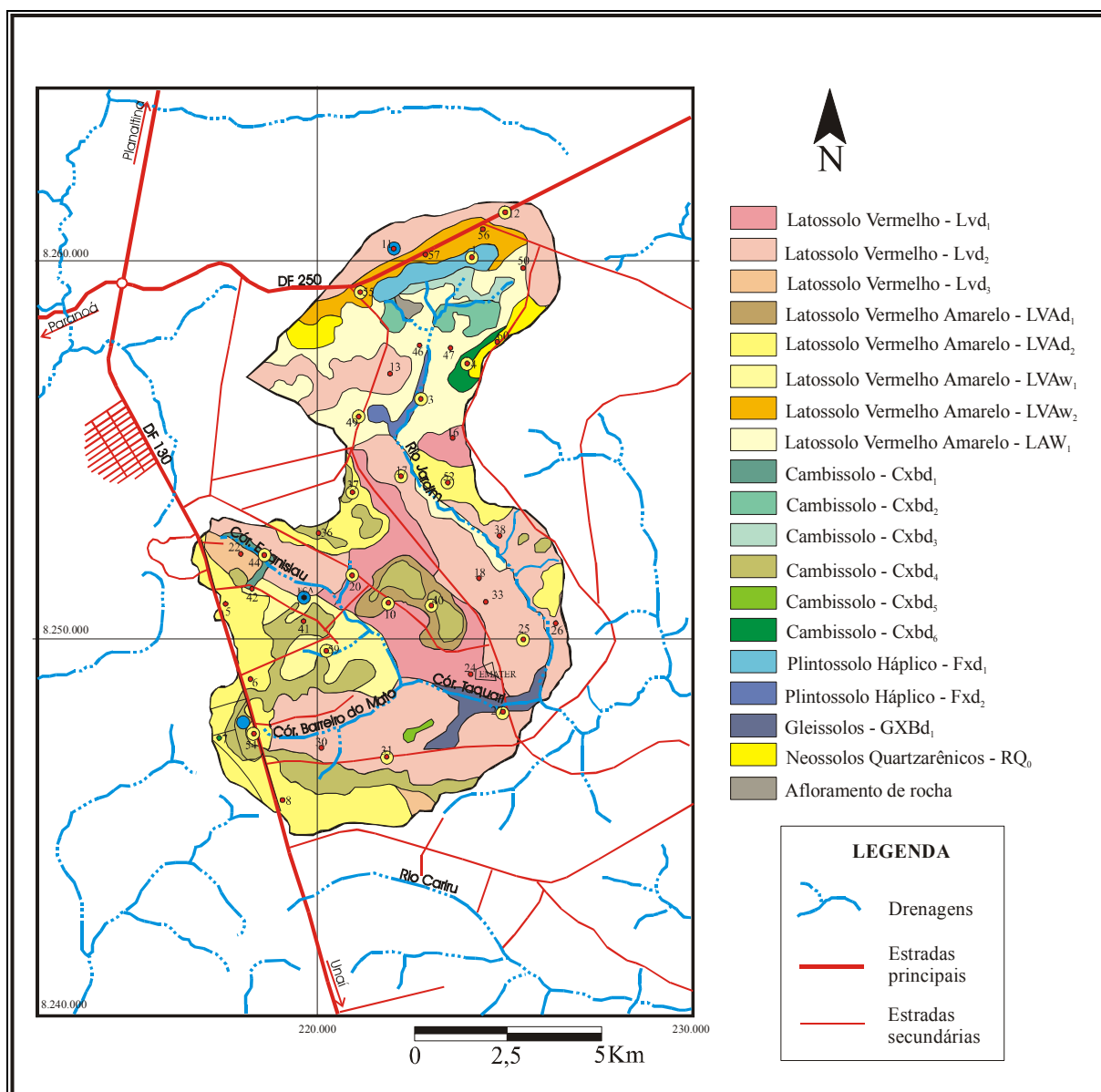


Figura 11. Mapa de solos da bacia do alto rio Jardim (Lousada 2005).

### *Latossolos Vermelhos*

Estão presentes, principalmente, nos topos das chapadas, principais divisores com topos planos, na Depressão do Paranoá e na Bacia do Rio Preto; sendo representados pela pedogênese de materiais arenosos oriundos da desagregação dos quartzitos da Unidade Q<sub>3</sub>. Apresentam espessuras superiores a 5 m, são ricos em óxi-hidróxidos de Fe e Al, com horizonte A moderado e horizonte B latossólico.

São solos bem drenados, seu potencial erosivo é médio a baixo, contudo na situação de baixas declividades observadas em sua área de ocorrência este risco é fortemente minimizado. Quanto a colapsividade, são solos que, embora argilosos, apresentam-se microgranulares o que lhes confere um índice de colapsividade moderado a alto.

Os Latossolos Vermelhos argilosos a argilo-siltosos desenvolvem-se sobre rochas pelíticas das unidades R<sub>4</sub> e PPC em condições de relevo rebaixado com pequenas declividades. Essas pequenas manchas não foram cartografadas. São solos residuais, de grande espessura (maior que 10 m em média) e são cobertos por matas.

Este tipo de solo não apresenta horizontes bem desenvolvidos, com contatos gradacionais difusos, muitas vezes imperceptíveis entre eles; caracterizando-se, desta maneira pela monotonia de seu perfil, como é típico nos latossolos. Localmente, nas proximidades de drenagens, pode ocorrer um delgado horizonte rico em matéria orgânica (horizonte O) no topo do perfil.

### ***Latossolos Vermelho-Amarelos***

Distinguem-se dos Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo apenas pela cor do horizonte B. Neste, as cores variam do vermelho ao amarelo. Alguns perfis também podem apresentar caráter concrecionário e plíntico.

Ocorrem, preferencialmente, nas bordas das chapadas mais elevadas e na transição entre os divisores e drenagens nas áreas de ocorrência do Grupo Paranoá e nas chapadas mais baixas sobre rochas do Grupo Canastra, apresentando vertentes com declividade entre 5% e 20%, retilíneas e convexas. Ocorrem especialmente no divisor Descoberto-Preto.

Apresentam elevada colapsividade em situações em que a textura argilosa é responsável pela formação de estruturas granulares (em geral tipo grumosa) e podem apresentar problemas devidos à concentração do fluxo de drenagem pluvial.

### ***Cambissolo Háplicos***

São solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B pouco desenvolvido em termos pedogenéticos e pouco espessos, em que alguns minerais primários facilmente intemperizáveis ainda estão presentes. As transições entre os horizontes A, B, C são claras e abruptas.

Ocorre, preferencialmente, nas vertentes das bacias mais importantes, do Maranhão, do Descoberto e do São Bartolomeu, além das encostas com declividades mais elevadas na depressão do Paranoá e na Bacia do Rio Preto. Presentes em relevos ondulados a forte ondulados, geralmente nas regiões de transição entre as chapadas e os planos de dissecação intermediários (áreas de rebordos).

### ***Argissolos Vermelho-Amarelos***

São solos distróficos ou álicos, que apresentam perfil do tipo A, Bt e C, com distinta individualização de horizontes (EMBRAPA 1978). A espessura dos horizontes varia conforme o

contexto do relevo, mas geralmente com espessuras inferiores as dos Latossolos e, muitas vezes, inferiores a 50 cm.

Apresenta textura argilosa e média, são solos bem drenados, moderadamente porosos, sobretudo, na parte superficial. Essas características, associadas ao relevo movimentado, conferem a esses materiais elevada suscetibilidade à erosão.

Ocorrem, preferencialmente, na região norte e noroeste do DF, sobre rochas da unidade pelito-carbonatada do Grupo Paranoá, em áreas representativas de relevo ondulado e forte ondulado.

### ***Nitossolos Vermelhos***

Solos minerais, não-hidromórficos, com horizonte B nítico de coloração vermelha, em matiz 5YR ou mais vermelho, e teores de  $Fe_2O_3$  inferiores a 15% (EMBRAPA 2006), e normalmente superiores a 11%. São solos profundos e apresentam sequência de horizontes A, Bt, C ou A, E, Bt, C ao longo do perfil e em geral são muito estruturados.

Localizam-se em superfícies de relevo movimentado no alto curso do Ribeirão da Contagem e ao longo de alguns afluentes. A fase de vegetação é do tipo cerradão e capão de mato, em geral com maior porte que aqueles desenvolvidos sobre os latossolos.

Desenvolvem-se sobre litologias com contribuição carbonática da Unidade PPC, principalmente com margas e lentes de calcários subordinados.

Em geral, apresentam caráter eutrófico ou epi-eutrófico, argila de atividade baixa e textura média/argilosa, em alguns locais com presença de cascalhos e rara ocorrência de caráter abrupto. As condições de relevo variam de suave a forte ondulado, com predominância de relevos mais suaves no médio curso do rio e relevos mais movimentados no alto curso.

### ***Plintossolos Pétricos Concrecionários***

Ocorrem em locais onde, a paleo oscilação do lençol freático, associada à dificuldade de movimentação gravitacional da água, proporciona formação da plintita e o aparecimento de mosqueados. Constitui-se em um tipo de solo de intemperismo avançado, pouco profundo e com permeabilidade variável.

A plintita é um material que possui altas concentrações de óxidos de ferro, provavelmente, por mobilização ou transporte desses compostos, que foram submetidos a ciclos de umedecimento e secagem.

Esta classe pedológica apresenta um horizonte plíntico com possibilidades de ocorrência nos primeiros 40 cm do perfil ou dentro dos 200 cm caso esteja sotoposto ao horizonte A ou E,

podendo exibir um horizonte no qual houve a litificação da plintita, denominado petroplíntico. De maneira geral, os plintossolos podem aparecer associados a relevo plano a suave ondulado, campos limpos e áreas com drenagem deficiente. Em condições naturais apresenta erodibilidade muito reduzida, mesmo sob escoamento superficial concentrado.

### ***Neossolos Flúvicos***

Solos pouco evoluídos, desenvolvidos a partir de depósitos aluviais recentes e constituídos por um horizonte A, sobre uma sequência de camadas sem relações genéticas entre si. Encontram-se ao longo da calhas principais, em várzeas, ou terraços formados por sedimentos recentes e incluem somente os solos que sofrem inundações periódicas ou que estiveram, até recentemente, sujeitos à inundações. Não incluem os solos desenvolvidos sobre deposição aluvial antiga, que esteja refletindo a influência do clima e da vegetação.

Não apresentam desenvolvimento de perfil de diferenciação de horizontes, por se tratar de solos jovens. Frequentemente apresentam apenas um horizonte superficial, algo mais escuro ou brumado, resultante da atividade biológica.

Pela própria natureza do seu processo de formação, estes solos apresentam características muito diversificadas. Típicos de áreas baixas têm drenagem imperfeita e em profundidade verificam-se indícios de gleização, tendo, porém na parte superficial, até pelo menos 50 cm, ausência de quaisquer características de hidromorfismo.

### ***Gleissolos Háplicos***

Solos com deficiência de drenagem, de perfil profundo, geralmente ricos em matéria orgânica, comumente epi-eutrófico. A presença de horizonte A histórico a moderado é feição diagnóstica deste tipo de cobertura. Apresentam apenas vegetação de gramíneas e arbustos especificamente adaptados, quando permanentemente saturados, sendo comum, neste caso a associação com campos de murundus.

Pode-se observar faixas estreitas ao longo das drenagens recobertas por vegetação arbustiva típica das matas ciliares, quando a propriedade de hidromorfismo é atenuada.

De acordo com a Classificação de Casagrande, são incluídos na classe Pt de solos muito ricos em matéria orgânica, com alta plasticidade. Em função da propriedade hidromórfica (sazonal ou permanentemente saturados), do elevado risco de inundação e da elevada plasticidade destes solos suas faixas de ocorrência nunca devem ser ocupadas para qualquer finalidade.



### ***Neossolos Litólicos Distróficos***

Classe de solos que ocorres em intensa associação com cambissolos na porção noroeste da bacia. Apresenta sequência de horizonte A - C - R ou A - R (contato lítico direto), sendo que o horizonte superficial é em geral do tipo A Fraco. Podem ocorrer sobre qualquer tipo de substrato, sendo mais comumente observados sobre quartzitos do Grupo Paranoá e metapelitos do Grupo Canastra.

Uma de suas feições mais marcantes é a rochosidade, sendo representada localmente por grandes blocos de quartzitos, além de grandes exposições rochosas na forma de lajedos. A paisagem associada é denominada, de forma geral, de campo rupestre, que apresenta maior biomassa arbórea que o campo sujo, devido à maior disponibilidade hídrica do solo.

### ***Neossolos Quartzarênicos Órticos***

Suas manchas, compostas por proporção de grãos de quartzo superior a 85%, sendo a fração argilosa inferior a 15% do total do arcabouço do solo, são restritas a regiões na borda da Chapada da Contagem; sendo desenvolvidas da intemperização *in situ* dos quartzitos da Unidade Q<sub>3</sub>. Sua espessura pode alcançar 4 metros.

Correspondem a solos finos da classe SP, segundo a classificação de Casagrande, com índices de erodibilidade e colapsividade acentuados. Apresenta também elevada permeabilidade e condutividade hidráulica.

Sua capacidade de atenuação de cargas contaminantes é muito reduzida; sua erodibilidade é muito elevada, mesmo em condições de baixas declividades. Estas características se devem à ausência de argilominerais e argila total na fração de finos, o que não permite a filtragem de cargas poluentes e mantém o solo desagregado e sem coesão.

### **2.1.3. Geomorfologia**

As feições morfológicas do Distrito Federal, originadas com a dissecação dos planaltos regionais vêm sendo descritas desde o “Relatório da Comissão Exploradora do Planalto Central do Brasil - Relatório Cruls” (Cruls 1894).

Vários trabalhos foram realizados desde então, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, em 1983, elaborou um dos primeiros mapas geomorfológicos do Distrito Federal, apresentado por Maio (1986), que se limitou à caracterização das alterações ambientais com base nas feições geomorfológicas. Nesse momento foram reconhecidos na região, dois Domínios Geomorfológicos denominados: Vales Dissecados / em Dissecação e Superfícies Aplainadas.

Novaes Pinto (1984, 1986ab, 1987, 1994ab) e Novaes Pinto & Carneiro (1984) apresentaram trabalhos sistemáticos de caracterização geomorfológica do Distrito Federal; esses trabalhos resultaram em um novo Mapa Geomorfológico do Distrito Federal (Novaes Pinto 1987, 1994a), o Mapa do Sistema de Terras do Distrito Federal (Novaes Pinto 1994b) e a caracterização geomorfológica do Vale do Rio São Bartolomeu (Novaes Pinto 1994b).

Novaes Pinto (1987, 1994a) reconheceu no Distrito Federal três macro-unidades (domínios geomorfológicos) que englobam 13 unidades. As macro-unidades foram denominadas de A = Região de Chapadas, B = Área de Dissecação Intermediária e C = Região Dissecada de Vale.

Macro-unidade Região de Chapada - ocupando aproximadamente 34% da área do Distrito Federal; caracterizada por topografia plana a plana ondulada acima da cota 1.000 metros, as coberturas são formadas, principalmente, por couraças vesiculares/pisolíticas e latossolos.

Área de Dissecação Intermediária - ocupando aproximadamente 31% do Distrito Federal, corresponde às áreas fracamente dissecadas, apresentado em seus interflúvios lateritos, latossolos e colúvios/eluvios delgados com predominância de fragmentos de quartzo.

Região Dissecada de Vale - ocupando aproximadamente 35% do Distrito Federal; representada pelas depressões ocupadas pelos rios da região.

Novaes Pinto (1986a, 1987, 1994a) estabeleceu um quadro evolutivo morfogenético no qual considerou que, tanto as chapadas como os pediplanos e pedimentos representam residuais de aplainamentos cenozóicos, superimpostos, em regime de alternância das condições climáticas entre úmidas e áridas, em uma extensa superfície de aplainamento cretácea.

As chapadas observadas, tanto no Domínio da Região de Chapadas, quanto aquelas fracamente dissecadas presentes no Domínio da Área de Dissecação Intermediária, foram elaboradas por processos de echiplanação.

Com um estudo detalhado da evolução geoquímica e geomorfológica dos perfis de intemperismo, Martins (1998) apresentou uma compartimentação geomorfológica para o Distrito Federal que, como nas propostas anteriores, em função da hipsometria, evidencia três grandes compartimentos: Planaltos (grosseiramente coincidente com o Domínio da Região de Chapadas de Novaes Pinto 1987, 1994a), Planos Intermediários (equivalentes em parte ao domínio da Área de Dissecação Intermediária de Novaes Pinto 1987, 1994a) e Planícies (semelhante ao Domínio da Região Dissecada de Vales de Novaes Pinto, 1987; 1994a).

Martins (1998) e Martins & Baptista (1998) individualizaram os compartimentos de rebordos (com declividades < 8%) e de Escarpas (com declividades > 8%). A caracterização da evolução geoquímica dos perfis de intemperismo, incluindo estudos pedogenéticos, elaborados

por Martins (1998), não revelou diferenças significativas entre os diferentes tipos de solos e as couraças situadas nos compartimentos de Planaltos e nos Planos Intermediários como, aliás, já havia sido observado por Penteado (1976).

Martins (1998) demonstrou que os processos de geração e degradação das couraças, presentes nos rebordos das chapadas do Distrito Federal, são processos ativos ainda hoje, e estão associados à uma intensa etchiplanação da região, entendida como a denudação lenta e constante dos planaltos, provocando o rebaixamento progressivo de toda a região.

Dessa forma, caracterizou a região do Distrito Federal como um etchiplano dissecado. Estes resultados estão de acordo com trabalhos prévios regionais (Mauro *et al.* 1982) e locais (Novaes Pinto 1986a, 1987, 1994a), que interpretaram as superfícies observadas no Distrito Federal como residuais de uma superfície antiga degradada e/ou modificada e/ou retocada, por meio de um processo, eminentemente, de etchiplanação, como estabelecido por esta última autora.

Regionalmente, o quadro geomorfológico do Distrito Federal, anteriormente apresentado, encontra-se associado aos ciclos de aplainamentos do Brasil Central, cuja evolução teria ocorrido, de acordo com Braun (1971), Triássico Superior ao Jurássico Médio, ou durante o Cretáceo Inferior de acordo os estudos de King (1956) e Ab'Saber (1964), com a edificação da Superfície Gondwânica.

Ao longo do tempo a Superfície Gondwânica foi retrabalhada e modificada por sucessivas reativações destacando-se, ao longo do Terciário a instalação Superfície Sul Americana, principal superfície de aplainamento reconhecida por toda a Plataforma Brasileira.

Estudos recentes realizados na bacia do alto rio Jardim (Reatto *et al.* 2000) forneceram subsídio para divisão geomorfológica em três unidades (Figura 12):

- **Compartimento de Chapada Elevada** - caracterizado por padrão de relevo plano, cotas superiores a 1.050 m, densidade de drenagem inferior a 1 Km/Km<sup>2</sup>, predomínio de latossolos com textura média a arenosa e baixo risco erosivo. Uso apropriado para agricultura e pecuária;
- **Compartimento de Dissecção Intermediária** - caracterizado por padrão de relevo suave ondulado, cotas entre 950 e 1.50 m, densidade de drenagem entre 1 e 1,6 Km/Km<sup>2</sup>, predomínio de latossolos com textura argilosa e risco erosivo moderado;
- **Compartimento de Rebordo** - caracterizado por padrão de relevo ondulado a fortemente ondulado, cotas inferiores a 950 m, densidade de drenagem maior que 1,6 Km/Km<sup>2</sup>, predomínio de cambissolos e elevado potencial erosivo.

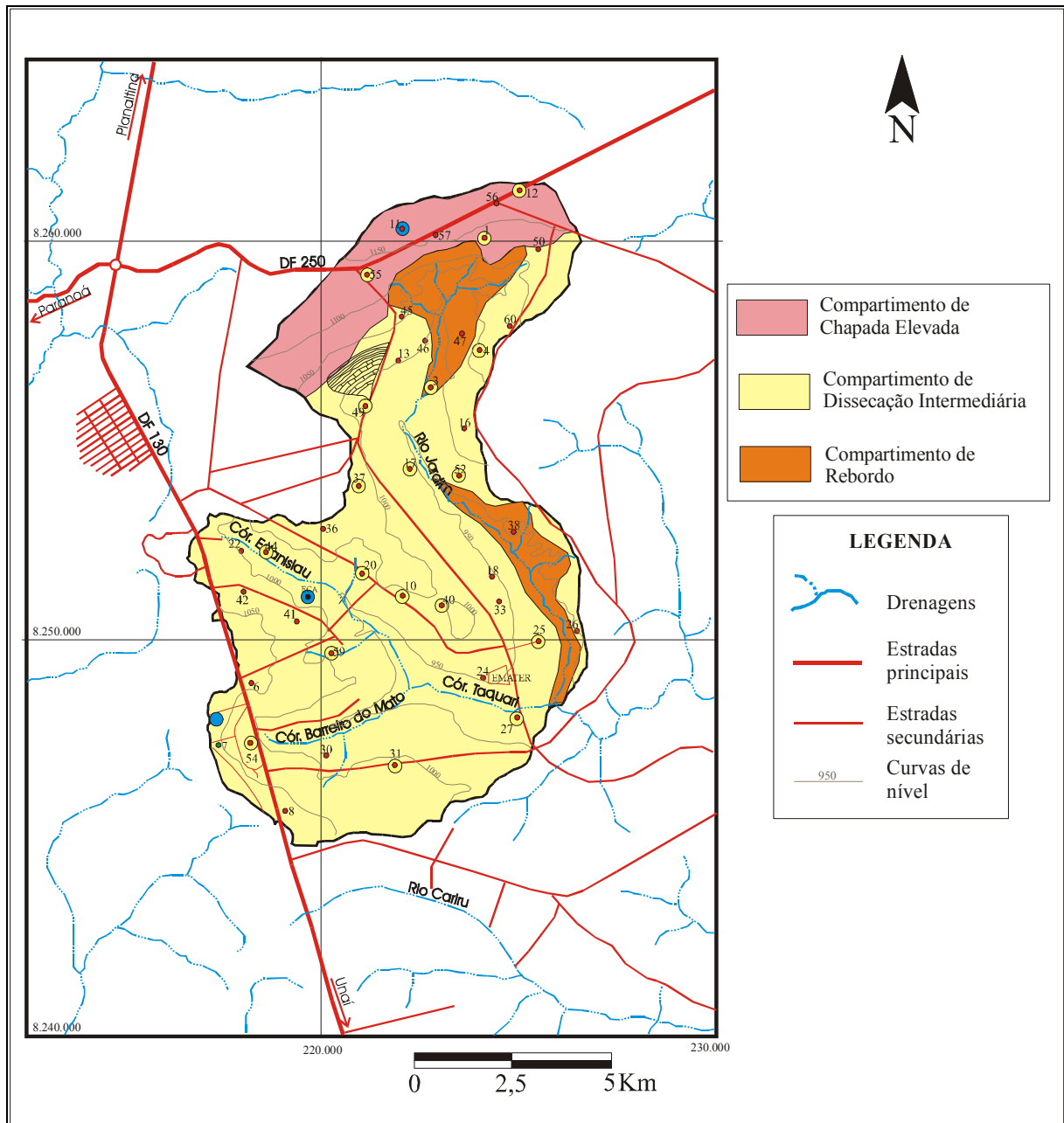


Figura 12. Mapa geomorfológico da bacia do alto rio Jardim (Lousada 2005).

#### 2.1.4. Hidrogeologia

De acordo com o Mapa Hidrogeológico do Brasil (BRASIL/DNPM/CPRM 1983) esta região enquadra-se na Província Hidrogeológica do Escudo Central.

No Distrito Federal, as águas subterrâneas são investigadas há várias décadas como fonte alternativa de abastecimento. Os principais trabalhos a nível regional foram os de Romano & Rosas (1970), Barros (1994) e Campos & Freitas-Silva (1998).

O trabalho de Barros (1994) sugeriu que a vocação hidrogeológica do DF é localmente restrita. Coimbra (1987) estimou, preliminarmente, a disponibilidade hídrica subterrânea do DF baseado em técnicas do balanço hídrico. Esta estimativa é até hoje utilizada como referência em

estudos regionais e locais. Barros (1994) apresentou uma caracterização e classificação dos principais sistemas aquíferos do DF, identificando dois domínios, onde o fissural predomina sobre o poroso.

Barros (1994) caracterizou o Domínio Poroso como um sistema de “águas rasas”, heterogeneamente armazenadas no manto de cobertura relacionadas aos parâmetros geológicos e aos aspectos fisiográficos. As “águas subterrâneas” pertencem ao Domínio Fissural/Dissolução distribuídas irregularmente nas rochas através do sistema de fraturas, falhas e cavidades de dissolução.

Campos & Freitas-Silva (1998) classificaram o Domínio Poroso para a área do DF em função de aspectos geológicos, pedológicos, geomorfológicos, espessura saturada e condutividade hidráulica, resultando em quatro subsistemas. Analogamente, os autores classificaram o Domínio Fraturado de acordo com a litologia dominante. A classificação proposta pelos autores é atualmente adotada por diversos estudos de caráter local e regional no Distrito Federal.

Souza (2001) apresentou uma revisão da estimativa das reservas hídricas subterrâneas do DF para os domínios aquíferos poroso e fraturado por meio da elaboração conceitual do modelo de recarga e a determinação em campo da condutividade hidráulica vertical de diversos tipos de solos. O autor recomenda a adoção de técnicas de recarga artificial dos aquíferos em áreas onde a sobreexploração dos aquíferos já é uma realidade.

As principais informações sobre a hidrogeologia do Distrito Federal estão disponíveis em Romano & Rosas (1970), Barros (1994), Amore (1994), Mendonça (1993), Campos & Freitas-Silva (1998 e 1999), Zoby (1999), Campos & Tröger (2000), Souza (2001), Cadamuro (2002), Joko (2002), Moraes (2004), Campos (2004), PGIRH (2005) e Lousada (2005).

No Distrito Federal, onde a geologia é caracterizada por rochas metamórficas, recobertas por espessos solos, podem ser diferenciados três grandes grupos de aquíferos, que correspondem à classificação maior dos reservatórios subterrâneos de água, Domínio Aquífero Intergranular, Domínio Aquífero Fraturado e Domínio Aquífero Físsuro-Cárstico.

No caso do Distrito Federal, onde há grande variação de tipos litológicos dentro das várias unidades litoestratigráficas, a caracterização mais precisa dos vários sistemas aquíferos requer a subdivisão em subsistemas, evidenciando a real diversificação dos domínios, sistema e subsistemas aquíferos. A Tabela 1 mostra a sinopse do quadro hidrogeológico do Distrito Federal.

As vazões dos poços tubulares variam desde zero (poços secos) até mais de 150 m<sup>3</sup>/h. A ampla variabilidade de potencial dos aquíferos é resposta da grande variação da geologia, tipos de solos e geomorfologia.

**Tabela 1.** Resumo da classificação dos Domínios, Sistemas/Subsistemas aquíferos do Distrito Federal com respectivas vazões médias. Fonte: Adaptado de Campos & Freitas-Silva (1999).

| DOMÍNIO          | SISTEMA                | SUBSISTEMA  | Vazão Média (m <sup>3</sup> /h) | Litologia/Solo Predominante                     |
|------------------|------------------------|---|---------------------------------|---|
| Freático         | Sistema P <sub>1</sub> | Deverão ser definidos com o detalhamento da cartografia hidrogeológica. | < 0,8                           | Latossolos Arenosos e Neossolos Quartzarênicos. |
|                  | Sistema P <sub>2</sub> |   | < 0,5                           | Latossolo Argilosos.                            |
|                  | Sistema P <sub>3</sub> |   |                                 | Plintossolos e Argissolos.                      |
|                  | Sistema P <sub>4</sub> |   | < 0,3                           | Cambissolo e Neossolo Litólico.                 |
| Fraturado        | Paranoá                | S/A   | 12,5                            | Metassiltitos.                                  |
|                  |                        | A   | 4,5                             | Ardósias.                                       |
|                  |                        | R <sub>3</sub> /Q <sub>3</sub>  | 12,0                            | Quartzitos e metarritmitos arenosos.            |
|                  |                        | R <sub>4</sub>  | 6,5                             | Metarritmitos argilosos.                        |
|                  | Canastra               | F   | 7,5                             | Filitos micáceos.                               |
|                  | Bambuí                 | -   | 6,0                             | Siltitos e arcóseos.                            |
|                  | Araxá                  | -   | 3,5                             | Mica xistos.                                    |
| Físsuro-Cárstico | Paranoá                | PPC   | 9,0                             | Metassiltitos e lentes de mármore.              |
|                  | Canastra               | F/Q/M   | 33,0                            | Calcifilitos, quartzitos e mármore.             |

#### 2.1.4.1. Descrição dos Aquíferos

##### Domínio Freático

Os aquíferos do Domínio Freático são caracterizados pelos meios geológicos onde a porosidade é do tipo intergranular, ou seja, a água ocupa os poros entre os minerais constituintes do material geológico (rocha ou solo). No Distrito Federal, esse domínio é essencialmente representado pelos solos e pelo manto de alteração das rochas.

A caracterização dos aquíferos desse domínio está vinculada a vários parâmetros, dos quais dois são destacados: a espessura saturada (b) e a condutividade hidráulica (K), sendo que ambas são diretamente controladas pela geologia e pela geomorfologia onde cada tipo de solo está inserido.

No Distrito Federal, os aquíferos freáticos são compostos por meios geológicos não consolidados, com espessuras saturadas variando de poucos centímetros até 80 metros, com ampla predominância (>60%) de espessuras entre 15 e 25 metros, grande extensão e continuidade lateral, heterogêneos e anisotrópicos. Os aquíferos relacionados a esse domínio são classificados como aquíferos livres e/ou suspensos, com ampla continuidade lateral, compondo o sistema de águas subterrâneas rasas.

Esses aquíferos, geralmente, são aproveitados por poços rasos, sendo a altura do nível freático controlada pela hipsometria e por feições físicas gerais dos vários tipos de solo/manto de intemperismo. São moderadamente susceptíveis à contaminação por agentes externos, pelo fato

de serem aquíferos rasos e livres. Os volumes de água captados pelos poços rasos são sempre inferiores a 800 L/h.

Em função de parâmetros dimensionais (principalmente espessura saturada “b” e condutividade hidráulica “K”), esse domínio é dividido em quatro sistemas denominados P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> e P<sub>4</sub>. Os sistemas P<sub>1</sub> e P<sub>2</sub> são caracterizados por espessuras maiores que 20 metros e condutividades hidráulicas, respectivamente, alta (maior que 10<sup>-6</sup> m/s) e moderada (da ordem de grandeza de 10<sup>-6</sup> m/s).

No Sistema P<sub>3</sub>, as espessuras totais são reduzidas para menos de 10 metros e a condutividade hidráulica assume valores menores que 10<sup>-6</sup> m/s. O sistema P<sub>4</sub> caracteriza-se por pequenas espessuras (comumente menores que 1 metro, podendo alcançar 2,5 metros) e condutividade hidráulica muito baixa. Nesse Sistema, é comum a ausência de zona de saturação no domínio do saprolito, principalmente quando desenvolvidos sobre rochas argilosas.

Esse domínio aquífero apresenta particularidades devido ao fato de incluir a transição entre a zona não saturada e a zona saturada do aquífero. Essa porção também inclui a região onde se originam os processos de recarga dos aquíferos (rasos e profundos) a partir da infiltração das águas de chuva. Uma importância adicional desse domínio está vinculada à manutenção da perenidade de drenagens no período de recessão de chuvas.

As zonas de descargas desse domínio estão relacionadas a fontes do tipo depressão ou contato, sendo que sua vazão média é controlada pelo tipo de regime de fluxo. As fontes relacionadas a fluxos regionais e intermediários apresentam vazões superiores a 2,0 L/s, enquanto as de fluxo local mostram vazões reduzidas e com amplas variações sazonais.

Os aquíferos subjacentes, do domínio fraturado, também funcionam como importantes exutórios dos aquíferos do domínio poroso, pois são diretamente alimentados a partir da zona saturada contida nos solos e nas rochas alteradas.

### **Domínio Fraturado**

São aquíferos caracterizados pelos meios rochosos, onde os espaços ocupados pela água são representados por descontinuidades planares, ou seja, planos de fraturas, microfraturas, diáclases, juntas, zonas de cisalhamento e falhas. Como no Distrito Federal o substrato rochoso é representado por metassedimentos, os espaços intergranulares foram preenchidos durante a litificação e o metamorfismo.

Dessa forma, os eventuais reservatórios existentes nas rochas proterozóicas estão inclusos dentro do Domínio Fraturado, onde os espaços armazenadores de água são classificados como porosidade secundária.

Por estarem restritos a zonas que variam de alguns metros a centenas de metros, os aquíferos do Domínio Fraturado são livres ou confinados, de extensão lateral variável, fortemente anisotrópicos e heterogêneos, compondo o sistema de águas subterrâneas profundas.

Com raras exceções, esse domínio está limitado a profundidades pouco superiores a 250 metros, sendo que em profundidades maiores há uma tendência de fechamento dos planos de fraturas em virtude do aumento da pressão.

Os parâmetros hidrodinâmicos são muito variáveis em função do tipo de rocha e, inclusive, variando significativamente em um mesmo tipo litológico. O principal fator que controla a condutividade hidráulica dos aquíferos desse domínio é a densidade das descontinuidades do corpo rochoso.

Esses aquíferos são aproveitados a partir de poços tubulares profundos e apresentam vazões que variam de zero até valores superiores a 100 m<sup>3</sup>/h, sendo que a grande maioria dos poços apresenta entre 5 e 12 m<sup>3</sup>/h.

A existência de poços secos é controlada pela variação da fração granulométrica, sendo que quanto maior a concentração de quartzitos menor a incidência de poços secos e quanto maior a presença de material argiloso (metassiltitos e ardósias) maior a ocorrência de poços secos ou de muito baixa vazão.

A classificação desse domínio em quatro conjuntos distintos, denominados sistemas aquíferos Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí, é feita com base no conhecimento geológico, análise estatística dos dados de vazões e feições estruturais.

O Sistema Paranoá foi subdividido nos seguintes subsistemas: S/A, A, R<sub>3</sub>/Q<sub>3</sub> e R<sub>4</sub>, enquanto o Sistema Canastra é integrado pelo Subsistema F.

As águas subterrâneas desse domínio apresentam exposição à contaminação atenuada, uma vez que os aquíferos do Domínio Intergranular sobrepostos funcionam como um filtro depurador natural, que age como um protetor da qualidade das águas mais profundas.

A recarga dos aquíferos desse domínio se dá através do fluxo vertical e lateral de águas de infiltração a partir da precipitação pluviométrica. A morfologia da paisagem é um importante fator controlador das principais áreas de recarga regionais.

### **Domínio Físsuro-cárstico**

Os sistemas de porosidade físsuro-cárstica são representados por situações onde rochas carbonáticas (calcários, dolomitos, margas e mármore) ocorrem na forma de lentes com restrita continuidade lateral, interdigitadas com litologias pouco permeáveis (siltitos argilosos, folhelhos ou filitos).



Nesses casos, a dissolução cárstica fica limitada pela restrita circulação e as cavidades resultantes são restritas, inferiores a 3 metros de abertura. Mesmo não representando sistemas cársticos clássicos, essas ocorrências são responsáveis pelas vazões mais expressivas em poços individuais conhecidos na região do Distrito Federal.

Na região do Distrito Federal, ocorrem aquíferos fissuro-cársticos vinculados ao Sistema Paranoá, representado pelo subsistema PPC e pelo Sistema Canastra, associado ao Subsistema F/Q/M.

### **Modelos Conceituais dos Aquíferos**

Modelo das Duas Superfícies Potenciométricas - o modelo é aplicável para áreas no interior das chapadas elevadas, caracterizadas pela presença de regolitos, que atingem profundidades de até 50 metros sobre rochas intensamente fraturadas, com elevado grau de interconexão entre as fraturas.

Este modelo considera que existe uma zona não saturada entre a base do domínio intergranular saturado e o topo da zona representada pelas fraturas saturadas.

Modelo Fissuro-Cárstico - pode ser aplicado em várias regiões do Distrito Federal, principalmente no norte, onde ocorrem as lentes de rochas carbonáticas dos grupos Canastra e Paranoá.

A denominação de modelo fissuro-cárstico se refere aos reservatórios subterrâneos, onde as condições de circulação não são do tipo fissural (fraturada) com fluxo laminar, nem do tipo cárstico clássico, onde o fluxo turbulento é predominante.

Essa feição é decorrente da interdigitação de lentes carbonáticas com rochas de baixa permeabilidade, o que não permite o desenvolvimento de intensa dissolução cárstica, uma vez que o fluxo lateral é limitado nos metassiltitos e filitos. Assim o modelo fissuro-cárstico inclui aquíferos com dois tipos de porosidades distintas: secundária planar e secundária por dissolução.

Modelo de Superfície Potenciométrica Única com Confinamento - também se considera a presença de dois meios de comportamentos distintos, onde aquíferos porosos recobrem sistemas fraturados. O meio intergranular superficial é representado por solos rasos (cambissolos e neossolos litólicos) e saprolitos relativamente espessos (até 20 metros), comumente desenvolvidos de rochas pelíticas.

O aquífero superior é classificado como Sistema P<sub>4</sub> (Campos & Freitas-Silva 1998) e para esse caso específico, não apresenta zona de saturação, funcionando como camada confinante do tipo aquitarde.

Modelo de Superfície Potenciométrica Única sem Confinamento - representa a forma de circulação mais simples e que ocorre na maior parte das áreas onde aquíferos anisotrópicos de natureza fissural são recobertos por espessos solos. Nesse caso, todo o conjunto de porosidade intergranular e secundária planar permanece saturado de água na faixa compreendida entre a base do aquífero e o nível freático.

A única superfície potenciométrica presente pode ocorrer, permanentemente, no domínio poroso superior ou migrar no período de recessão da precipitação pluvial para o domínio fraturado. Na maior parte dos casos, a superfície potenciométrica oscila dentro do aquífero poroso superior.

Nas situações próximas a quebras de relevo (principalmente onde solos arenosos recobrem quartzitos intensamente fraturados), a superfície potenciométrica oscila entre o solo e a rocha em função da distribuição temporal das chuvas.

Esse modelo é observado em áreas de relevo suave ondulado com cotas intermediárias e em regiões próximas a quebras de relevo. A recarga se dá, principalmente, por fluxo vertical de águas de precipitação e a descarga em nascentes de contato e depressão difusas, que alimentam diretamente a drenagem superficial. Essas áreas de exutórios comumente são associadas a gleissolos e outros solos hidromórficos, em geral, encontrados nas cabeceiras dos córregos.

### **2.1.5. Caracterização Local da Área estudada no Distrito Federal**

No Distrito Federal, foi estudada uma área no alto curso da Bacia Hidrográfica do rio Jardim, geologicamente representada pelas unidades R<sub>4</sub>, Q<sub>3</sub> e R<sub>3</sub> do Grupo Paranoá, além de rochas dos grupos Canastra e Bambuí.

No contexto do Grupo Paranoá ocorrem as seguintes unidades:

- Q<sub>3</sub> - Unidade Quartzito Médio, representada por quartzitos brancos a ocre, silicificados, intensamente fraturados, contendo estruturas tipo *hummocky*, marcas onduladas e acamamento horizontal;
- R<sub>3</sub> - Unidade Metarritmito Arenoso, representada por intercalações irregulares de quartzitos e metalamitos, com espessuras variando de centímetros a mais de 10 metros, com destaque para duas camadas de quartzitos na base e topo da sequência;
- R<sub>4</sub> - Unidade Metarritmito Argiloso, representada por intercalações regulares de quartzitos finos e feldspáticos com metalamitos. Próximo a base da sequência ocorre camada de mais de 20 metros de espessura de metassiltitos argilosos maciços.

O Grupo Canastra é representado pela unidade clorita-quartzo filitos, clorita-fengita filitos, clorita-quartzo-fengita filitos, com lentes de quartzitos finos silicificados e fraturados.

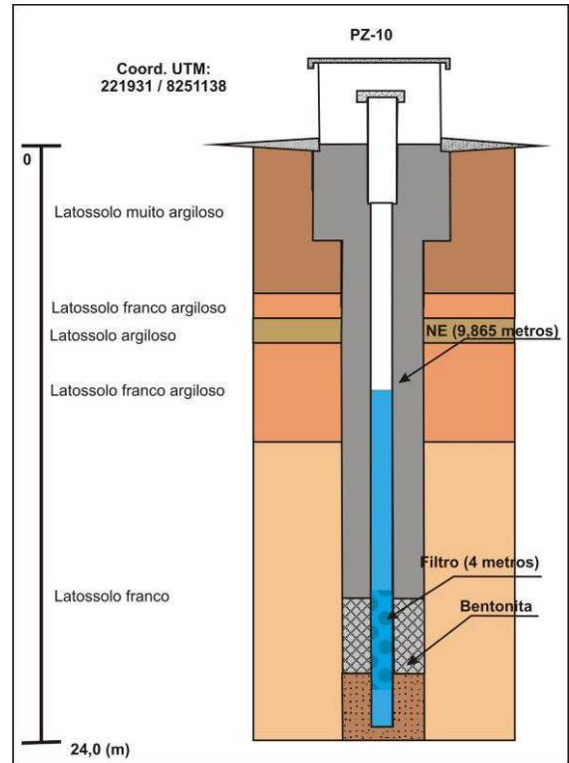
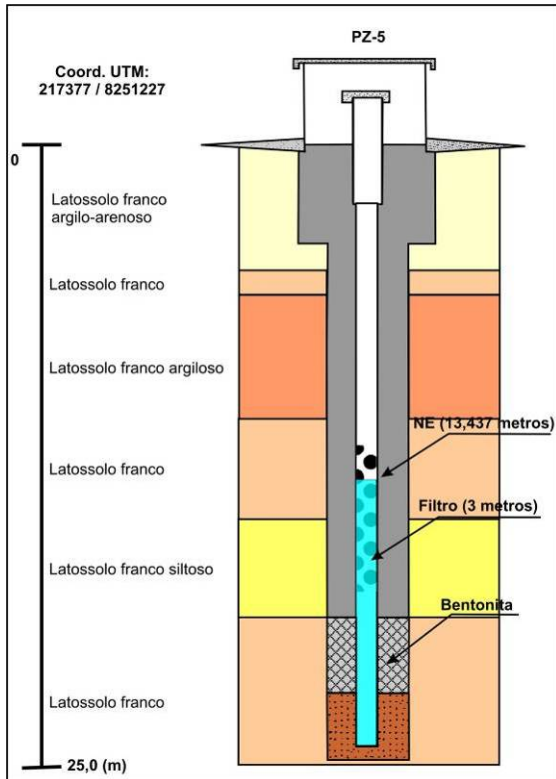
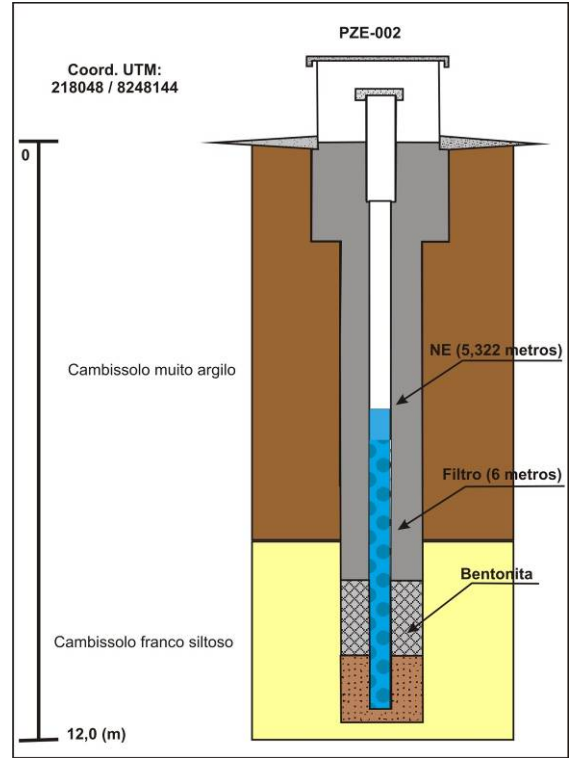
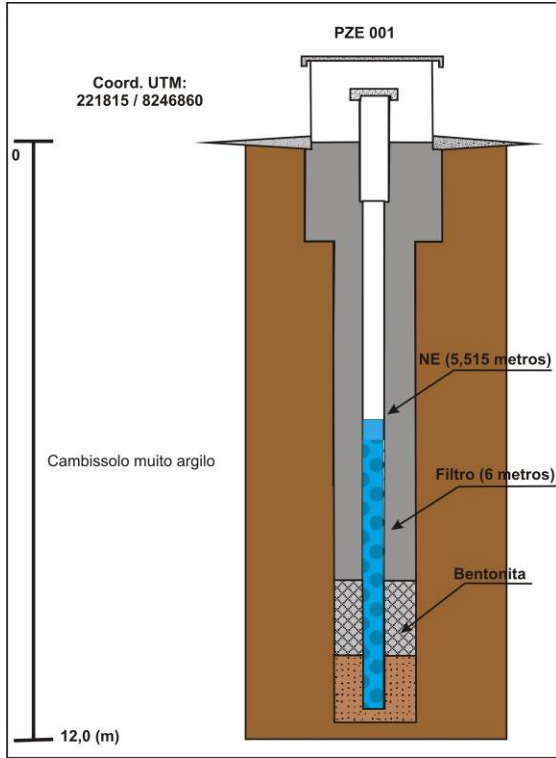
Foliação principal com ângulo de mergulho  $> 45^\circ$ . A sequência pelito-arcoseana, do Grupo Bambuí, atribuída às formações Três Marias e Serra da Saudade, contém siltitos esverdeados, folhelhos, e camadas de arcóseo marrom a esverdeado. Em direção ao extremo leste da área ocorrem, em profundidade, rochas carbonáticas atribuídas às sequências basais.

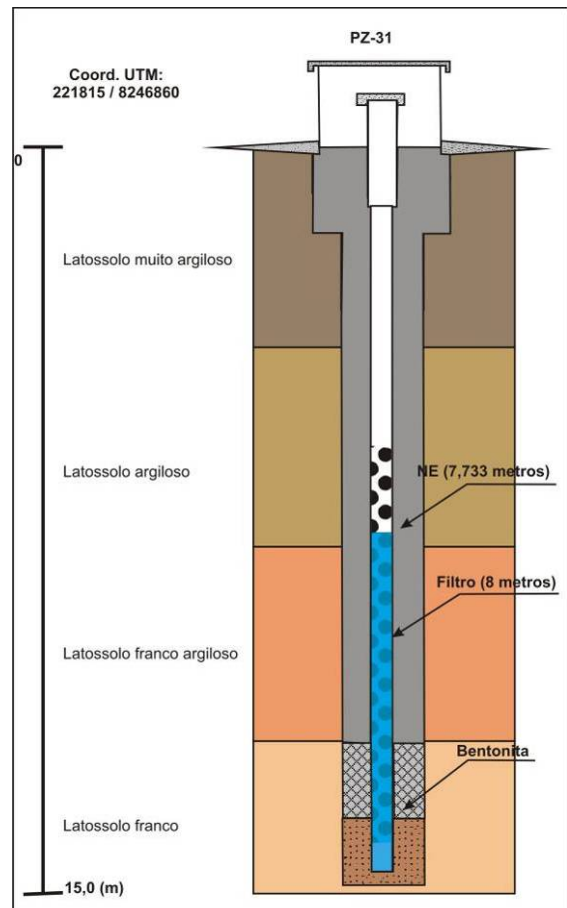
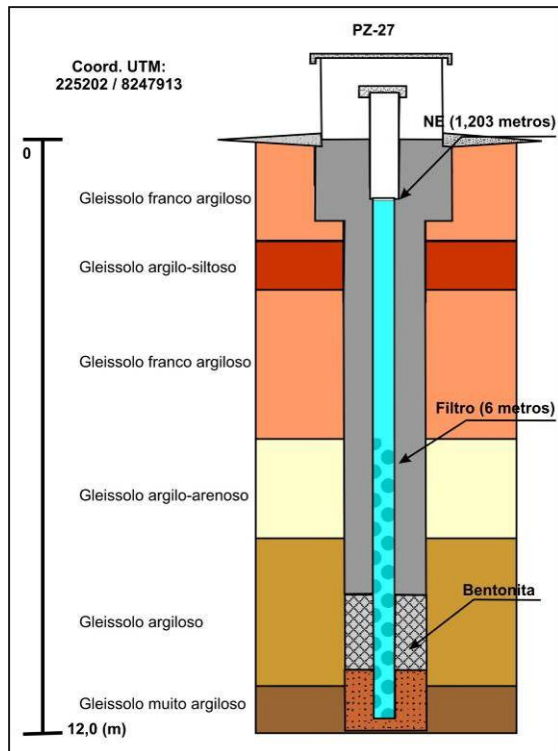
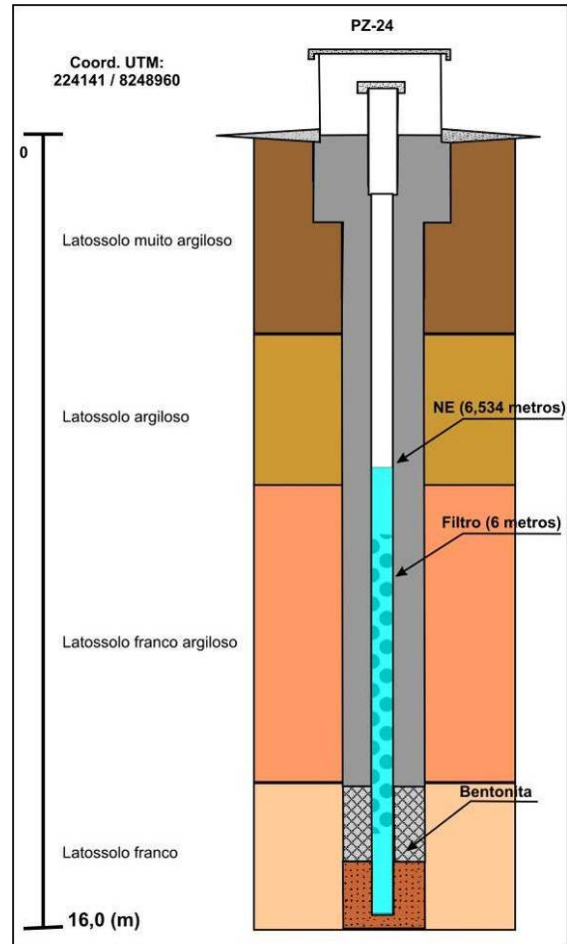
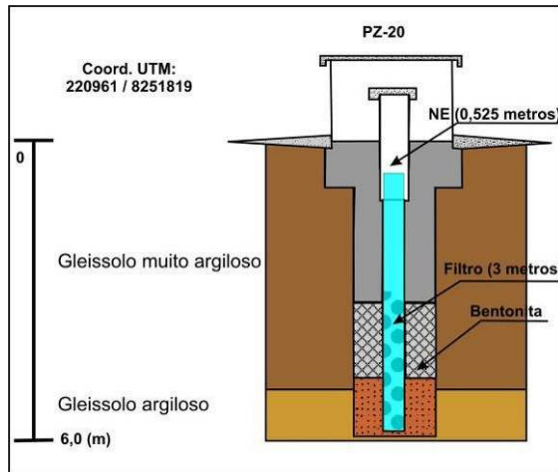
Pedologicamente, a área é caracterizada por solos atribuídos à associação das classes: Latossolo Vermelho Distrófico + Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico + Latossolo Amarelo Distrófico + Neossolo; Cambissolo Háptico + Neossolo.

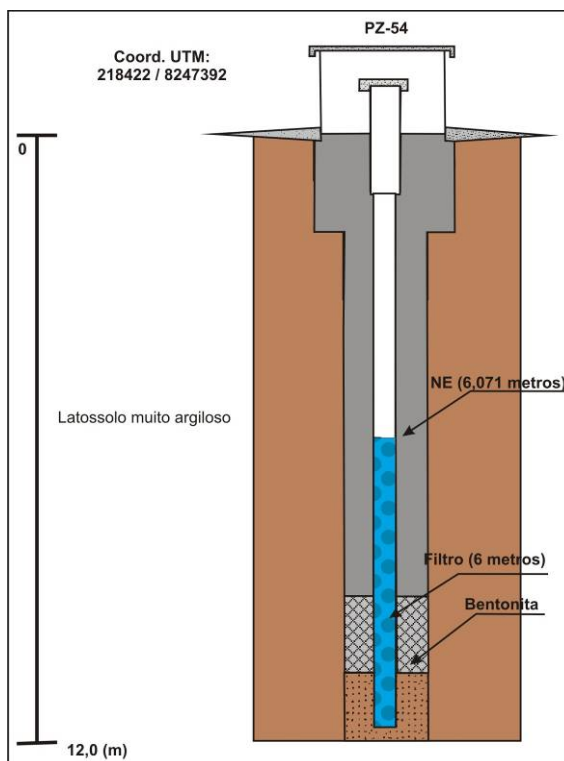
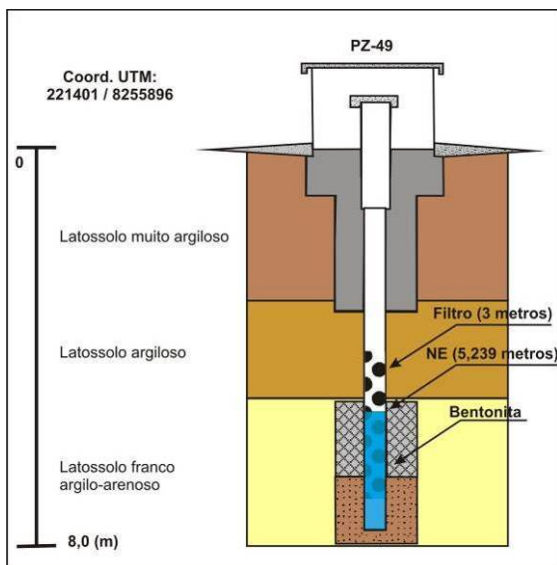
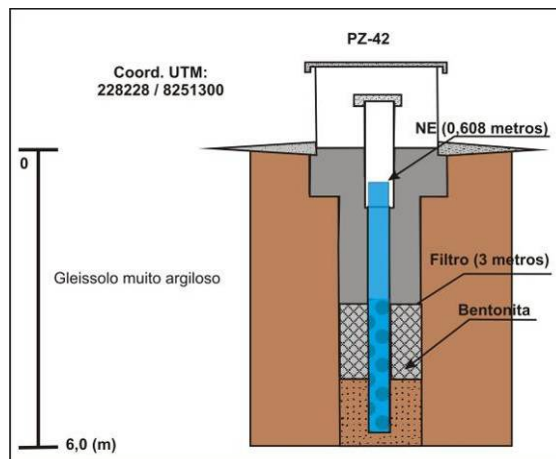
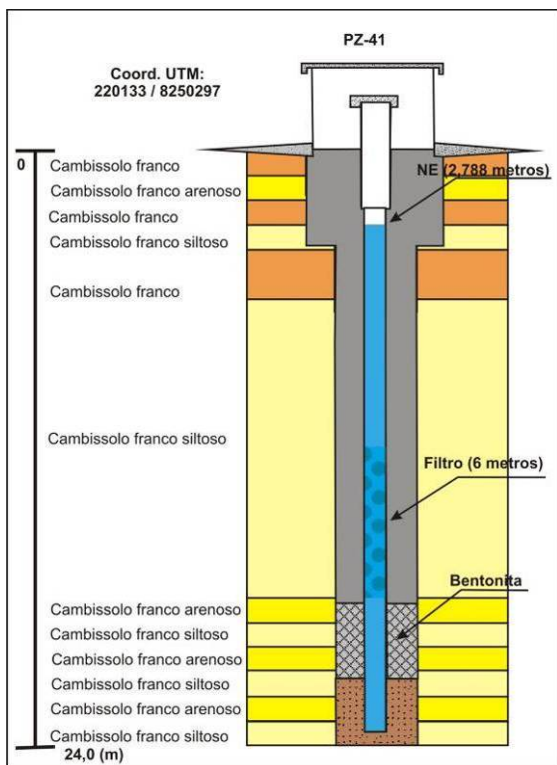
Os perfis descritos e ilustrados a seguir caracterizam os pontos nos quais foram realizados os ensaios na bacia do rio Jardim, porção leste do Distrito Federal (Figura 13 e Tabela 2).

**Tabela 2.** Dados construtivos e de localização dos poços de monitoramento estudados.

| Poço    | Coordenadas UTM |         | Profundidade (m) | Seção de Filtro (m)                                    | Raio da Perfuração (pol) | Raio de Revestimento (mm) |
|---------|-----------------|---------|------------------|--|--------------------------|---------------------------|
|         | L               | N       |                  |  |                          |                           |
| Pzte 01 | 217954          | 8248126 | 12               | 6 a 12<br>(transição de LVA/Cambissolo – Gr. Canastra) | 2                        | 25                        |
| Pzte 02 | 218048          | 8248144 | 12               | 6 a 12<br>(Cambissolo – Gr. Canastra)                  | 2                        | 25                        |
| Pzt 05  | 217377          | 8251227 | 25               | 12 a 18<br>(LVA – Gr. Canastra)                        | 2                        | 25                        |
| Pzt 08  | 219038          | 8245405 | 24               | 12 a 18<br>(LVA – Gr. Canastra)                        | 2                        | 25                        |
| Pzt 10  | 221931          | 8251138 | 24               | 18 a 22<br>(LVA – Gr. Bambuí)                          | 2                        | 25                        |
| Pzt 20  | 220961          | 8251819 | 6                | 3 a 6<br>(Gleissolo – Gr. Bambuí)                      | 2                        | 25                        |
| Pzt 24  | 224141          | 8248960 | 16               | 8 a 14<br>(LV – Gr. Bambuí)                            | 2                        | 25                        |
| Pzt 27  | 225202          | 8247913 | 12               | 6 a 12<br>(Gleissolo – Gr. Bambuí)                     | 2                        | 25                        |
| Pzt 31  | 221815          | 8246860 | 14               | 6 a 14<br>(LV – Gr. Bambuí)                            | 2                        | 25                        |
| Pzt 40  | 223011          | 8251019 | 32               | 20 a 28<br>(Cambissolo – Gr. Bambuí)                   | 2                        | 25                        |
| Pzt 41  | 220133          | 8250297 | 24               | 12 a 18<br>(Cambissolo – Gr. Bambuí)                   | 2                        | 25                        |
| Pzt 42  | 218228          | 8251300 | 6                | 3 a 6<br>(Gleissolo – Gr. Bambuí)                      | 2                        | 25                        |
| Pzt 49  | 221401          | 8522896 | 8                | 4 a 7<br>(LVA – Gr. Bambuí)                            | 2                        | 25                        |
| Pzt 54  | 218422          | 8247392 | 12               | 6 a 12<br>(LVA – Gr. Canastra)                         | 2                        | 25                        |
| Pzt 55  | 221021          | 8259167 | 37               | 26 a 35<br>(LVA – Gr. Paranoá)                         | 2                        | 25                        |







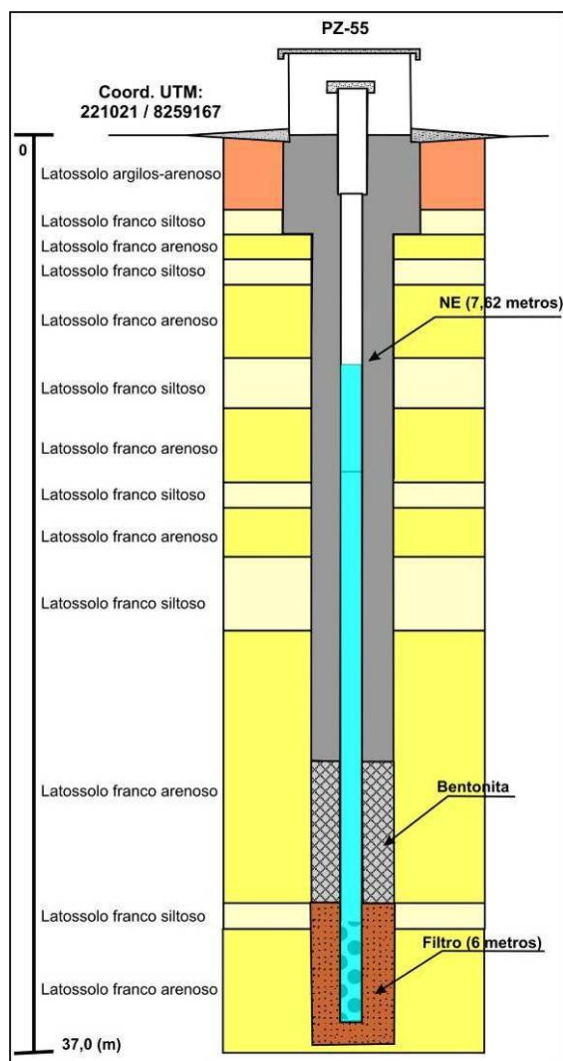


Figura 13. Perfis dos poços estudados no Distrito Federal.

## 2.2. SUL DO ESTADO DO TOCANTINS

### 2.2.1. Contexto Geológico

Na área em questão, ocorrem cinco conjuntos litoestratigráficos com idades, ambiência tectônica e filiação petrológica distintas, incluindo terrenos granito-gnáissicos relacionados ao embasamento cristalino de idade arqueana/paleoproterozóica; aos granitóides e ortognaisses intrusivos do paleoproterozóico; aos metassedimentos de baixo grau metamórfico atribuídos ao Grupo Araí de idade paleo/mesoproterozóica; aos metassedimentos de médio a alto grau correlacionados ao Grupo Serra da Mesa e à expressivas e espessas coberturas aluvionares cenozóicas.

#### *Complexo Granito-Gnáissico*

Na porção norte da Faixa Brasília, os terrenos granito-gnáissicos existentes representam o embasamento regional das sequências proterozóicas mais jovens.

O complexo é caracterizado por ortognaisses com assinatura litogeoquímica cálcio-alcalina de composição tonalítica a granodiorítica (Campos & Dardenne 1999).

Fuck *et al.* (1988), datando as rochas do embasamento a partir de isócronas Rb/Sr, diferenciaram terrenos granito-gnáissicos de idade arqueana e terrenos granito-gnáissicos paleoproterozóicos intrusivos durante o Ciclo Transamazônico.

### ***Granitos Intraplaca***

Os granitos intraplaca, de idade paleo a mesoproterozóica, incluem depósitos estaníferos e estão localizados na porção norte da Faixa Brasília. Fazem parte da Província Estanífera de Goiás, subdividida em Sub-Província Estanífera Rio Paranã, a leste, e Sub-Província Estanífera Rio Tocantins, a oeste (Marini & Botelho 1986).

Os granitos estaníferos apresentam características geoquímicas de granitos intraplaca. Botelho & Moura (1998) admitem que os depósitos mais importantes de estanho associados aos granitos intraplaca estão posicionados nas Sub-Províncias Rio Tocantins e Rio Maranhão.

### ***Grupo Araí***

Metassedimentos depositados em ambientes continentais e plataformais com evolução a partir de riftes intracontinentais de direção geral norte-sul, que evoluíram na passagem do Paleoproterozóico para o Mesoproterozóico, com reativação de zonas de fraqueza no substrato granito-gnáissico, originando a chamada Bacia Araí.

O Grupo ocorre na porção norte da Zona Externa da Faixa Brasília, recobre o embasamento granito-gnáissico, e é recoberto por metassedimentos dos grupos Paranoá e Bambuí. O grau de metamorfismo destas rochas, que varia de anquimetamórfico a xisto-verde baixo, é definido pela presença de filosilicatos nas paragêneses minerais.

### ***Grupo Serra da Mesa***

Marini *et al.* (1977) e Fuck & Marini (1981) definiram o Grupo Serra da Mesa na porção norte da Faixa Brasília. Inicialmente, foi correlacionado com o Grupo Araxá (da porção sul da faixa), contudo mais recentemente essa sequência é correlacionada ao Grupo Araí (Dardenne 2000).

Essa sucessão é caracterizada por quartzitos, quartzitos micáceos, xistos e lentes de mármore. Os quartzitos dominam na base da sequência e as lentes de mármore são mais comuns em direção ao topo da estratigrafia. Os micaxistos predominam e são representados por muscovita-biotita xistos, com clorita, granada e plagioclásio. Próximo aos grandes corpos



graníticos (tipo Serra da Mesa) ocorre estauroлита, cianita, anfibólio e outros minerais de maior grau metamórfico.

### 2.2.2.1. Geologia Estrutural

Na área de estudo, as feições estruturais podem ser divididas em três grandes contextos, incluindo as estruturas planares dúcteis, as estruturas planares/lineares dúcteis-rúpteis e as estruturas planares rúpteis.

São reconhecidos dois conjuntos de estruturas dúcteis, que são representadas por foliações metamórficas desenvolvidas em rochas do embasamento e do Grupo Serra da Mesa e por foliações observadas em rochas do Grupo Arai.

As rochas do embasamento apresentam foliações definidas como bandamentos gnáissicos com segregação metamórfica de minerais félsicos e máficos, feições de anastomosamento marcada pela orientação de mica e feições de estiramento de feldspatos potássicos.

Esses planos apresentam atitude variando de N10W a N30W, com elevado ângulo de mergulho (maior que 70°). Tal padrão se repete nas rochas atribuídas ao Grupo Serra da Mesa, porém a foliação é representada por xistosidade metamórfica de plano axial, sendo determinada pela forte orientação de filossilicatos.

Nos filitos e em quartzitos micáceos do Grupo Arai, é observada foliação definida como xistosidade fina, marcada pela orientação de clorita, fengita e muscovita. Localmente, cristais euédricos de magnetita orientados também marcam esse plano de foliação.

Trata-se de uma foliação regional de plano axial em condições de metamorfismo de baixo grau (xisto verde zona da clorita). A atitude dessa anisotropia planar é de baixo ângulo (variando de 10 a no máximo 45°) e a direção geral é NW, embora variações significativas possam ser observadas nos flancos das dobras regionais.

As estruturas dúcteis-rúpteis são observadas nas imagens regionais e materializadas como zonas de cisalhamento, que cortam indiscriminadamente rochas do embasamento e supracrustais e, portanto, são consideradas como geradas durante a fase principal da orogênese Brasileira.

A feição mais marcante, em afloramentos, é o intenso estiramento dos grandes cristais de feldspato potássico, presentes nos biotita granitos. Associadas a essas zonas de cisalhamento ocorrem extensas injeções de veios de quartzo leitoso. Em campo, observa-se forte coincidência entre os lineamentos presentes nas imagens e as ocorrências de veios de quartzo.

Amplamente distribuído sobre toda a área em questão, ocorre o terceiro grupo de estruturas, representado por fraturas e falhamentos. São planos originados durante a orogênese Brasileira nos momentos distensivos da deformação e nas etapas finais do processo tectônico.

Os planos mais frequentes apresentam atitudes: NS (oscilando até 20° para E e W); EW (podendo variar de 10 a 15°) e N45E / N45W (também com oscilações de até 20°). Esses planos de deformação eminentemente rúpteis apresentam atitudes, que variam desde baixo ângulo de mergulho até planos verticais.

O conjunto de estruturas mostra que a deformação progride a partir da movimentação tectônica das rochas supracrustais em direção ao Cráton São Francisco, situado a leste, e as dobras observadas corroboram a vergência do movimento para leste. A posição crustal atual dos metassedimentos do Grupo Araí e o grau metamórfico associado mostram que o soterramento dos sedimentos marinhos foi restrito.

Associadas ao Grupo Araí, são observadas rochas carbonáticas, havendo apenas uma ocorrência correlacionada ao Grupo Serra da Mesa. O comportamento estrutural dos mármore é distinto quando comparados entre os grupos Serra da Mesa e Araí; os mármore do Grupo Araí apresentam foliação principal paralela ao bandamento marcado pela orientação da clorita, é de baixo ângulo, com mergulhos não superiores a 45°; já os do Grupo Serra da Mesa, os mármore em fácies anfíbolito, apresentam foliação com direção geral N10-30W, com mergulho verticalizado.

As ocorrências de mármore, associadas ao Grupo Araí, são observadas ao longo das cristas com alinhamento norte-sul, na forma de lentes descontínuas em associação com filitos e quartzitos. As lentes não apresentam posição estratigráfica determinada e podem ocorrer desde próximo ao embasamento até próximo aos pontos mais elevados das serras e interdigitadas a filitos ou quartzitos.

### **2.2.2. Pedologia**

Os levantamentos de solos disponíveis para a região são escassos e apresentam escalas regionais, com destaque para a cartografia ao milionésimo (Projeto RadamBrasil – Folha Brasília) e o trabalho de SEPLAN (2003) na escala 1:250.000.

#### ***Neossolos***

São representados, na maior parte da área, por solos, de textura arenosa a cascalhenta, distróficos. Nessas faixas, o micro relevo ondulado atual é decorrente das próprias barras deposicionais, uma vez que o sistema deposicional foi, em grande parte, controlado por rios entrelaçados.

Nas áreas mais próximas do leito do rio Tocantins, há variedades de texturas mais finas (silto-argilosa a argilosa) e com tendência de maior eutrofismo. Estima-se que esses solos sejam

pelo menos epi-eutróficos e, em outros casos, eutróficos. Essa feição foi estimada pela importante mata galeria, que define suas áreas de cartografia. A presença de matéria húmica e bases trocáveis são atribuídas à autofertilização pelas enchentes periódicas, que depositam silte e matéria orgânica na planície de inundação atual.

Apresentam erodibilidade baixa a moderada. Entretanto, o fluxo hídrico concentrado em áreas que sofreram desmatamento incrementa de forma sensível essa feição, de modo que processos lineares podem ser observados.

### ***Neossolos Litólicos distróficos cascalhentos***

São solos com sequência de horizonte A-C-(R) ou por A diretamente em contato lítico. Comumente apresentam pedregosidade e rochosidade em função de sua alta afinidade com os materiais parentais.

Na área em estudo, esses solos predominam em associação com os cambissolos. São sempre muito pedregosos, sendo que o quartzo de veio anguloso acumulado na superfície ou nos horizontes subjacentes é o principal elemento componente da pedregosidade.

A rochosidade é outra feição muito comumente observada, sendo que os matacões de gnaisses e granitos são as litologias mais comumente observadas.

Na maior parte da área, esses solos são distróficos devido a baixa disponibilidade de bases no material parental, contudo localmente podem ser eutróficos, notadamente em local onde os granitos são muito rasos e apresentam feições saprolíticas em contato lítico.

A erodibilidade desses solos é minimizada pela pedregosidade e rochosidade, que funcionam como uma camada de boa drenagem e com massa específica elevada, o que diminui a concentração de fluxo na superfície e funciona como um pavimento de proteção natural ao trabalho erosivo das águas.

### ***Neossolos Quartzarênicos***

Sua ocorrência é intimamente relacionada aos neossolos flúvicos onde a quantidade da fração arenosa é predominante, em geral em situações de relevo arrasado na planície de inundação fluvial. Também ocorrem em áreas mais restritas sobre os quartzitos do Grupo Araí no sopé e junto a encostas íngremes onde ocorrem afloramentos dessa unidade litoestratigráfica.

Além da expressiva profundidade, normalmente esses solos apresentam-se com grãos simples, estrutura fraca a ausente, grande permeabilidade, condutividade hidráulica muito elevada e moderada suscetibilidade à erosão; o que resulta em uma caracterização como solos minerais, pouco desenvolvidos, profundos, excessivamente drenados e porosos.

### ***Cambissolos Háplicos Tb distróficos***

Solos pouco desenvolvidos, cuja pedogênese já alterou o material de origem, mas ainda encontram-se fragmentos de minerais primários e materiais pedregosos e rochosos. Esses solos ocorrem principalmente nas vertentes e encostas com pendentes mais elevadas, sendo abundantes nas condições de rampas mais longas do compartimento geomorfológico arrasado.

Também é comum a existência de grandes quantidades de cascalho e uma vegetação caracteristicamente associada de campo limpo, campo sujo e cerrado *sensu strictu*.

A baixa permeabilidade associada, à ocorrência de chuvas torrenciais, produz enxurradas que favorecem a formação de sulcos; porém esse fator é minimizado pela presença da pedregosidade, que funciona como barreira física ao fluxo concentrado da água.

### ***Latossolos Vermelhos Distróficos***

Na área em questão, apresentam ocorrência restrita associada à vegetação de cerrado e/ou cerradão em áreas planas ou topos de platôs em geral áreas de topografia favorável à mecanização. São originados de materiais bastante variados, desde granitos, gnaisses até rochas pelíticas do Grupo Araí e materiais aluvionares mais finos.

Solo friável, mais plástico e significativamente permeável, devido à remoção da maior parte da sílica, que constitui o material original. A permeabilidade favorece uma maior resistência natural aos processos erosivos, porém quando submetido a fluxo concentrado a erodibilidade é incrementada de forma evidente.

Solos com baixa fertilidade devido à sua fraca capacidade de troca e a ação de bactérias, que compõem a matéria orgânica transformando-a em ácidos inertes. Apesar de serem bastante permeáveis e estarem situados em áreas morfodinamicamente mais estáveis, é necessário manejo adequado à prevenção do risco erosivo.

### ***Latossolos Vermelho-Amarelo distróficos***

Comumente, presentes nos divisores de água e em áreas de transição para rebordos de chapada, integrada com vegetação de cerrado *sensu stricto*, campo limpo e campo sujo, em superfícies planas e em vertentes com declividades entre 3 e 10%.

Na área em questão, comumente decorre da pedogênese em metarritmitos arenosos do Grupo Araí e de rochas graníticas de composição modal mais félsica. Diferenciam-se dos Latossolos Vermelhos por apresentarem suprimento de óxidos de ferro menor, acarretando colorações mais amareladas, drenagem moderada, além de boas condições de aeração.

Localmente, apresentam horizontes A moderados a proeminentes sobre o Bw característico; alguns perfis desses solos podem ocorrer mosqueados e plintitas na base, caracterizando-os como latossolos vermelho-amarelos distróficos plintossólicos.

### ***Plintossolos Pétricos Concrecionários***

Classe que ocorre onde a oscilação do lençol freático associada à dificuldade de movimentação gravitacional da água propicia a formação de plintita e o aparecimento de mosqueados. Solo bastante desgastado, pouco profundo e pouco permeável.

Apresentam horizonte plíntico, com possibilidade de ocorrência nos primeiros 40 cm ou dentro dos 200 cm caso esteja sotoposto ao horizonte A ou E, podendo exibir um horizonte no qual houve a litificação da plintita, denominado petroplíntico.

Podem aparecer associados a relevo plano a suave ondulado, campos limpos e áreas com drenagem deficiente. Na área em questão, ocupam restritas áreas embora ocorram comumente horizontes plínticos e petroplínticos, mas não em posição diagnóstica dessa classe de solo.

### ***Organossolos***

Coberturas com perfis que possuem horizontes fundamentalmente orgânicos e espessos, escuros, friáveis e frequentemente encharcados. Desenvolvidos a partir da matéria orgânica, depositada na superfície a uma taxa de acréscimo superior a da decomposição. São comumente pouco evoluídos, ácidos e mal drenados, aparecendo em locais com relevo plano a deprimido, com vegetação de porte herbáceo e arbustivo.

Classe que exibe, localmente, atributos dos Organossolos Mésicos Hêmicos, pois apresentam um material denominado orgânico-hêmico, caracterizado pela presença de uma fase intermediária no processo de decomposição, não possuindo os requisitos para material fibrílico ou sáprico.

Ocorrem na região de maneira muito restrita, junto a algumas nascentes, em geral em relevos mais planos, em fitofisionomias de veredas.

### ***Gleissolos Háplicos***

Solos pouco desenvolvidos, variando de imperfeitamente a muito mal drenados, podendo ser encontrados em áreas com terreno mais rebaixado, constituindo apenas pequenas depressões, adjacentes aos cursos d'água e junto às nascentes. Apresentam teores variáveis de material orgânico e desenvolvem-se sobre áreas onde há encharcamentos prolongados, normalmente por elevação do nível freático.

Na área em questão, esta classe pode ser classificada como uma associação de Gleissolo Melânico Distrófico e Gleissolo Háplico, que ocorre em forte associação com os organossolos.

### ***Nitossolos Vermelhos Eutróficos***

Pouco representativos na região, em geral ocorrem na transição entre os latossolos vermelhos e os cambissolos, sendo oriundos de rochas graníticas e gnáissicas mais ricas em minerais máficos ou nas adjacências de ocorrências de lentes de rochas carbonáticas.

Solos eutróficos ou epieutróficos, devido aos processos de formação e acúmulo de argila no horizonte B, oriundos de iluviação dos horizontes superficiais e por serem desenvolvidos sobre rochas ricas em minerais ferro-magnesianos.

Diferem-se dos latossolos pela maior diferenciação entre os horizontes, maior quantidade de argila no horizonte subsuperficial, maior profundidade e maior facilidade de desenvolvimento de estruturação média a grossa.

### **2.2.3. Hidrogeologia**

A área está inserida na Província Hidrogeológica do Escudo Central (Ment 2000). Geologicamente, esta Província inclui parte da Província Estrutural do Tocantins, da Faixa Brasília, além de restritas porções do sul do Cráton Amazônico e Cráton do Guaporé.

São amplamente predominantes aquíferos fraturados desenvolvidos sobre terrenos granito-gnáissicos, coberturas metassedimentares e rochas vulcânicas ácidas (Grupo Araí). Os aquíferos cársticos restringem-se às lentes de rochas carbonáticas (grupos Serra da Mesa e Araí).

Podem-se reconhecer quatro sistemas aquíferos na área em questão; distinguidos em função das variações de parâmetros hidrodinâmicos (transmissividade, condutividade hidráulica, capacidade específica e tipo de porosidade).

#### ***Sistema Freático I***

Relacionado ao vale fluvial atual e ao paleo canal aluvial do Rio Tocantins. Inclui, litologicamente, aluviões ou alternativamente neossolos litólicos (principalmente as porções de granulometria mais grossa). Representado por materiais não litificados, portanto apresenta condutividade hidráulica alta a muito alta.

A transmissividade varia extremamente, sendo os valores mais altos esperados nos locais de ocorrência dos aluviões mais grossos e mais espessos e, os valores menores nas áreas de aluviões lamosos e mais delgados, ligados ao canal fluvial atual.

Devido à elevada condutividade hidráulica e à reduzida espessura média da zona vadosa, o sistema é considerado como de maior vulnerabilidade à contaminação da região. A recarga se dá diretamente pela infiltração das águas pluviais ou pela água dos rios, após filtragem através dos bancos areno-silto-argilosos do dique marginal ou das porções mais rasas dos aluviões. A descarga se dá por nascentes difusas, que deságuam diretamente no Rio Tocantins ou seus tributários.

### ***Sistema Aquífero Freático II***

Seus reservatórios se desenvolvem em solos e saprolitos espessos, pedologicamente classificados como latossolos vermelhos e vermelho-amarelos, de textura arenosa ou em áreas mais restritas, como neossolos quartzarênicos. Produto de intemperismo das rochas graníticas do embasamento e das rochas arenosas do Grupo Araí.

Sistema intergranular contínuo, livre, de grande extensão lateral, no qual se localizam as mais importantes áreas de recarga regionais dos aquíferos, principalmente ao longo das áreas mais planas e de menor densidade de drenagem com manchas associadas aos referidos solos.

Distribuído em áreas com declividade, geralmente, inferior a 5% e, localmente entre 5 e 10%. Predominância de formas de relevo de pequenas chapadas, pouco onduladas.

### ***Sistema Aquífero Freático III***

Ocorre recobrimdo as rochas graníticas, gnáissicas, filitos e quartzitos do embasamento e do Grupo Araí. Composto por cambissolos litólicos e litossolos rasos, comumente com fragmentos líticos de rochas e veios de quartzo na porção superior.

Condutividade hidráulica e transmissividade baixas, localizado em regiões de relevo movimentado, escavado em vales dissecados com formas de relevo convexo e côncavo e desníveis consideráveis, onde as declividades superiores a 10% predominam.

Este sistema é composto por aquíferos intergranulares, descontínuos, livres e muito restritos lateralmente.

### ***Sistema Aquífero Cristalino***

Inclui unidades psamíticas e pelíticas do Grupo Araí, bem como rochas graníticas e gnáissicas do embasamento. Devido à restrita espessura dos solos, na maior parte da região, observa-se grande densidade das discontinuidades por todo o maciço rochoso, pois o componente rúptil da deformação foi bastante atuante, favorecendo a manutenção da abertura das fraturas.

Sistema aquífero descontínuo, anisotrópico, heterogêneo, com extensão lateral variável, livre ou confinado e características hidrodinâmicas muito anisotrópicas. Considerando a pequena porosidade da litologia associada, predominante na área, bem como do baixo ângulo de mergulho da foliação (gnaiesses), este sistema resulta em um aquífero limitado do ponto de vista de produtividade.

As condições potenciais mais favoráveis estão relacionadas aos quartzitos do Grupo Araí, que resultam em zonas aquíferas com maior transmissividade e coeficiente de armazenamento.

Outro fator negativo para a circulação nesses aquíferos é o relevo movimentado com vales incisivos; nesse caso há incremento de fluxo superficial em detrimento da infiltração e da recarga.

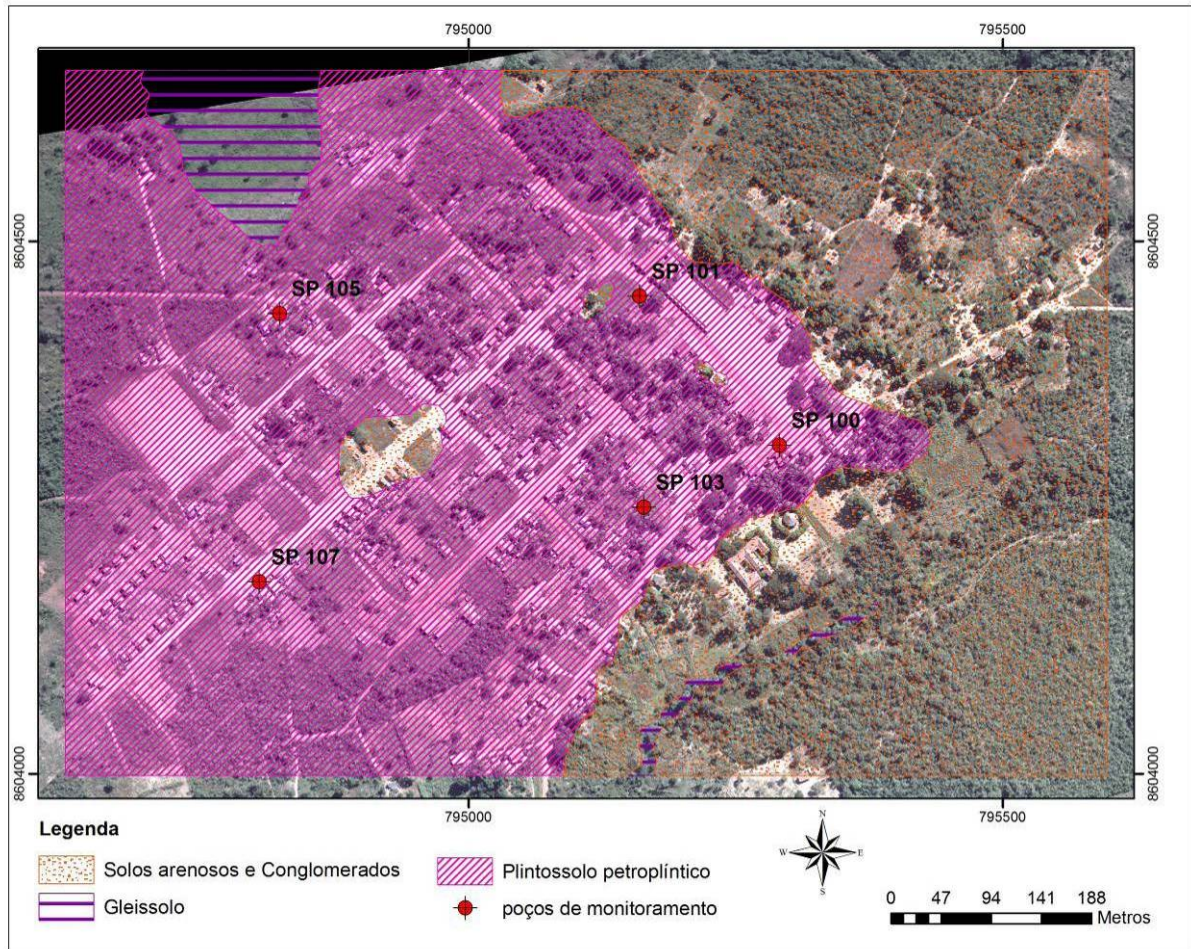
Nas regiões em que o relevo apresenta padrão suave ondulado, com solos mais espessos, ou com nível de cascalho superficial mais espesso, as condições hidrodinâmicas devem apresentar um efetivo incremento.

#### **2.2.4. Caracterização Local da Área estudada no Sul do Estado do Tocantins**

No sul do estado do Tocantins, os ensaios foram realizados em três áreas, Vila do Retiro, São Salvador do Tocantins e Paranã.

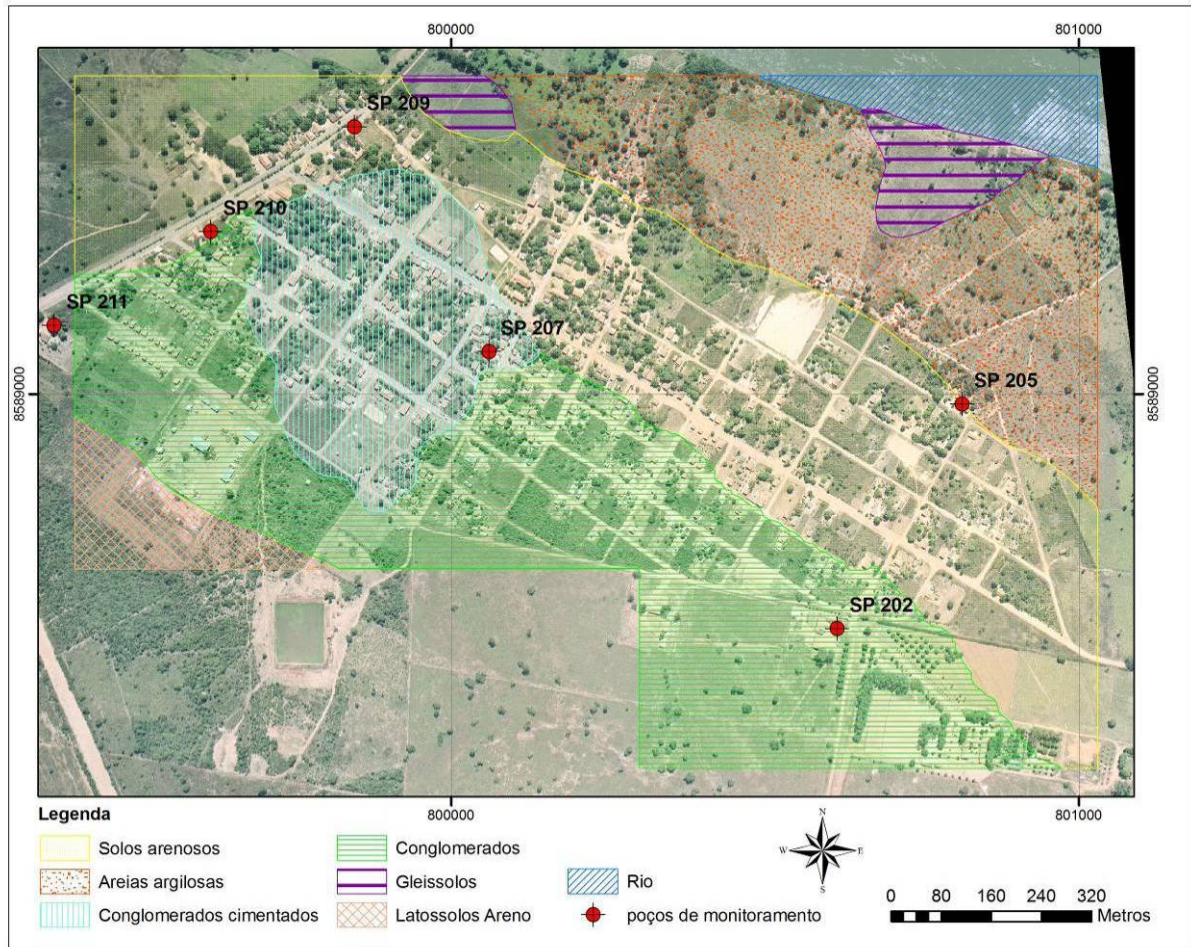
A região da Vila do Retiro é caracterizada em superfície por solos arenosos e cascalhos, gleissolo e plintossolo pétrico (Figura 14). Regionalmente, a geologia da área é caracterizada por ortognaisses de composição tonalítica a granodiorítica, bandamento máfico-félsico e desenvolvimento de foliações do Complexo Granito-Gnáissico.





**Figura 14.** Mapa imagem da Vila do Retiro com poços de monitoramento e a distribuição dos materiais em superfície.

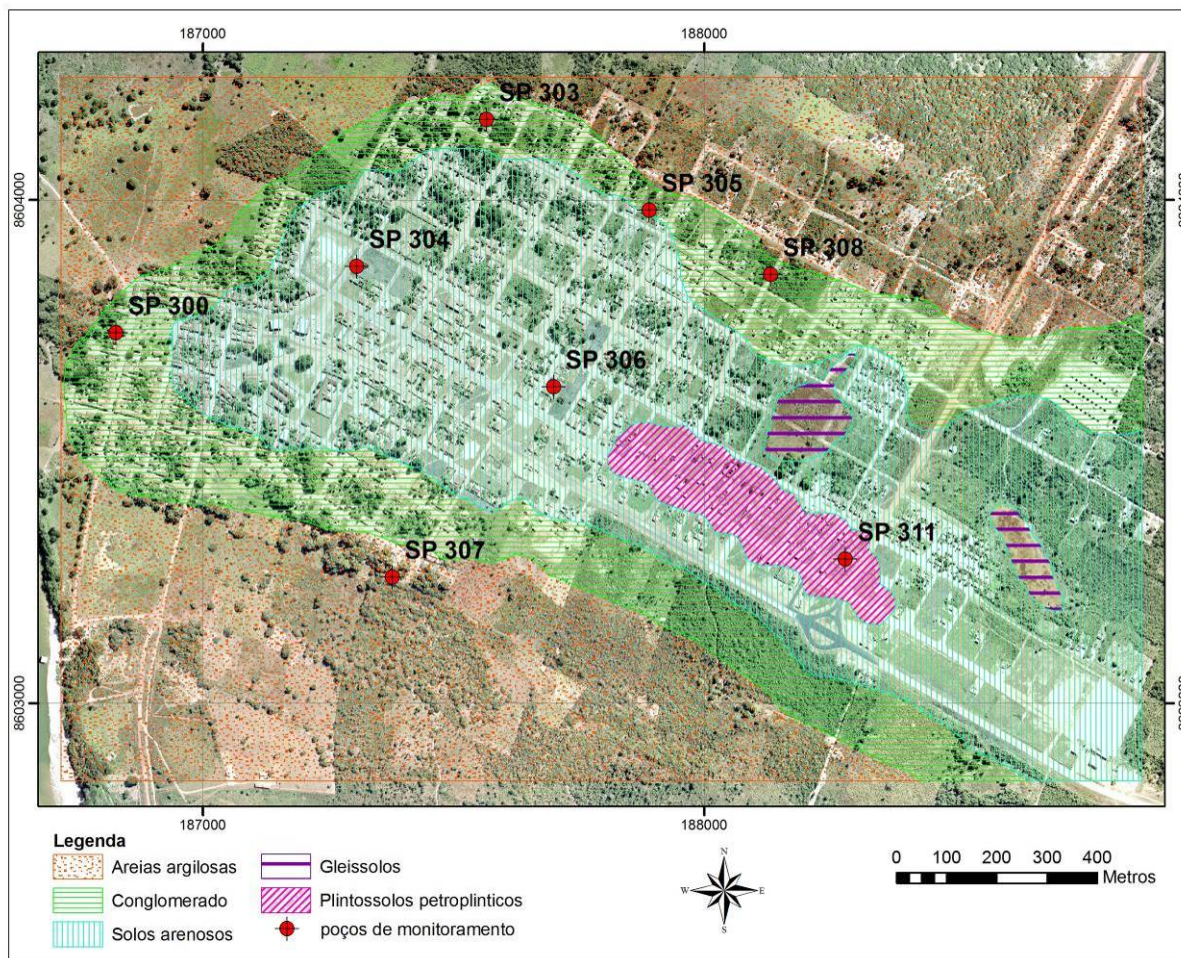
A região de São Salvador do Tocantins é caracterizada em superfície por solos arenosos, areias argilosas, conglomerados e conglomerados cimentados, gleissolos e latossolos arenosos (Figura 15). Regionalmente, a área é representada por coberturas aluvionares, aluviões e paleoterraços e por filitos, metassiltitos, filitos com magnetitas e calcifilitos do Grupo Araí.



**Figura 15.** Mapa imagem de São Salvador com poços de monitoramento e a distribuição dos materiais em superfície.

A região de Paranã é caracterizada em superfície por solos arenosos, areias argilosas, plintossolo petroplântico, conglomerado e gleissolo. A cidade está localizada em região caracterizada por coberturas aluvionares, aluviões e paleoterraços (Figura 16) e por leucogranitos do Complexo Granito-Gnáissico.

Os três poços de monitoramento localizados na Vila do Espírito Santo, sudoeste da cidade de Paranã, possuem uma pequena cobertura de areia fina em superfície e já se observa saprolitos e rocha fresca do Complexo Granto-Gnáissico.



**Figura 16.** Mapa imagem de Paranã com poços de monitoramento e a distribuição dos materiais em superfície.

A Tabela 3 apresenta a localização e os dados de perfis construtivos dos poços estudados. Os perfis mostrados na

Figura 17 caracterizam o contexto pedológico e hidrogeológico nas áreas estudadas nas localidades de Vila do Retiro, São Salvador, Paranã e Vila do Espírito Santo.

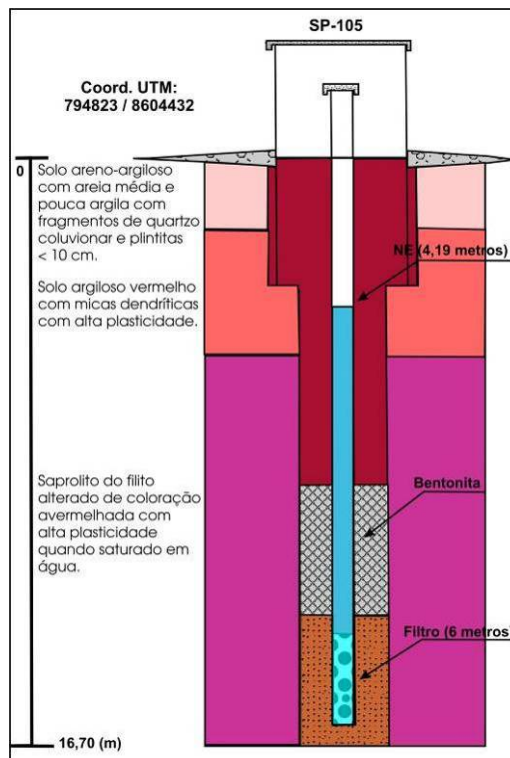
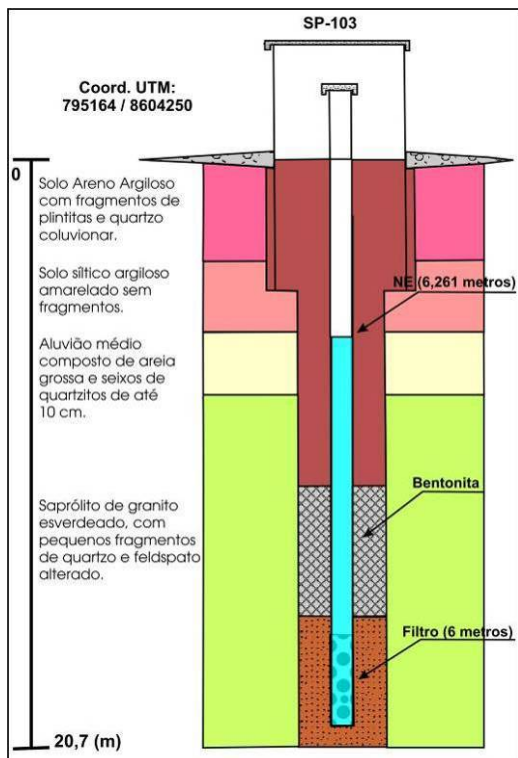
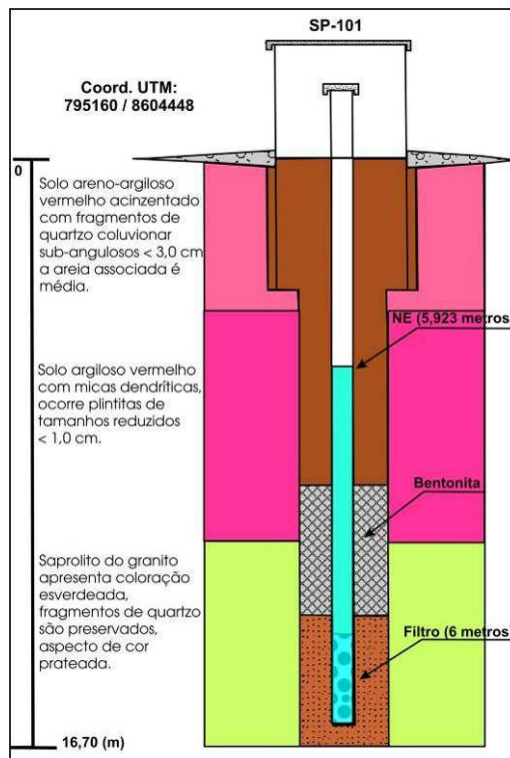
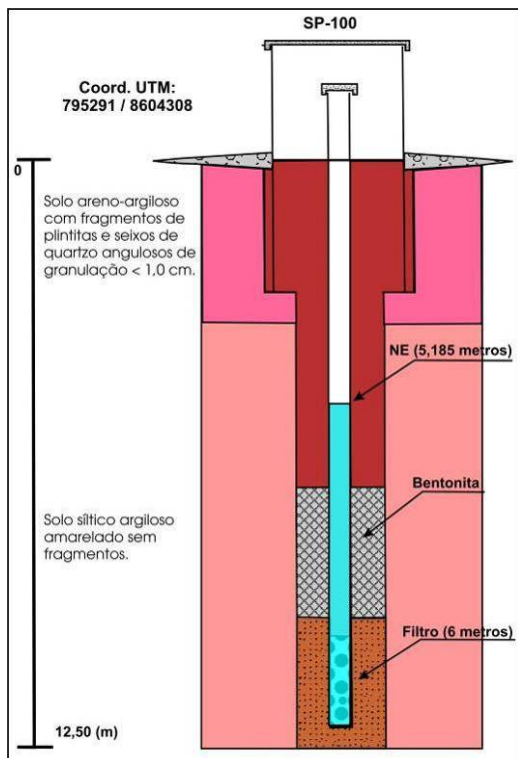
**Tabela 3.** Dados construtivos e de localização dos piezômetros estudados.

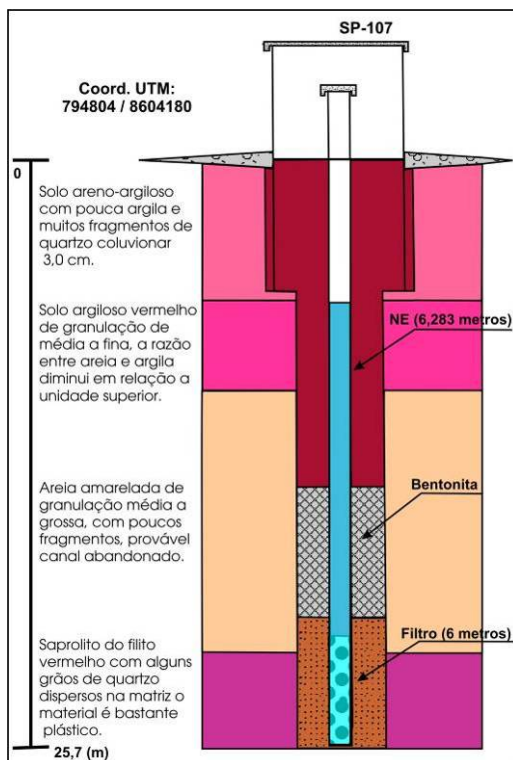
| Poço   | Coordenadas UTM |         | Profundidade (m) | Seção de Filtro (m)   | Raio da Perfuração (pol) | Raio de Revestimento (mm) |
|--------|-----------------|---------|------------------|---|--------------------------|---------------------------|
|        | L               | N       |                  |   |                          |                           |
| SP 100 | 795291          | 8604308 | 12,5             | 6,5 - 12,5 m<br>(solo siltico argilos sem fragmentos)             | 2                        | 25                        |
| SP 101 | 795160          | 8604448 | 16,7             | 10,7 - 16,7 m<br>(saprolito do granito com fragmentos de quartzo) | 2                        | 25                        |
| SP 103 | 795164          | 8604250 | 20,7             | 14,7 - 20,7 m<br>(saprolito do granito com fragmentos de quartzo) | 2                        | 25                        |
| SP 105 | 794823          | 8604432 | 16,7             | 10,7 - 16,7 m<br>(saprolito do filito)                            | 2                        | 25                        |
| SP 107 | 794804          | 8604180 | 25,7             | 19,7 - 25,7 m   | 2                        | 25                        |



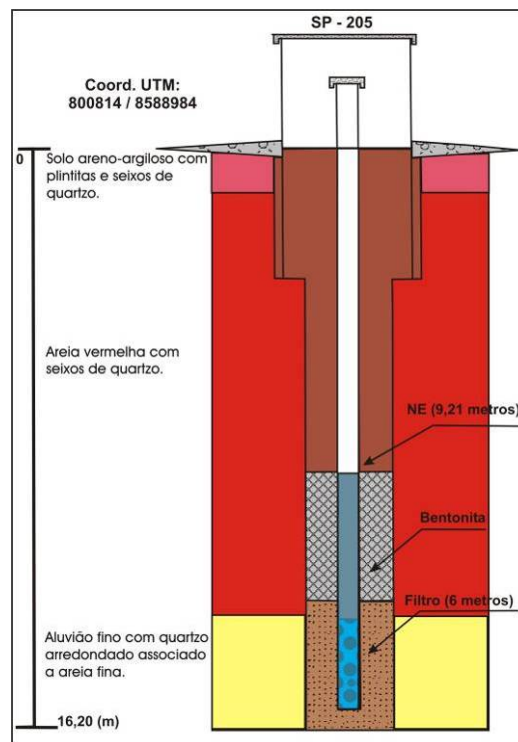
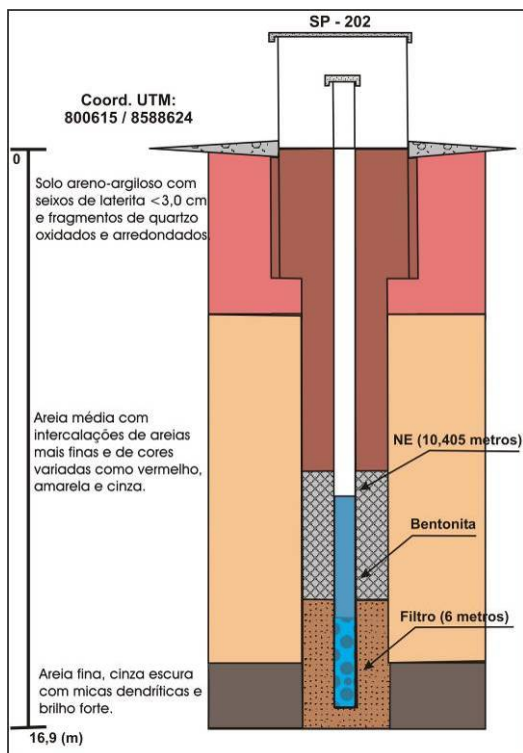
| Poço   | Coordenadas UTM |         | Profundidade (m) | Seção de Filtro (m)   | Raio da Perfuração (pol) | Raio de Revestimento (mm) |
|--------|-----------------|---------|------------------|---|--------------------------|---------------------------|
|        | L               | N       |                  |   |                          |                           |
|        |                 |         |                  | (saprolito do filito com fragmentos de quartzo)                                 |                          |                           |
| SP 202 | 800615          | 8588624 | 16,9             | 10,9 - 16,9 m<br>(areia fina argilosa)  | 2                        | 25                        |
| SP 205 | 800814          | 8588984 | 16,2             | 10,2 - 16,2 m<br>(aluvião fino com quartzo arredondado, associado a areia fina) | 2                        | 25                        |
| SP 207 | 800060          | 8589068 | 17               | 11 - 17 m<br>(areia fina argilosa)  | 2                        | 25                        |
| SP 209 | 799846          | 8589428 | 10,4             | 4,4 - 10,4 m<br>(aluvião fino com seixos de quartzo associado a areia média)    | 2                        | 25                        |
| SP 210 | 799617          | 8589260 | 15,5             | 9,5 - 15,5 m<br>(areia fina intercalada com areia média)                        | 2                        | 25                        |
| SP 211 | 799367          | 8589110 | 17               | 11 - 17 m<br>(areia fina argilosa)  | 2                        | 25                        |
| SP 300 | 186827          | 8603736 | 12,9             | 6,9 - 12 m<br>(solo argiloso)   | 2                        | 25                        |
| SP 303 | 187566          | 8604160 | 9,6              | 3,6 - 9,6 m<br>(saprolito do granito com fragmentos de quartzo)                 | 2                        | 25                        |
| SP 304 | 187307          | 8603868 | 12,8             | 6,8 - 12,8<br>(saprolito do granito com fragmentos de quartzo)                  | 2                        | 25                        |
| SP 305 | 187890          | 8603980 | 11,4             | 7,4 - 11,4 m<br>(saprolito do granito com fragmentos de quartzo)                | 2                        | 25                        |
| SP 306 | 187699          | 8603628 | 16,9             | 6,9 - 16,9<br>(saprolito do filito)   | 2                        | 25                        |
| SP 307 | 187378          | 8603250 | 10,3             | 4,3 - 10,3 m<br>(saprolito do granito)  | 2                        | 25                        |
| SP 308 | 188132          | 8603852 | 12,5             | 6,5 - 12,5 m<br>(saprolito do filito com fragmentos de quartzo)                 | 2                        | 25                        |
| SP 309 | 188093          | 8603266 | 22               | 16- 22 m<br>(saprolito do granito com fragmentos de quartzo)                    | 2                        | 25                        |
| SP 311 | 188281          | 8603286 | 11               | 3 - 11 m<br>(transição do saprolito do filito para o saprolito do granito)      | 2                        | 25                        |
| SP 313 | 186390          | 8602898 | 22,5             | 16,5 - 22,5 m<br>(saprolito do granito)   | 2                        | 25                        |
| SP 314 | 186424          | 8602924 | 48               | 42 - 48 m<br>(saprolito do granito)   | 2                        | 25                        |
| SP 315 | 186462          | 8602924 | 17               | 11 - 17 m<br>(saprolito do granito)   | 2                        | 25                        |

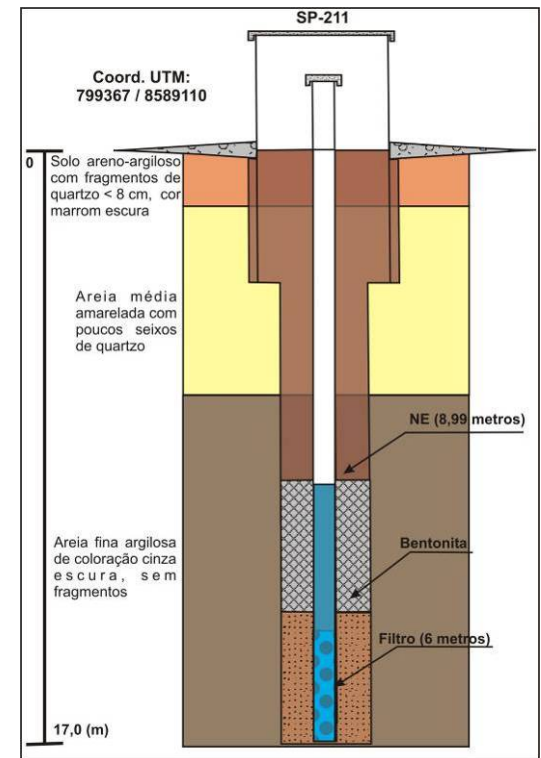
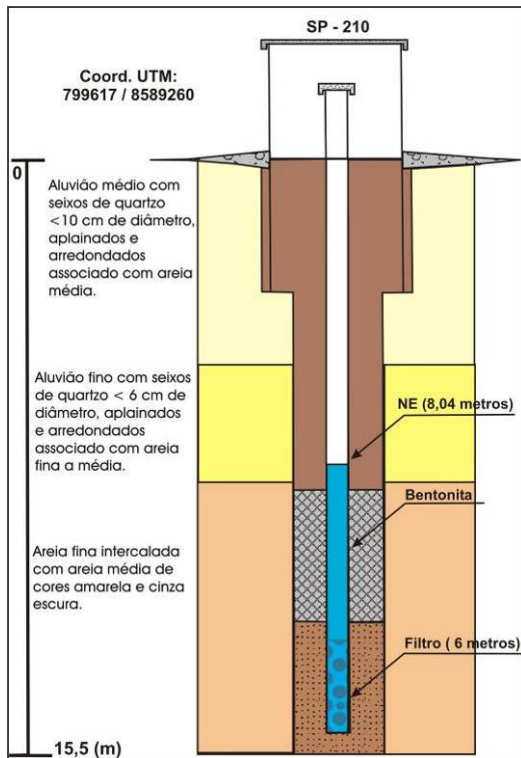
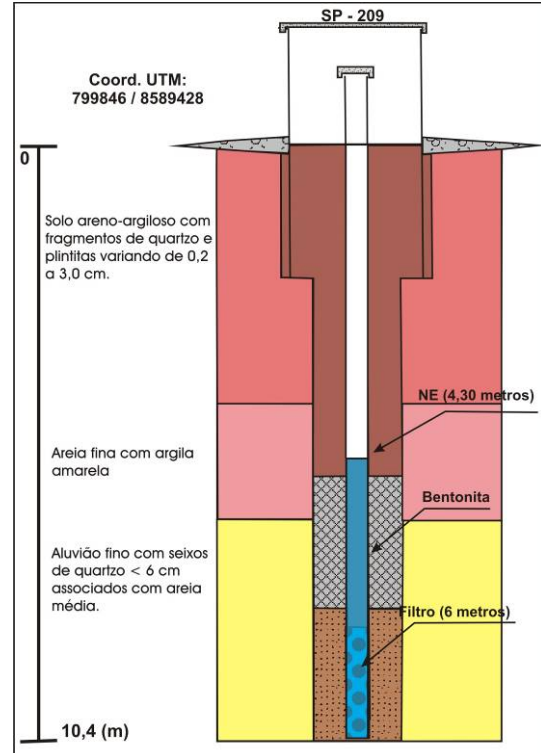
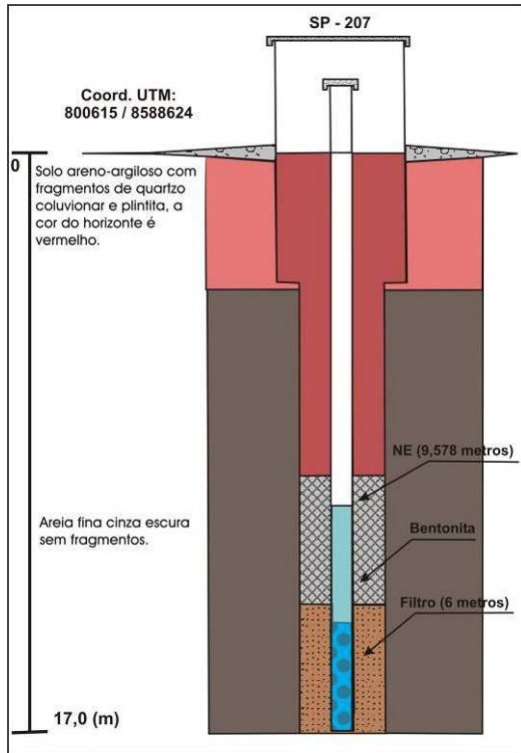
VILA DO RETIRO





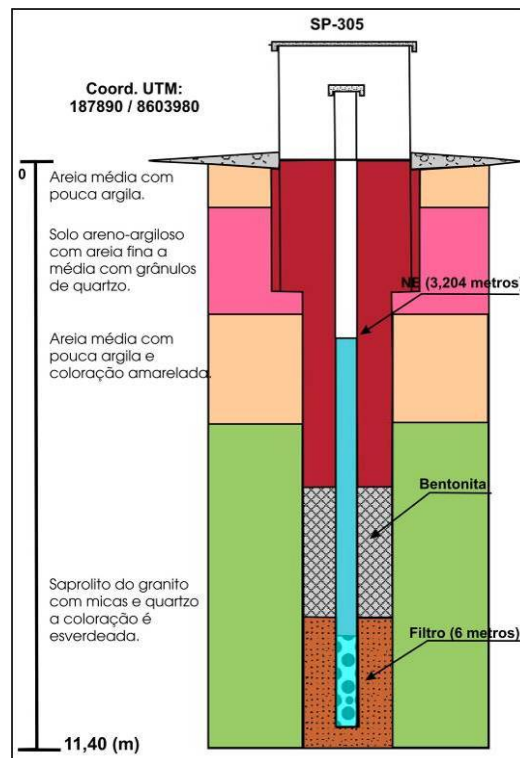
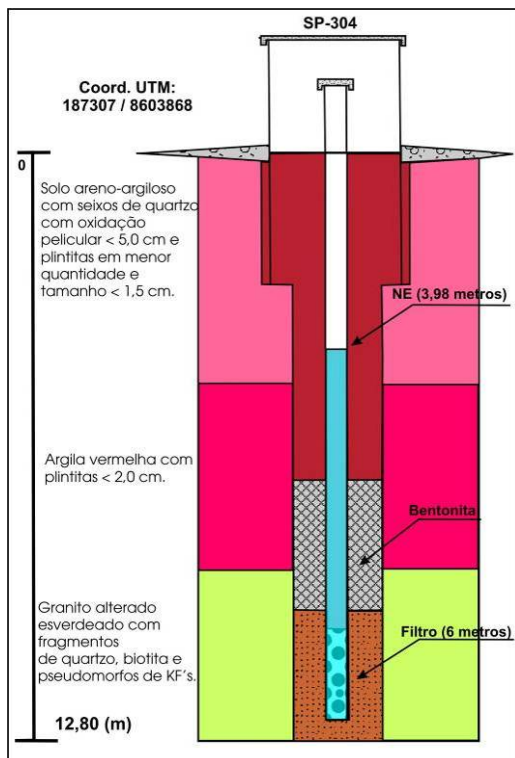
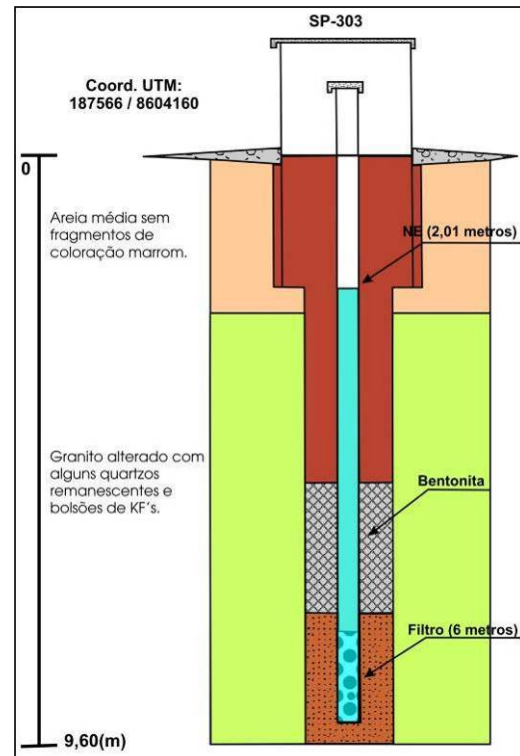
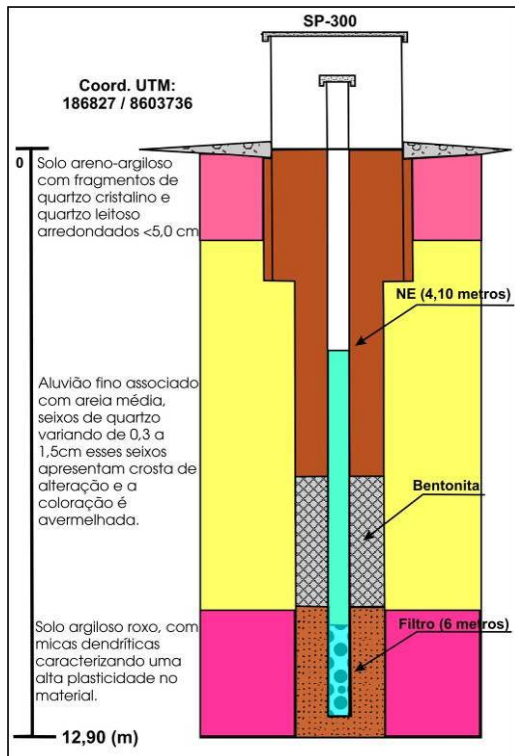
### SÃO SALVADOR DO TOCANTINS



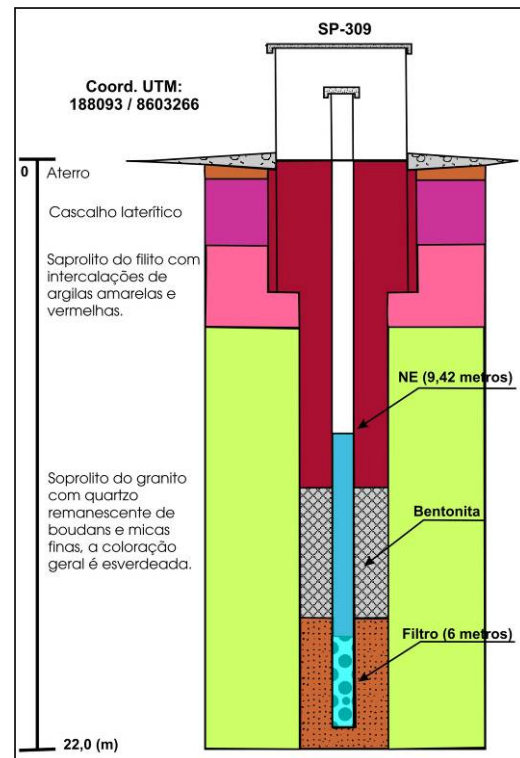
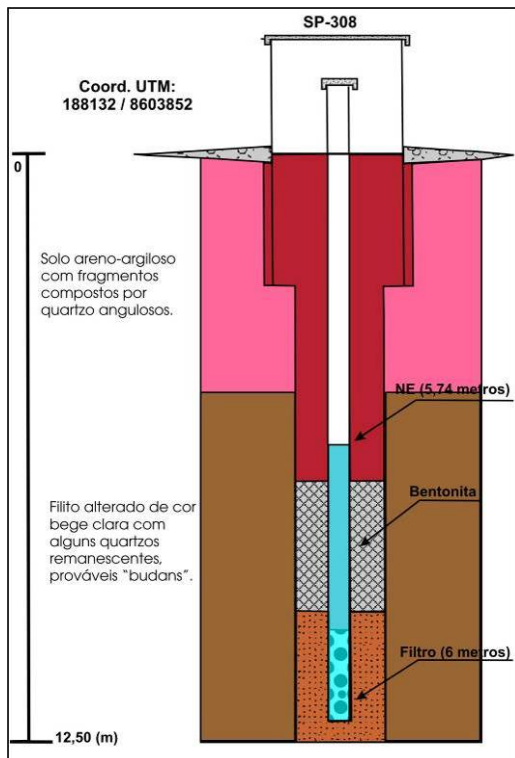
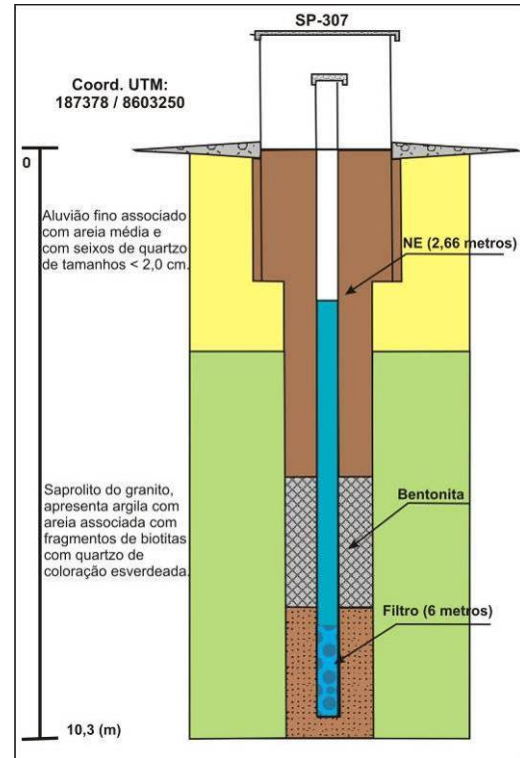
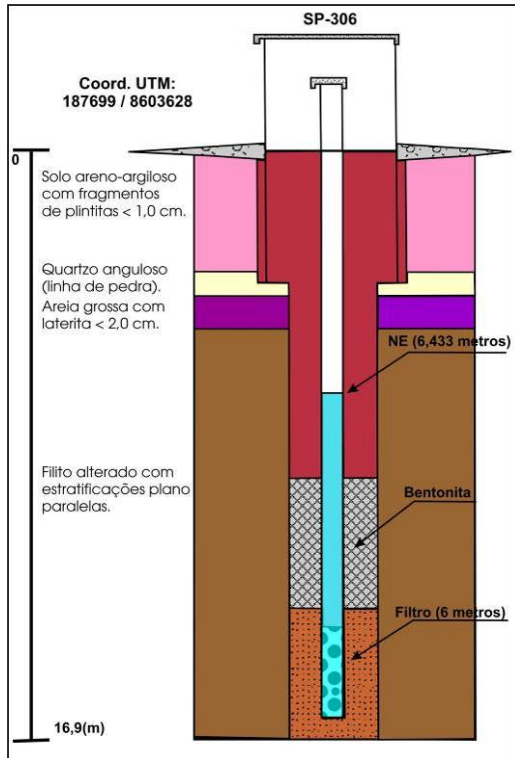


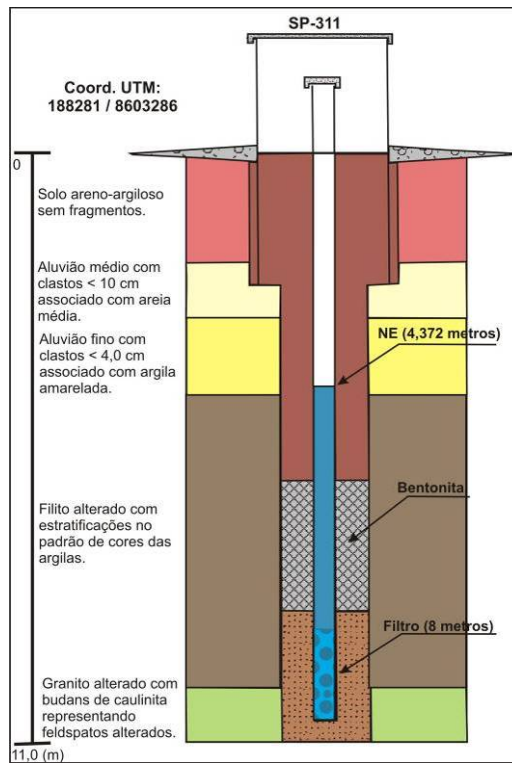


## PARANÁ

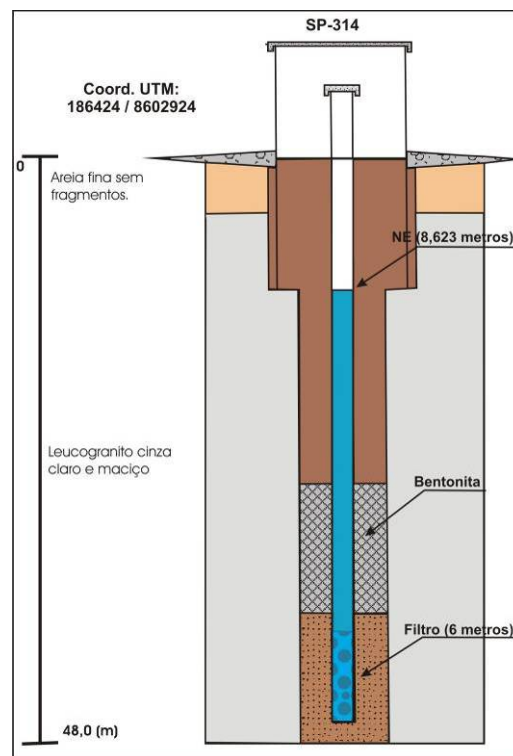
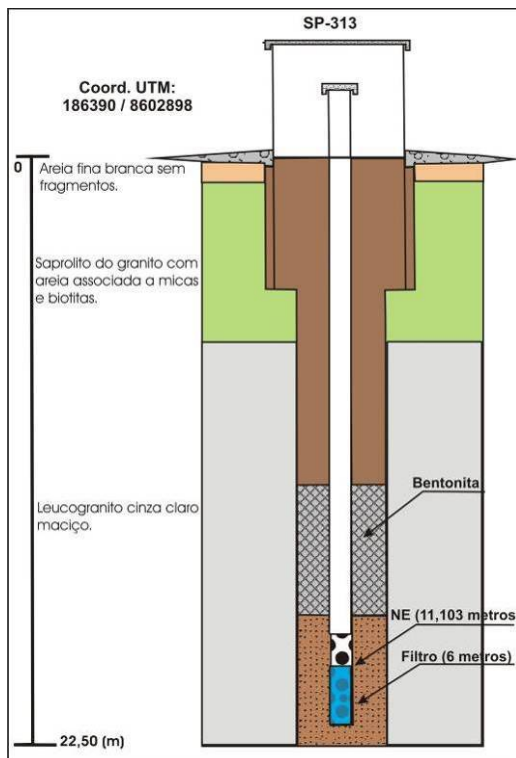








### VILA DO ESPÍRITO SANTO



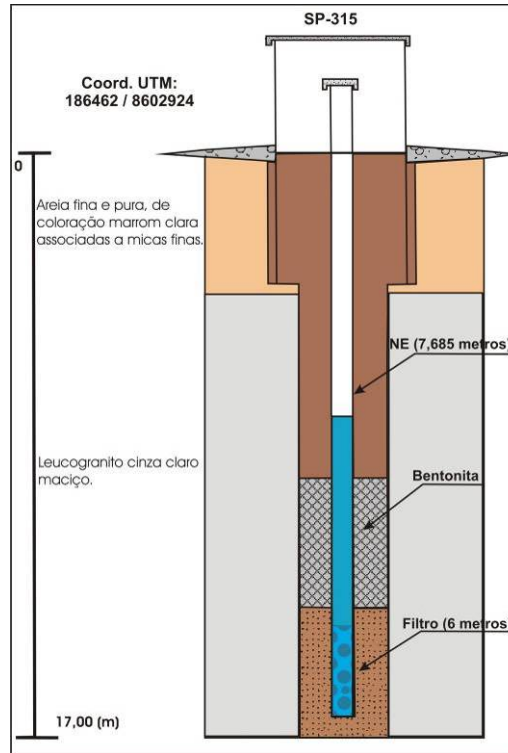


Figura 17. Perfis dos poços estudados no estado do Tocantins.

## CAPÍTULO III - AQUISIÇÃO DOS DADOS E RESULTADOS

### 3.1. AQUISIÇÃO DOS DADOS

Os ensaios de infiltração foram realizados utilizando-se os métodos dos anéis concêntricos (Figura 18) e *open end hole* (Figura 19), cuja metodologia foi descrita no Capítulo I, Apresentação e Fundamentação Teórica.



**Figura 18.** Esquema para o método dos anéis concêntricos.



**Figura 19.** Esquema para o método *open end hole*.

Para os ensaios do tipo *slug test*, os dados foram coletados manualmente, sendo utilizado um medidor de nível com sensor elétrico e alarme (Figura 20), e de forma automática, na qual se utilizou um transdutor de pressão (*diver*) (Figura 21).



**Figura 20.** Medidor de nível.



**Figura 21.** *Diver* (transdutor de pressão).

Os dados coletados, no Distrito Federal e no sul do estado do Tocantins para este estudo foram adquiridos da seguinte maneira para cada poço no qual foi executado o ensaio do tipo *slug test*: primeiro foram obtidas as coordenadas UTM, logo após foi medido o nível estático, utilizando-se um medidor de nível. Essa medida é de fundamental importância, pois sem ela não se pode utilizar as soluções matemáticas para o cálculo da condutividade hidráulica.

Em função do perfil do poço, avaliado previamente (considerando profundidade do poço e principalmente litologia e/ou pedologia local), definiu-se um volume conhecido de água para ser lançada.

Anteriormente ao lançamento da água, equipou-se o poço com o *diver*, o qual foi programado e posicionado pelo menos 2 (dois) metros abaixo do nível estático medido. Posteriormente, o volume de água conhecido é lançado no poço e imediatamente começam a ser feitas as medidas manuais de tempo (utilizando cronômetro digital) e do rebaixamento.

A preparação sistemática dos equipamentos para os ensaios é fundamental, assim como a medida inicial do nível estático para que se tenha melhor controle do resultado do ensaio.

## 3.2. RESULTADOS

### 3.2.1. Resultados dos Ensaios de Infiltração *in situ*

#### DISTRITO FEDERAL

Os resultados dos ensaios realizados no Distrito Federal são apresentados nas Tabelas 4 a 20.

**Tabela 4.** Resultados de ensaios realizados em Neossolo Quartzarênico.

| Neossolo Quartzarênico |                    |         |            |                      |
|------------------------|--------------------|---------|------------|----------------------|
| UTM                    | 8255995N / 188336E |         |            | I=75 mm              |
| Profundidade           | $h_0$              | $h_r$   | $\Delta t$ | Kv(m/s)              |
| Superficial            | 137mm              | 13mm    | 15 min     | $4,1 \times 10^{-4}$ |
| 50                     | 47,8cm             | 16,5cm  | 1244s      | $1,0 \times 10^{-5}$ |
| 100                    | 95,8cm             | 37,2cm  | 1230s      | $9,6 \times 10^{-6}$ |
| 120                    | 161,6cm            | 106,1cm | 1229s      | $4,2 \times 10^{-6}$ |

**Tabela 5.** Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho-Amarelo Arenoso.

| Latossolo Vermelho-Amarelo Arenoso |                    |         |              |                      |
|------------------------------------|--------------------|---------|--------------|----------------------|
| UTM                                | 8256591N / 188423E |         |              | I=30 mm              |
| Profundidade                       | $h_0$              | $h_r$   | $\Delta t$   | Kv(m/s)              |
| Superficial                        | 155mm              | 31mm    | 27 min, 24 s | $5,3 \times 10^{-5}$ |
| 50                                 | 67,4cm             | 24,8cm  | 1462 s       | $8,5 \times 10^{-6}$ |
| 100                                | 98,1cm             | 69,3cm  | 1523s        | $2,5 \times 10^{-6}$ |
| 150                                | 161,6cm            | 106,1cm | 1495s        | $2,9 \times 10^{-6}$ |
| 220                                | 207,5cm            | 163,1cm | 1521s        | $1,9 \times 10^{-6}$ |

**Tabela 6.** Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho Argiloso.

| Latossolo Vermelho Argiloso |                    |         |             |                      |
|-----------------------------|--------------------|---------|-------------|----------------------|
| UTM                         | 8257420N / 188278E |         |             | I=68 mm              |
| Profundidade                | $h_0$              | $h_r$   | $\Delta t$  | Kv(m/s)              |
| Superficial                 | 135mm              | 9mm     | 7 min, 20 s | $4,1 \times 10^{-4}$ |
| 50                          | 47,4cm             | 26,1cm  | 1618 s      | $4,6 \times 10^{-6}$ |
| 100                         | 88,1cm             | 54,1cm  | 1558s       | $3,8 \times 10^{-6}$ |
| 150                         | 158cm              | 114,4cm | 1567s       | $2,5 \times 10^{-6}$ |
| 220                         | 207,7cm            | 158,3cm | 1539s       | $2,2 \times 10^{-6}$ |

**Tabela 7.** Resultados de ensaios realizados em Neossolo Regolítico Psamítico.

| Neossolo Regolítico Psamítico |                    |         |            |                      |
|-------------------------------|--------------------|---------|------------|----------------------|
| UTM                           | 8256881N / 187967E |         |            | I=75 mm              |
| Profundidade                  | $h_0$              | $h_f$   | $\Delta t$ | $K_v(m/s)$           |
| Superficial                   | 135mm              | 5mm     | 5min       | $8,2 \times 10^{-4}$ |
| 60                            | 57,7cm             | 18,7cm  | 1407s      | $1,0 \times 10^{-5}$ |
| 100                           | 97,6cm             | 42,7cm  | 1413s      | $7,3 \times 10^{-6}$ |
| 150                           | 150,5cm            | 100,2   | 1415s      | $3,5 \times 10^{-6}$ |
| 210                           | 203,2cm            | 143,8cm | 1420s      | $3,0 \times 10^{-6}$ |

**Tabela 8.** Resultados de ensaios realizados em Neossolo Regolítico Psamítico (compactado).

| Neossolo Regolítico Psamítico (compactado) |                    |         |            |                      |
|--|--------------------|---------|------------|----------------------|
| UTM  | 8256205N / 186983E |         |            | I=75 mm              |
| Profundidade                               | $h_0$              | $h_f$   | $\Delta t$ | $K_v(m/s)$           |
| Superficial                                | 140mm              | 9mm     | 20min      | $1,4 \times 10^{-4}$ |
| 60   | 67,1cm             | 30,3cm  | 1123s      | $8,8 \times 10^{-6}$ |
| 100  | 97,2cm             | 60,9cm  | 1125s      | $5,1 \times 10^{-6}$ |
| 150  | 154,3cm            | 98,3cm  | 1145s      | $4,9 \times 10^{-6}$ |
| 210  | 202,7cm            | 132,5cm | 1152s      | $4,6 \times 10^{-6}$ |

**Tabela 9.** Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho Distrófico com textura arenosa, e estrutura granular nos horizontes superficiais.

| Latossolo Vermelho Distrófico |                    |         |            |                      |
|-------------------------------|--------------------|---------|------------|----------------------|
| UTM                           | 8281008N / 243722E |         |            | I=70 mm              |
| Profundidade                  | $h_0$              | $h_f$   | $\Delta t$ | $K_v(m/s)$           |
| Superficial                   | 229mm              | 94mm    | 25,5 min   | $8,6 \times 10^{-5}$ |
| 50                            | 46,6cm             | 11,73cm | 1260 s     | $1,7 \times 10^{-6}$ |
| 100                           | 89,7cm             | 59,9cm  | 2600 s     | $1,9 \times 10^{-6}$ |
| 150                           | 130,0cm            | 123,3cm | 2610s      | $1,3 \times 10^{-6}$ |
| 200                           | 131,0cm            | 163,6cm | 2620s      | $9,5 \times 10^{-7}$ |

**Tabela 10.** Resultados de ensaios realizados em Latossolo Amarelo Distrófico, textura argilosa.

| Latossolo Amarelo Distrófico |                  |         |            |                       |
|------------------------------|------------------|---------|------------|-----------------------|
| UTM                          | 8206954 / 243848 |         |            | I=70 mm               |
| Profundidade                 | $h_0$            | $h_f$   | $\Delta t$ | $K_v(m/s)$            |
| Superficial                  | 21mm             | 156mm   | 25,47min   | $8,66 \times 10^{-5}$ |
| 50                           | 46,6cm           | 11,7cm  | 1260s      | $1,42 \times 10^{-5}$ |
| 100                          | 88,7cm           | 51cm    | 1301s      | $5,37 \times 10^{-6}$ |
| 150                          | 139,6cm          | 118,6cm | 1290s      | $1,60 \times 10^{-6}$ |
| 200                          | 185,1cm          | 151,5cm | 1279s      | $2,06 \times 10^{-6}$ |

**Tabela 11.** Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho Amarelo Ácrico com textura arenosa.

| Latossolo Vermelho Amarelo Ácrico |                  |        |            |                       |
|-----------------------------------|------------------|--------|------------|-----------------------|
| UTM                               | 8284147 / 237205 |        |            | I=70 mm               |
| Profundidade                      | $h_0$            | $h_f$  | $\Delta t$ | $K_v(m/s)$            |
| Superficial                       | 31mm             | 106mm  | 30,00min   | $2,72 \times 10^{-5}$ |
| 30                                | 40,7cm           | 10,6cm | 1856s      | $9,06 \times 10^{-6}$ |
| 50                                | 51,3cm           | 37,5cm | 1840s      | $2,15 \times 10^{-6}$ |

**Tabela 12.** Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho Distrófico com textura arenosa.

| Latossolo Vermelho Distrófico |                  |         |            |                       |
|-------------------------------|------------------|---------|------------|-----------------------|
| UTM                           | 8280956 / 213350 |         |            | I=55mm                |
| Profundidade                  | $h_0$            | $h_f$   | $\Delta t$ | $K_v(m/s)$            |
| Superficial                   | 28mm             | 63mm    | 35,93min   | $7,63 \times 10^{-5}$ |
| 50                            | 46cm             | 17cm    | 1938 s     | $6,42 \times 10^{-6}$ |
| 100                           | 91,7cm           | 65,5cm  | 1962 s     | $2,19 \times 10^{-6}$ |
| 150                           | 150,6cm          | 140,8cm | 1982 s     | $5,11 \times 10^{-7}$ |
| 200                           | 187,8cm          | 177,8cm | 2002 s     | $3,57 \times 10^{-7}$ |

**Tabela 13.** Resultados de ensaios realizados em Cambissolo Háplico Distrófico.

| Cambissolo Háplico Distrófico |                  |        |            |                       |
|-------------------------------|------------------|--------|------------|-----------------------|
| UTM                           | 8281952 / 232157 |        |            | I=55                  |
| Profundidade                  | $h_0$            | $h_f$  | $\Delta t$ | $K_v(m/s)$            |
| Superficial                   | 37mm             | 115mm  | 37,50min   | $2,32 \times 10^{-5}$ |
| 30                            | 36,1cm           | 14cm   | 2325 s     | $5,45 \times 10^{-6}$ |
| 70                            | 95,3cm           | 36,2cm | 2351 s     | $5,31 \times 10^{-6}$ |

**Tabela 14.** Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho Distrófico com textura argilosa.

| Latossolo Vermelho Distrófico |                  |         |            |                       |
|-------------------------------|------------------|---------|------------|-----------------------|
| UTM                           | 8285787 / 811412 |         |            | I=60mm                |
| Profundidade                  | $h_0$            | $h_f$   | $\Delta t$ | $K_v(m/s)$            |
| Superficial                   | 27mm             | 52mm    | 41,68min   | $4,66 \times 10^{-6}$ |
| 50                            | 42,5cm           | 6cm     | 2055 s     | $1,19 \times 10^{-5}$ |
| 100                           | 92cm             | 49,1cm  | 2082 s     | $3,79 \times 10^{-6}$ |
| 150                           | 152cm            | 149,3cm | 2100 s     | $1,08 \times 10^{-7}$ |
| 200                           | 178,6cm          | 133,3   | 2132s      | $1,75 \times 10^{-6}$ |

**Tabela 15.** Resultados de ensaios realizados em Latossolo Amarelo Distrófico Argiloso.

| Latossolo Amarelo Distrófico Argiloso |                  |         |            |                       |
|---------------------------------------|------------------|---------|------------|-----------------------|
| UTM                                   | 218536 / 8273828 |         |            | I=83                  |
| Profundidade                          | $h_0$            | $h_f$   | $\Delta t$ | $K_v(m/s)$            |
| Superficial                           | 29mm             | 92mm    | 39,78min   | $1,78 \times 10^{-5}$ |
| 50                                    | 42,5cm           | 24,7cm  | 1431 s     | $4,74 \times 10^{-6}$ |
| 100                                   | 90,7cm           | 39cm    | 1454 s     | $3,73 \times 10^{-6}$ |
| 150                                   | 161,3cm          | 158,9cm | 1488 s     | $1,28 \times 10^{-7}$ |
| 200                                   | 181cm            | 181cm   | 1524 s     | 0                     |

**Tabela 16.** Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho Distrófico com textura arenosa.

| Latossolo Vermelho Distrófico |                  |        |            |                       |
|-------------------------------|------------------|--------|------------|-----------------------|
| UTM                           | 8235560 / 207473 |        |            | I=60                  |
| Profundidade                  | $h_0$            | $h_f$  | $\Delta t$ | $K_v(m/s)$            |
| Superficial                   | 150mm            | 40mm   | 41,03 min  | $2,2 \times 10^{-5}$  |
| 50                            | 49,3cm           | 18,5cm | 2412s      | $2,56 \times 10^{-6}$ |
| 100                           | 110,5cm          | 69,6cm | 2434s      | $2,22 \times 10^{-6}$ |
| 150                           | 148cm            | 99,2cm | 2455s      | $2,29 \times 10^{-6}$ |
| 200                           | 192,5cm          | 167cm  | 2470s      | $2,33 \times 10^{-6}$ |

**Tabela 17.** Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho Distrófico com textura arenosa.

| Latossolo Vermelho Distrófico |                  |         |            |                       |
|-------------------------------|------------------|---------|------------|-----------------------|
| UTM                           | 8233540 / 193216 |         |            | I=60                  |
| Profundidade                  | $h_0$            | $h_f$   | $\Delta t$ | $K_v(m/s)$            |
| Superficial                   | 154mm            | 101mm   | 40,57 min  | $1,03 \times 10^{-5}$ |
| 50                            | 47cm             | 24cm    | 2430s      | $2,69 \times 10^{-6}$ |
| 100                           | 105cm            | 78cm    | 2461s      | $2,20 \times 10^{-6}$ |
| 150                           | 152,5cm          | 130,5cm | 2486s      | $3,26 \times 10^{-6}$ |
| 210                           | 204cm            | 191cm   | 2510s      | $7,58 \times 10^{-6}$ |

**Tabela 18.** Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho Distrófico com textura arenosa e estrutura granular nos horizontes superficiais.

| Latossolo Vermelho Distrófico |                  |         |            |                       |
|-------------------------------|------------------|---------|------------|-----------------------|
| UTM                           | 8230794 / 184667 |         |            | I=55                  |
| Profundidade                  | $h_0$            | $h_f$   | $\Delta t$ | $K_v(m/s)$            |
| Superficial                   | 152mm            | 5mm     | 7,8 min    | $4,01 \times 10^{-5}$ |
| 50                            | 49cm             | 24cm    | 2385s      | $2,92 \times 10^{-6}$ |
| 100                           | 110,9cm          | 69,7cm  | 2406s      | $2,53 \times 10^{-6}$ |
| 150                           | 150,8cm          | 83cm    | 2425s      | $2,42 \times 10^{-6}$ |
| 200                           | 194,7cm          | 154,2cm | 2451s      | $2,54 \times 10^{-6}$ |

**Tabela 19.** Resultados de ensaios realizados em Gleissolo Háplico (drenado).

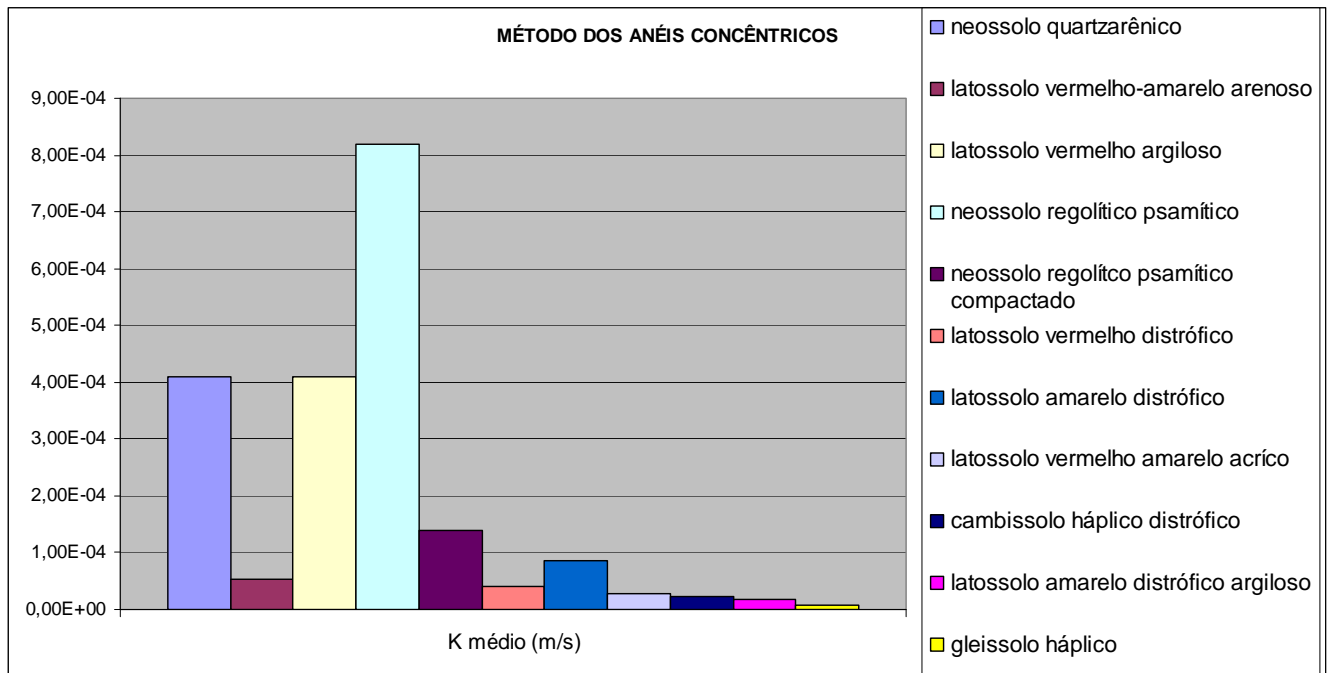
| Gleissolo Háplico |                  |        |            |                       |
|-------------------|------------------|--------|------------|-----------------------|
| UTM               | 8282785 / 223430 |        |            | I=60                  |
| Profundidade      | $h_0$            | $h_f$  | $\Delta t$ | $K_v(m/s)$            |
| Superficial       | 113mm            | 86mm   | 41,53 min  | $0,65 \times 10^{-5}$ |
| 50                | 39cm             | 36,5cm | 2485s      | $1,24 \times 10^{-5}$ |
| 100               | 66,7cm           | 64,9cm | 2539s      | $1,40 \times 10^{-5}$ |

**Tabela 20.** Resultados de ensaios realizados em Latossolo Vermelho Distrófico com textura argilosa.

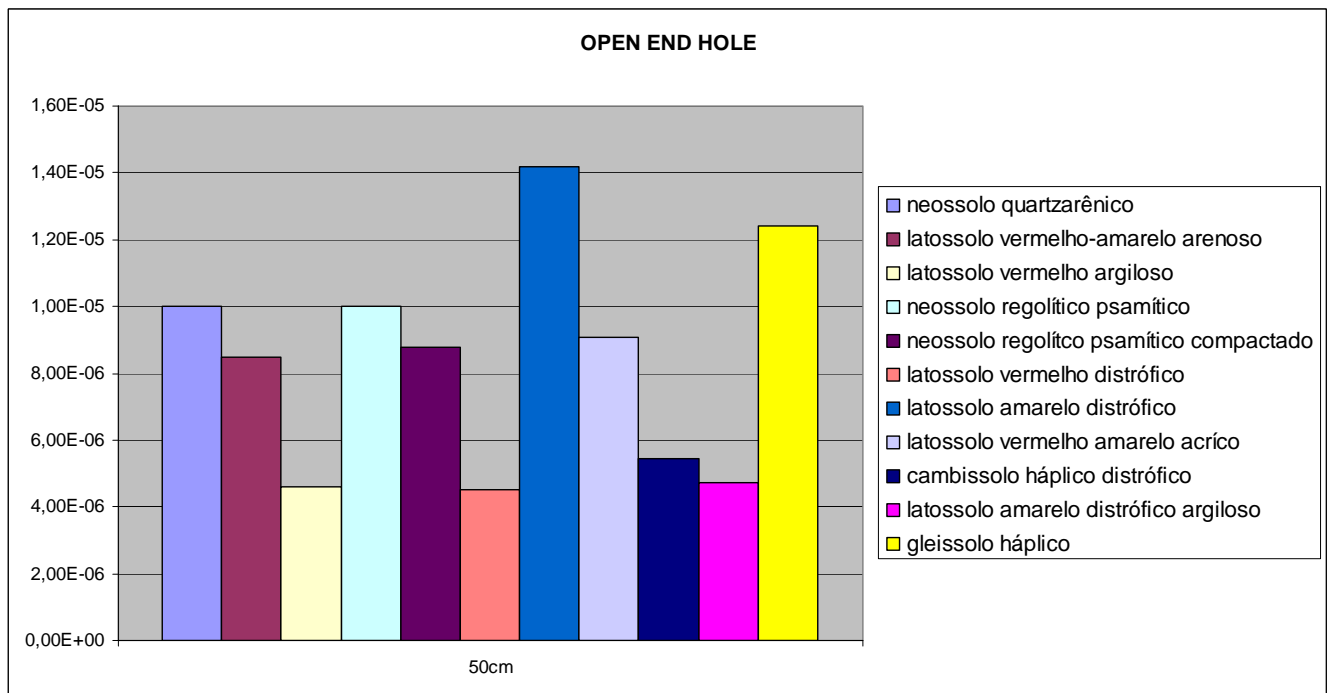
| Latossolo Vermelho Distrófico |                  |         |            |                       |
|-------------------------------|------------------|---------|------------|-----------------------|
| UTM                           | 8226625 / 797984 |         |            | I=50                  |
| Profundidade                  | $h_0$            | $h_f$   | $\Delta t$ | $K_v(m/s)$            |
| Superficial                   | 140mm            | 23mm    | 40,23 min  | $3,79 \times 10^{-5}$ |
| 50                            | 49,5cm           | 19,5cm  | 2365s      | $3,38 \times 10^{-6}$ |
| 100                           | 105cm            | 57cm    | 2388s      | $3,51 \times 10^{-6}$ |
| 135                           | 148cm            | 128,5cm | 2402s      | $5,39 \times 10^{-6}$ |
| 200                           | 200,5cm          | 180cm   | 2420s      | $5,05 \times 10^{-6}$ |

Os gráficos apresentados, da Figura 22 a Figura 26, ilustram os valores médios de condutividade em superfície e em profundidade obtidos no Distrito Federal.

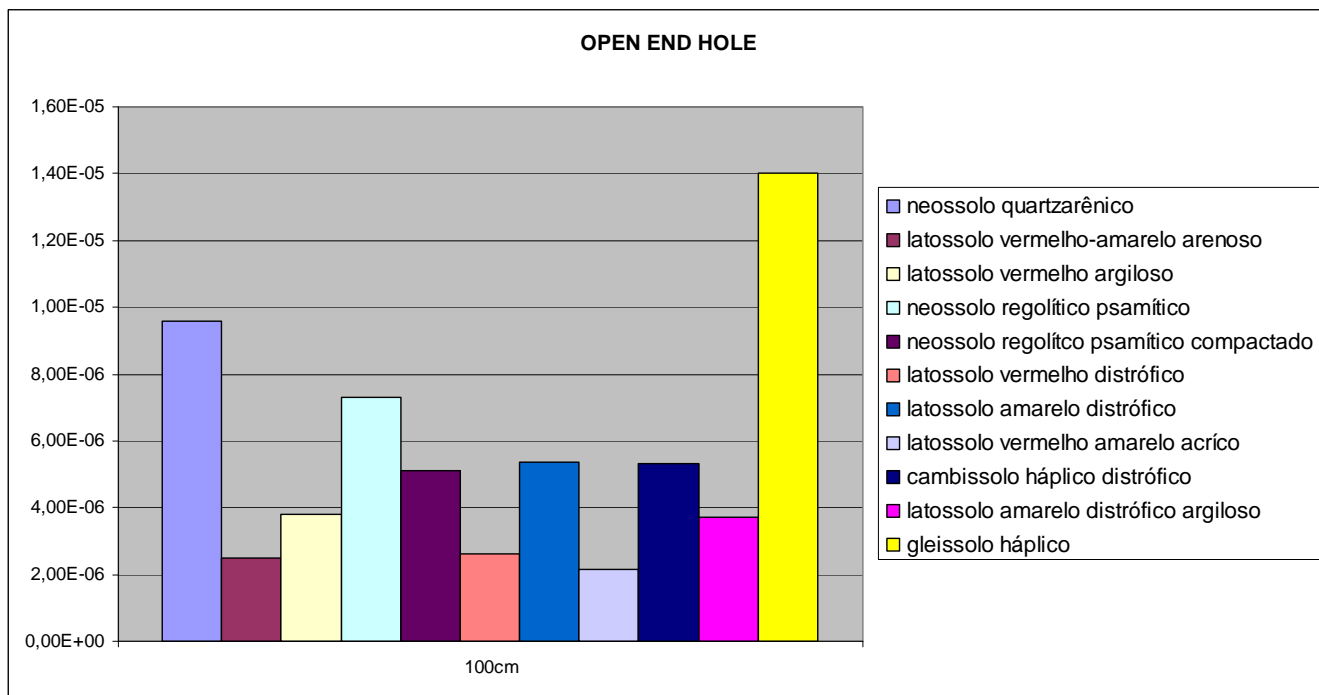




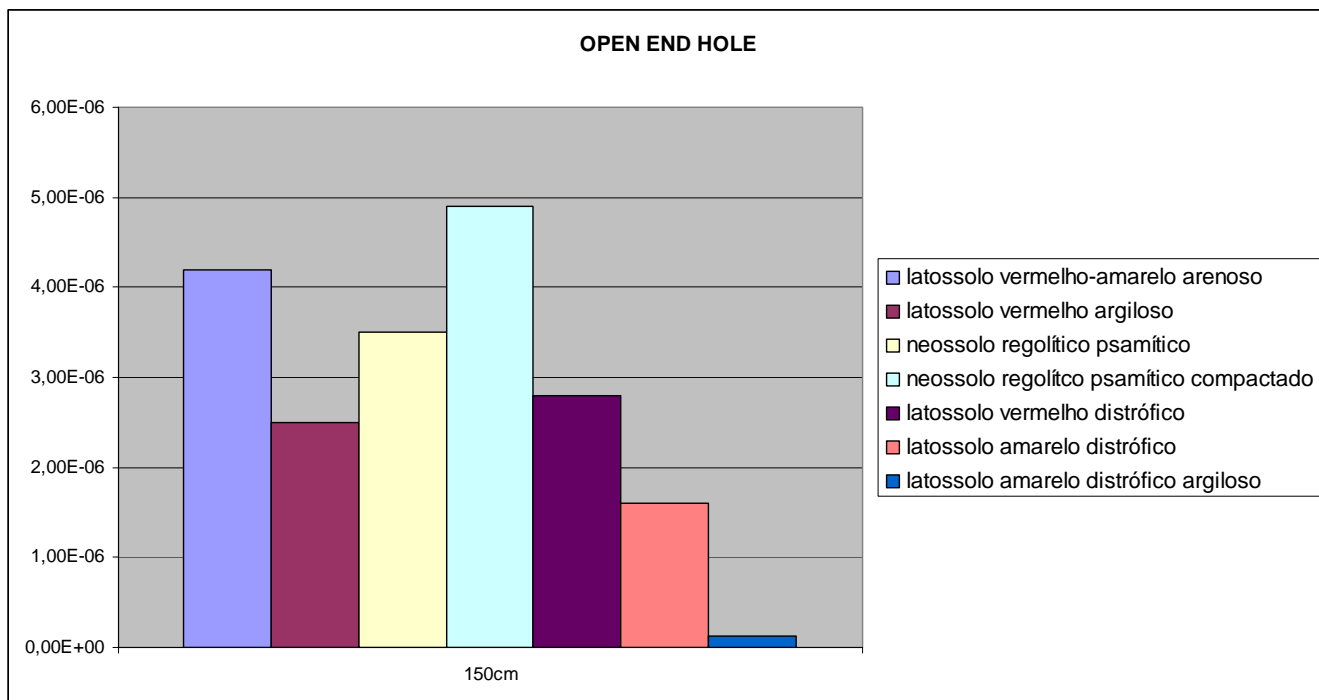
**Figura 22.** Ilustração gráfica dos valores médios de K em superfície (método dos anéis concêntricos) - DF.



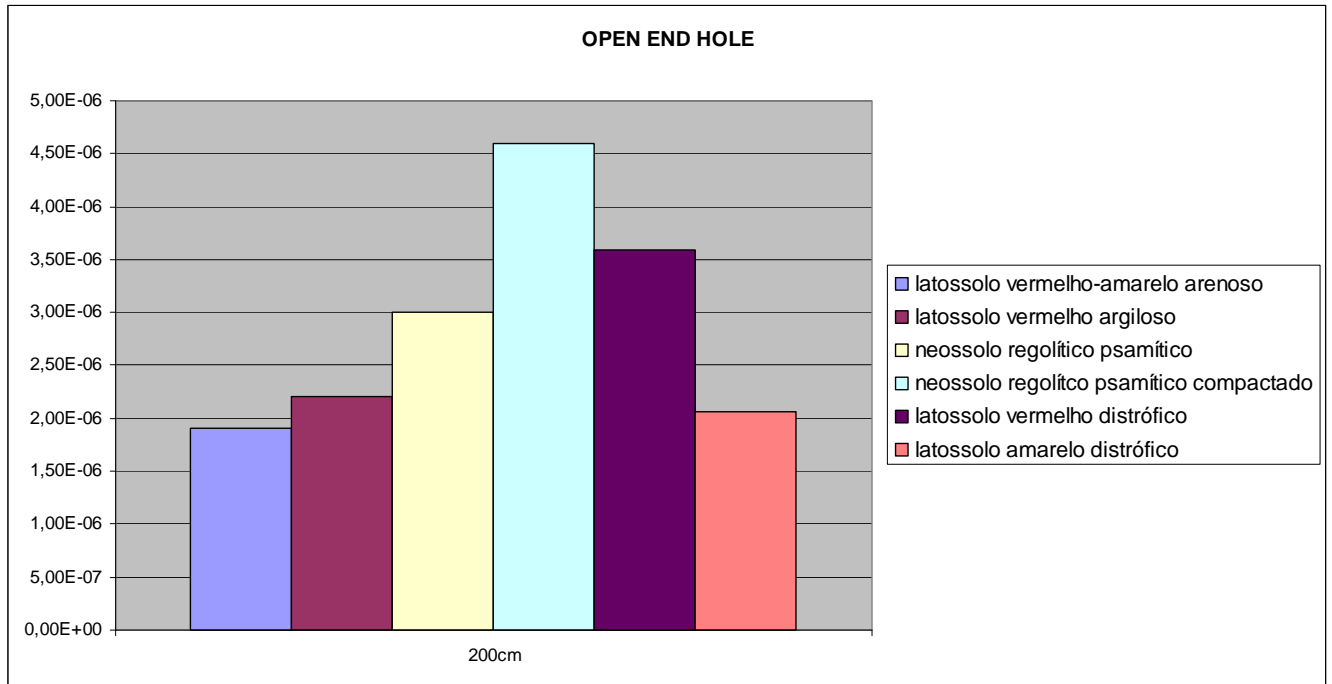
**Figura 23.** Ilustração gráfica dos valores médios de K em 50 cm de profundidade (método *open end hole*) - DF.



**Figura 24.** Ilustração gráfica dos valores médios de K em 100 cm de profundidade (método *open end hole*) - DF.



**Figura 25.** Ilustração gráfica dos valores médios de K em 150 cm de profundidade (método *open end hole*) - DF.



**Figura 26.** Ilustração gráfica dos valores médios de K em 200 cm de profundidade (método *open end hole*) - DF.

## REGIÃO SUL DO ESTADO DO TOCANTINS

Os resultados dos ensaios realizados nas regiões de São Salvador do Tocantins e de Paranã são apresentados nas Tabelas 21 a 45.

**Tabela 21.** Neossolo Flúvico rico em areia de coloração amarela. A partir de 190 cm, iniciou-se um nível de cascalho grosso.

| Neossolo Flúvico |                   |       |            |                          |
|------------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM              | 8603070 / 188.478 |       |            | I=62mm                   |
| Profundidade     | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial      | 156               | 129   | 42,5 min   | $4,6 \times 10^{-6}$ m/s |
| 50               | 86,1              | 60,3  | 2590 s     | $1,7 \times 10^{-6}$ m/s |
| 100              | 89,4              | 59,9  | 2600 s     | $1,9 \times 10^{-6}$ m/s |
| 150              | 162,5             | 123,3 | 2610       | $1,3 \times 10^{-6}$ m/s |
| 190              | 199,8             | 163,6 | 2620       | $9,5 \times 10^{-7}$ m/s |

**Tabela 22.** Material areno-argiloso (Neossolo Flúvico) onde o topo do horizonte de cascalho inicia-se a 163 cm.

| Neossolo Flúvico |                   |       |            |                          |
|------------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM              | 8603619 / 187.595 |       |            | I=50mm                   |
| Profundidade     | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial      | 180               | 140   | 45,0 min   | $4,6 \times 10^{-6}$ m/s |
| 50               | 56,6              | 53,5  | 2370 s     | $2,9 \times 10^{-7}$ m/s |
| 100              | 132,9             | 105,6 | 2390 s     | $4,8 \times 10^{-6}$ m/s |
| 150              | 167,8             | 124,7 | 2435 s     | $6,0 \times 10^{-6}$ m/s |
| 160              | 184,3             | 159,7 | 2450 s     | $7,3 \times 10^{-7}$ m/s |

**Tabela 23.** Material arenoso amarelo, em área natural de pasto abandonado com pouco pisoteio.

| Material Arenoso |                   |       |            |                          |
|------------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM              | 8602608 / 190.226 |       |            | I=65mm                   |
| Profundidade     | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial      | 153               | 33    | 6,26 min   | $2,6 \times 10^{-4}$ m/s |
| 50               | 53,6              | 8,6   | 1419 s     | $1,6 \times 10^{-5}$ m/s |
| 100              | 115,6             | 92,9  | 1470 s     | $1,8 \times 10^{-6}$ m/s |
| 150              | 151,5             | 135,5 | 1496 s     | $9,3 \times 10^{-7}$ m/s |
| 210              | 202,8             | 179,8 | 1585 s     | $9,4 \times 10^{-7}$ m/s |

**Tabela 24.** Material Areno-Siltoso típico de origem fluvial, sem cascalho. A 175 cm, alcançou-se a zona saturada.

| Material Areno-Siltoso |                   |       |            |                          |
|------------------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM                    | 8604073 / 187.983 |       |            | I=75mm                   |
| Profundidade           | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial            | 157               | 57    | 42 min     | $3,0 \times 10^{-5}$ m/s |
| 60                     | 50,1              | 46,1  | 2612 s     | $3,9 \times 10^{-7}$ m/s |
| 100                    | 127,1             | 123,8 | 2524 s     | $1,3 \times 10^{-7}$ m/s |
| 150                    | 145,5             | 140,1 | 2510 s     | $1,8 \times 10^{-7}$ m/s |
| 175                    | 165,6             | 159,2 | 2460 s     | $2,0 \times 10^{-7}$ m/s |

**Tabela 25.** Neossolo Flúvico, com evidência de latossolização. Nível de cascalho a 186 cm. Textura areno-argilosa.

| Neossolo Flúvico |                   |       |            |                          |
|------------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM              | 8603681 / 187.773 |       |            | I=55 mm                  |
| Profundidade     | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial      | 157               | 57    | 42 min     | $4,8 \times 10^{-5}$ m/s |
| 60               | 50,1              | 46,1  | 2612 s     | $1,3 \times 10^{-6}$ m/s |
| 100              | 127,1             | 123,8 | 2524 s     | $7,1 \times 10^{-7}$ m/s |
| 150              | 145,5             | 140,1 | 2510 s     | $6,7 \times 10^{-7}$ m/s |

**Tabela 26.** Material Arenoso, com passagens de horizontes mais finos. Todo o perfil apresenta cores amareladas e mais escuras no topo (devido à maior contribuição de matéria orgânica).

| Material Arenoso |                   |       |            |                          |
|------------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM              | 8603231 / 187.396 |       |            | I=70 mm                  |
| Profundidade     | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial      | 157               | 111   | 45,25 min  | $8,9 \times 10^{-6}$ m/s |
| 60               | 58,5              | 56,2  | 2743 s     | $1,8 \times 10^{-7}$ m/s |
| 100              | 138,3             | 135,4 | 2735 s     | $4,2 \times 10^{-8}$ m/s |
| 150              | 162,8             | 152,8 | 2723 s     | $2,9 \times 10^{-7}$ m/s |
| 200              | 205,7             | 203,9 | 2713 s     | $1,7 \times 10^{-7}$ m/s |

**Tabela 27.** Área natural próxima ao rio. Aluvião composto essencialmente de areias amarelas.

| Aluvião      |                   |       |            |                          |
|--------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM          | 8602762 / 186.951 |       |            | I=70 mm                  |
| Profundidade | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial  | 163               | 27    | 47,46 min  | $8,3 \times 10^{-5}$ m/s |
| 50           | 50                | 34,1  | 1839 s     | $2,6 \times 10^{-6}$ m/s |
| 100          | 124,6             | 96,2  | 1820 s     | $1,7 \times 10^{-6}$ m/s |
| 150          | 145,9             | 111,1 | 1898 s     | $1,7 \times 10^{-6}$ m/s |
| 200          | 190,6             | 136,3 | 1928 s     | $2,1 \times 10^{-6}$ m/s |

**Tabela 28.** Material de origem fluvial areno-argiloso de coloração amarelada. A fração arenosa predomina e não é observada estruturação importante (apenas pode-se caracterizar pequenos grumos em horizontes isolados). Topo do horizonte de cascalho a 210 cm.

| Material de origem fluvial areno-argiloso |                   |       |            |                          |
|---|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM                                       | 8603643 / 187.148 |       |            | I=70 mm                  |
| Profundidade                              | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial                               | 151               | 127   | 35,5 min   | $3,8 \times 10^{-5}$ m/s |
| 60  | 60,1              | 50,8  | 2438 s     | $3,0 \times 10^{-6}$ m/s |
| 100                                       | 131,9             | 114,7 | 2439 s     | $4,4 \times 10^{-6}$ m/s |
| 150                                       | 161,6             | 135,3 | 2386 s     | $4,2 \times 10^{-6}$ m/s |
| 190                                       | 187,6             | 167,8 | 2446 s     | $1,3 \times 10^{-6}$ m/s |

**Tabela 29.** Material arenoso com restrita contribuição silto-argilosa. Não foi observado nível de cascalho.

| Material Arenoso |                   |       |            |                          |
|------------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM              | 8603643 / 187.148 |       |            | I=70                     |
| Profundidade     | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial      | 156               | 49    | 35,5 min   | $3,8 \times 10^{-5}$ m/s |
| 60               | 68,5              | 64,6  | 2438 s     | $3,0 \times 10^{-6}$ m/s |
| 100              | 141,5             | 129,8 | 2439 s     | $4,4 \times 10^{-6}$ m/s |
| 150              | 165,8             | 135,3 | 2386 s     | $4,2 \times 10^{-6}$ m/s |
| 250              | 282,7             | 167,8 | 2446 s     | $1,3 \times 10^{-6}$ m/s |

**Tabela 30.** Material Arenoso de origem fluvial com contribuição variável de finos (silte + argila).

| Material arenoso |                   |       |            |                          |
|------------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM              | 8603418 / 186.999 |       |            | I=70                     |
| Profundidade     | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial      | 159               | 46    | 30,16 min  | $4,7 \times 10^{-5}$ m/s |
| 40               | 37,5              | 18,9  | 2410 s     | $3,5 \times 10^{-6}$ m/s |
| 100              | 121,4             | 105,1 | 2410 s     | $7,4 \times 10^{-6}$ m/s |
| 150              | 144,2             | 140,9 | 2423 s     | $1,1 \times 10^{-7}$ m/s |

**Tabela 31.** Material amarelado de origem fluvial. A partir de 117 cm inicia nível de concreções lateríticas endurecidas. O nível mosqueado ocorre a partir de 87 cm.

| Material amarelado de origem fluvial |                     |       |            |                          |
|--------------------------------------|---------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM                                  | 188.468 / 8.603.822 |       |            | I=90 mm                  |
| Profundidade                         | $h_0$               | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial                          | 142                 | 42    | 31,46 min  | $5,8 \times 10^{-5}$ m/s |
| 50                                   | 54,3                | 33,1  | 2720 s     | $2,2 \times 10^{-6}$ m/s |
| 100                                  | 130,1               | 101,8 | 2720 s     | $1,1 \times 10^{-6}$ m/s |
| 120                                  | 170,3               | 155,8 | 2726 s     | $4,0 \times 10^{-7}$ m/s |

**Tabela 32.** Material areno-argiloso. A 152 cm iniciou horizonte petroplíntico sem cascalho aluvionar.

| Material areno-argiloso |                   |       |            |                          |
|-------------------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM                     | 8603366 / 188.170 |       |            | I=70 mm                  |
| Profundidade            | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial             | 165               | 75    | 41,1 min   | $2,2 \times 10^{-5}$ m/s |
| 50                      | 49,4              | 39    | 2607 s     | $1,1 \times 10^{-6}$ m/s |
| 100                     | 146,4             | 121,1 | 2614 s     | $9,0 \times 10^{-7}$ m/s |
| 150                     | 163               | 128,3 | 2623 s     | $1,1 \times 10^{-6}$ m/s |

**Tabela 33.** Latossolo Vermelho-Amarelo, argiloso. A 208 cm ocorre nível de plintita, onde o horizonte fica mais denso e endurecido com o aumento da profundidade.

| Latossolo Vermelho-Amarelo |                   |       |            |                          |
|----------------------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM                        | 8589015 / 800.437 |       |            | I=50 mm                  |
| Profundidade               | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial                | 186               | 68    | 40 min     | $2,0 \times 10^{-5}$ m/s |
| 50                         | 65,4              | 51,8  | 2599 s     | $1,1 \times 10^{-6}$ m/s |
| 100                        | 140,7             | 123,5 | 2605 s     | $6,2 \times 10^{-7}$ m/s |
| 150                        | 157,3             | 142,3 | 2605 s     | $4,8 \times 10^{-7}$ m/s |
| 210                        | 205,6             | 151,6 | 2625 s     | $1,4 \times 10^{-6}$ m/s |

**Tabela 34.** Latossolo Vermelho, textura franca.

| Latossolo Vermelho |                   |       |            |                          |
|--------------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM                | 8589022 / 800.814 |       |            | I=70 mm                  |
| Profundidade       | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial        | 149               | 131   | 45 min     | $3,3 \times 10^{-6}$ m/s |
| 50                 | 68                | 61,8  | 2704 s     | $4,4 \times 10^{-7}$ m/s |
| 100                | 140,5             | 124,3 | 2706 s     | $5,6 \times 10^{-7}$ m/s |
| 150                | 165,4             | 135,5 | 2712 s     | $9,1 \times 10^{-7}$ m/s |
| 230                | 280,6             | 206,2 | 2721 s     | $1,4 \times 10^{-6}$ m/s |

**Tabela 35.** Latossolo Vermelho-Amarelo. A 126 cm inicia nível de cascalho com quartzo e concreções lateríticas finas. Os clastos arredondados apresentam diâmetro médio de 1 cm.

| Latossolo Vermelho-Amarelo |                   |       |            |                          |
|----------------------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM                        | 8588560 / 800.992 |       |            | I=80 mm                  |
| Profundidade               | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial                | 155               | 45    | 25,28 min  | $6,5 \times 10^{-5}$ m/s |
| 50                         | 48,3              | 30,7  | 2610 s     | $2,1 \times 10^{-6}$ m/s |
| 70                         | 141,4             | 123,8 | 2634 s     | $6,3 \times 10^{-6}$ m/s |
| 105                        | 160,9             | 142,5 | 2636 s     | $5,7 \times 10^{-7}$ m/s |

**Tabela 36.** Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso, sem qualquer nível com cascalho ou pedregosidade. Estrutura granular fina e grumosa com aumento da profundidade.

| Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso |                   |       |            |                          |
|-------------------------------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM                                 | 8588872 / 800.500 |       |            | I=80 mm                  |
| Profundidade                        | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial                         | 149               | 36    | 25 min     | $7,5 \times 10^{-5}$ m/s |
| 50                                  | 55,1              | 21,4  | 2510 s     | $4,7 \times 10^{-6}$ m/s |
| 100                                 | 145,8             | 114,3 | 2520 s     | $1,2 \times 10^{-6}$ m/s |
| 150                                 | 159,7             | 127,4 | 2512 s     | $1,1 \times 10^{-6}$ m/s |
| 260                                 | 283,1             | 201,2 | 2515 s     | $1,6 \times 10^{-6}$ m/s |

**Tabela 37.** Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso. Horizonte petroplântico concrecionário a 135 cm. A feição do silto-argiloso indica que o material de partida que sofreu latossolização era representado por sedimentos fluviais.

| Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso |                   |       |            |                          |
|-------------------------------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM                                 | 8589227 / 800.250 |       |            | I=55 mm                  |
| Profundidade                        | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial                         | 179               | 161   | 31,11 min  | $3,1 \times 10^{-6}$ m/s |
| 50                                  | 48,7              | 22    | 1935 s     | $5,1 \times 10^{-6}$ m/s |
| 90                                  | 137               | 117,5 | 1958 s     | $9,8 \times 10^{-7}$ m/s |
| 100                                 | 159,1             | 123   | 2001 s     | $1,6 \times 10^{-6}$ m/s |
| 135                                 | 172               | 138,2 | 1915 s     | $1,4 \times 10^{-6}$ m/s |

**Tabela 38.** Aluvião com intercalação de cascalhos finos e médios com pouca matriz arenosa. Há pequena contribuição argilosa. Material pouco compactado comum de aluviões recentes.

| Aluvião com intercalação de cascalhos finos e médios |                   |       |            |                          |
|--|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM  | 8589472 / 799.916 |       |            | I=65 mm                  |
| Profundidade   | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial  | 185               | 91    | 45,1 min   | $1,7 \times 10^{-5}$ m/s |
| 50   | 47,6              | 23,1  | 2730 s     | $3,3 \times 10^{-6}$ m/s |
| 100  | 137,4             | 133,3 | 2747 s     | $1,3 \times 10^{-7}$ m/s |
| 125  | 159,9             | 149,4 | 2762 s     | $3,0 \times 10^{-7}$ m/s |
| 175  | 180,7             | 167   | 2745 s     | $3,5 \times 10^{-7}$ m/s |

**Tabela 39.** Ensaio realizado diretamente sobre o cascalho aflorante. Os anéis foram cravados sobre os seixos. Os tubos foram cravados em furos perfurados por cavadeira.

| Cascalho aflorante |                   |       |            |                          |
|--------------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM                | 8588726 / 800.082 |       |            | I=55 mm                  |
| Profundidade       | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial        | 171               | 63    | 11,25 min  | $8,1 \times 10^{-5}$ m/s |
| 35                 | 51,2              | 29,8  | 2395 s     | $2,8 \times 10^{-6}$ m/s |
| 35                 | 50,9              | 29,9  | 2410 s     | $2,7 \times 10^{-6}$ m/s |

**Tabela 40.** Neossolo Flúvico com nível de cascalho grosso a partir de 50 cm. Cobertura superficial areno-argilosa.

| Neossolo Flúvico |                   |       |            |                          |
|------------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM              | 8588940 / 800.246 |       |            | I=55 mm                  |
| Profundidade     | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial      | 164               | 42    | 51,83 min  | $2,4 \times 10^{-5}$ m/s |
| 25               | 32,8              | 1     | 727 s      | $6,0 \times 10^{-5}$ m/s |
| 50               | 57,1              | 32,7  | 3090 s     | $2,2 \times 10^{-6}$ m/s |

**Tabela 41.** Solo areno-argiloso (Latossolo Vermelho-Amarelo) com nível de plintita a partir de 80 cm. O nível de mosqueados para um horizonte plântico na base do furo. Solo compactado na superfície.

| Latossolo Vermelho-Amarelo |                   |       |            |                          |
|----------------------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM                        | 8603967 / 795.036 |       |            | I=60 mm                  |
| Profundidade               | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial                | 174               | 152   | 42,36 min  | $3,1 \times 10^{-6}$ m/s |
| 50                         | 57,3              | 41,8  | 2695 s     | $1,4 \times 10^{-6}$ m/s |
| 100                        | 124,8             | 112,3 | 2698 s     | $4,8 \times 10^{-7}$ m/s |
| 150                        | 184,7             | 177,4 | 2706 s     | $1,8 \times 10^{-7}$ m/s |
| 190                        | 195,3             | 188,6 | 2706 s     | $1,6 \times 10^{-7}$ m/s |

**Tabela 42.** Latossolo Vermelho-Amarelo, areno-silto-argiloso. A textura rica na fração silte indica que o material parental foi um antigo solo fluvial que sofreu latossolização.

| Latossolo Vermelho-Amarelo |                   |       |            |                          |
|----------------------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM                        | 8604313 / 795.339 |       |            | I=70 mm                  |
| Profundidade               | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial                | 158               | 148   | 40,11 min  | $1,9 \times 10^{-6}$ m/s |
| 50                         | 53,7              | 31,7  | 2440 s     | $2,7 \times 10^{-6}$ m/s |
| 100                        | 128,9             | 109   | 2440 s     | $8,5 \times 10^{-7}$ m/s |
| 150                        | 159               | 130,1 | 2443 s     | $1,0 \times 10^{-6}$ m/s |
| 205                        | 269               | 163,1 | 2455 s     | $2,5 \times 10^{-6}$ m/s |

**Tabela 43.** Latossolo Vermelho-Amarelo com horizonte petroplântico a partir de 120 cm.

| Latossolo Vermelho-Amarelo |                   |       |            |                          |
|----------------------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM                        | 8604129 / 795.136 |       |            | I=95                     |
| Profundidade               | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial                | 132               | 73    | 40,26 min  | $2,3 \times 10^{-5}$ m/s |
| 30                         | 42,7              | 34,5  | 2468 s     | $1,0 \times 10^{-6}$ m/s |
| 50                         | 57,4              | 38,4  | 2461 s     | $2,0 \times 10^{-6}$ m/s |
| 90                         | 123,8             | 93    | 2472 s     | $1,4 \times 10^{-6}$ m/s |
| 125                        | 166               | 40,1  | 1504 s     | $1,1 \times 10^{-5}$ m/s |

**Tabela 44.** Terreno muito compactado até os 20 cm. Provável Cambissolo, com cascalho rico em quartzo de veio anguloso a partir de 40 cm.

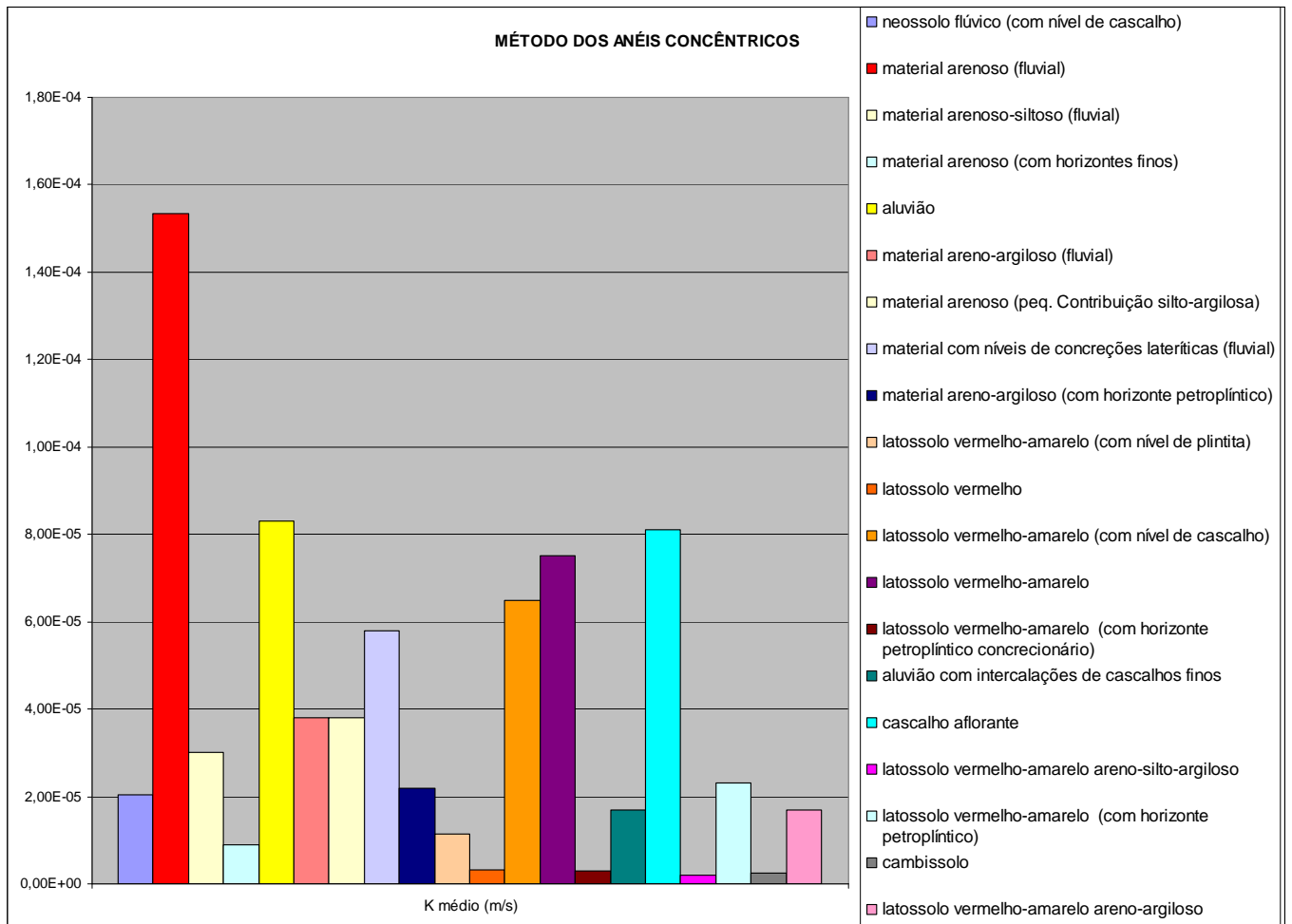
| Cambissolo   |                   |       |            |                          |
|--------------|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM          | 8604468 / 795.166 |       |            | I=45                     |
| Profundidade | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial  | 181               | 153   | 47,21 min  | $2,6 \times 10^{-6}$ m/s |
| 25           | 44,6              | 33,6  | 2880 s     | $1,2 \times 10^{-6}$ m/s |
| 30           | 47,5              | 19,8  | 2920 s     | $3,7 \times 10^{-6}$ m/s |
| 45           | 58                | 33,2  | 2923 s     | $2,3 \times 10^{-6}$ m/s |

**Tabela 45.** Latossolo Vermelho-Amarelo areno-argilo, com textura franca, provavelmente derivado da pedogênese de material original fluvial.

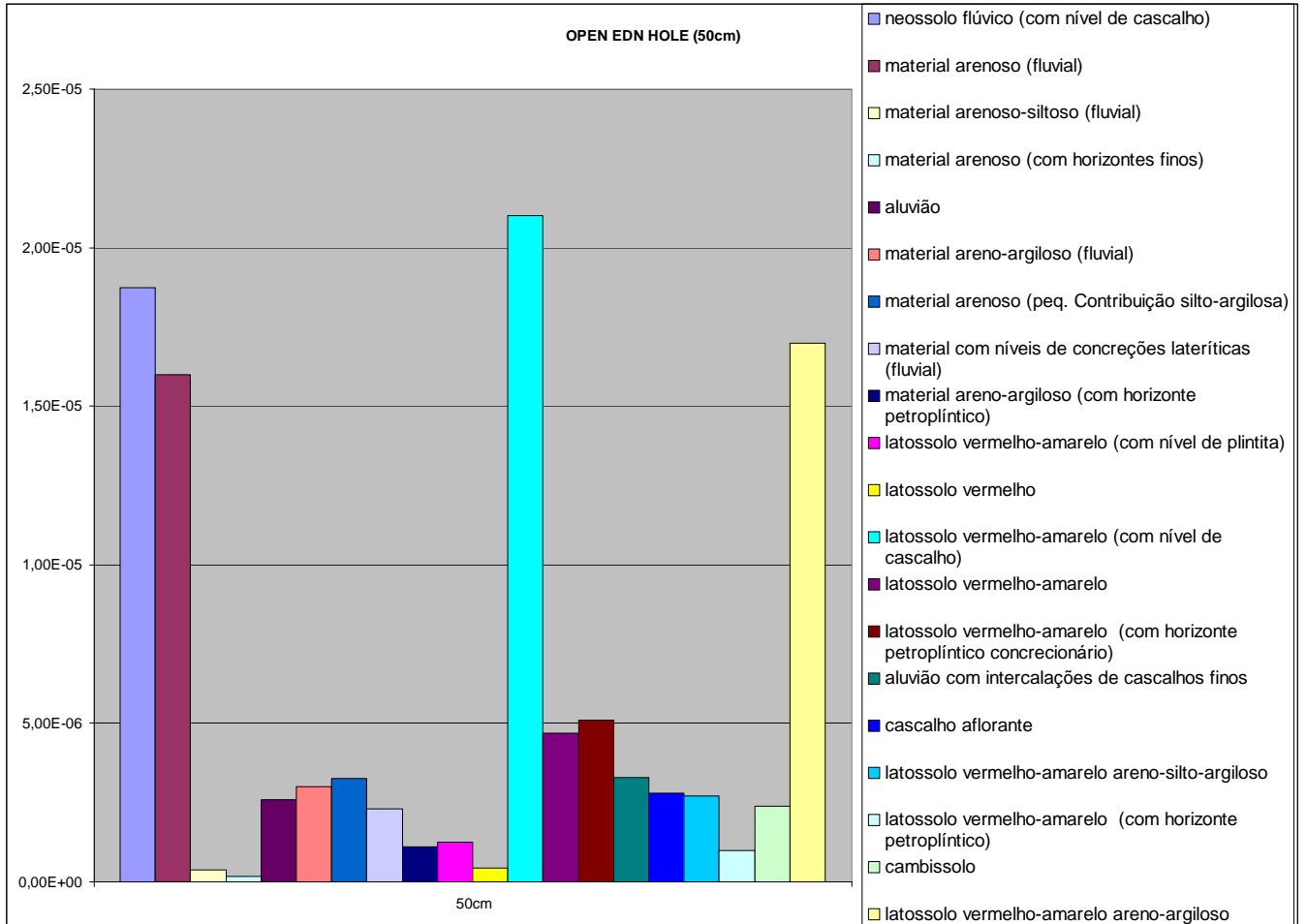
| Latossolo Vermelho-Amarelo areno-argilo |                   |       |            |                          |
|---|-------------------|-------|------------|--------------------------|
| UTM                                     | 8592299 / 795.100 |       |            | I=95                     |
| Profundidade                            | $h_0$             | $h_f$ | $\Delta t$ | $K_v$                    |
| Superficial                             | 133               | 46    | 43,55 min  | $1,7 \times 10^{-5}$ m/s |
| 50                                      | 56,2              | 39,2  | 2518 s     | $1,7 \times 10^{-6}$ m/s |
| 100                                     | 134,4             | 119,1 | 2504 s     | $6,0 \times 10^{-7}$ m/s |
| 150                                     | 161,3             | 148   | 2512 s     | $4,2 \times 10^{-7}$ m/s |
| 190                                     | 174,7             | 147,5 | 2529 s     | $8,3 \times 10^{-7}$ m/s |



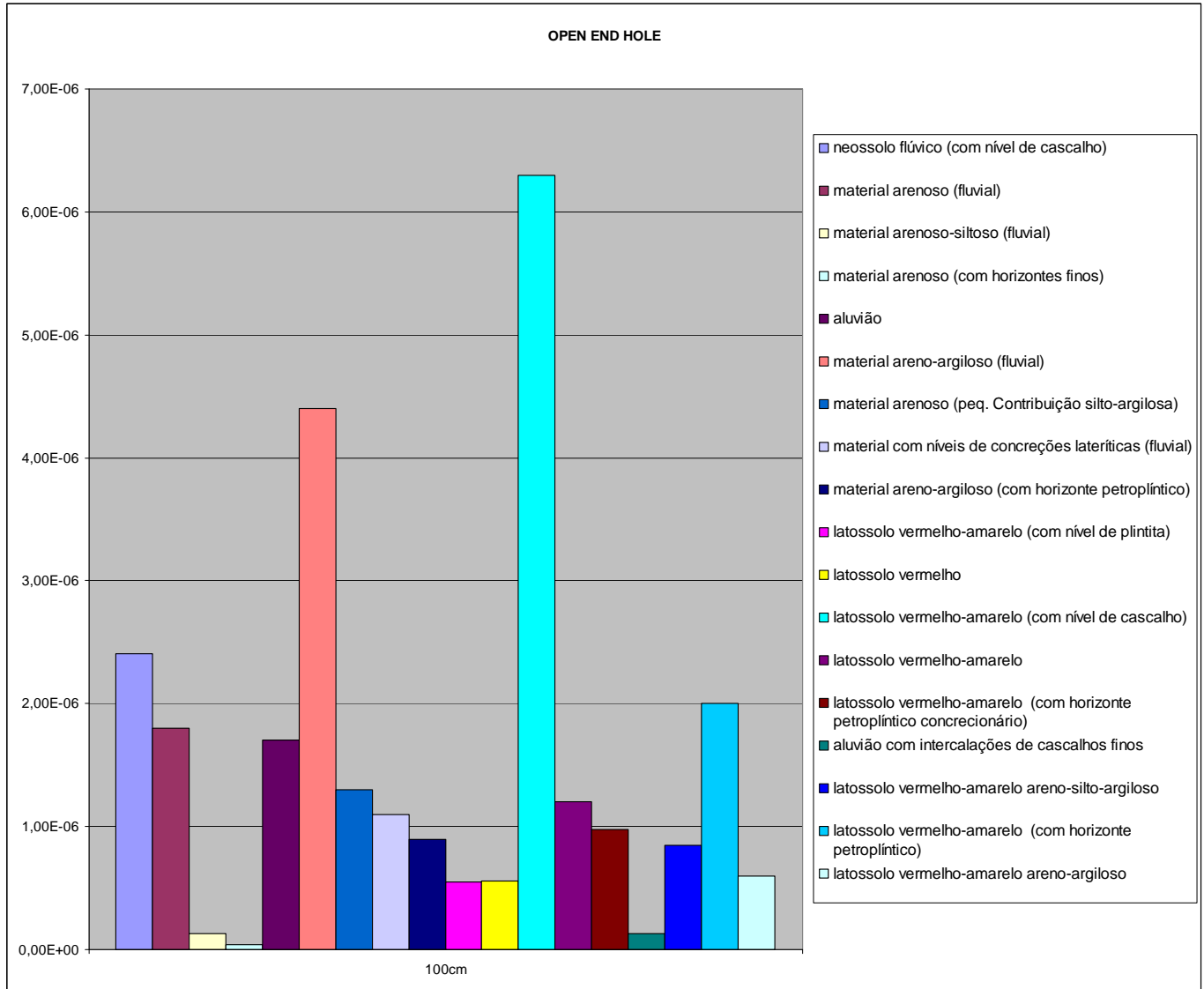
Os gráficos apresentados, na Figura 27 a Figura 31, ilustram os valores de condutividade em superfície e em profundidade obtidos no TO.



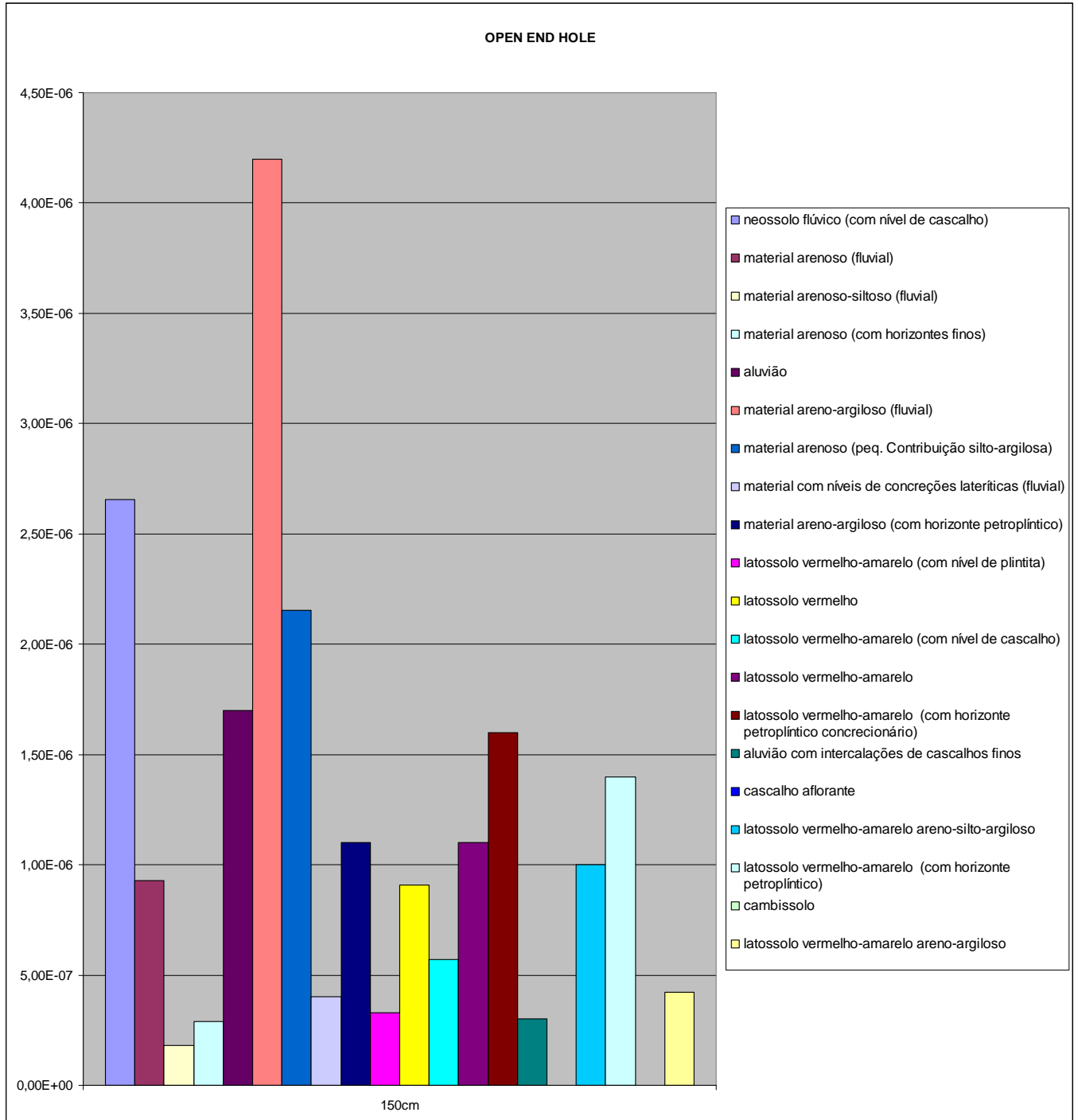
**Figura 27.** Ilustração gráfica dos valores de K em superfície (método dos anéis concêntricos) - TO.



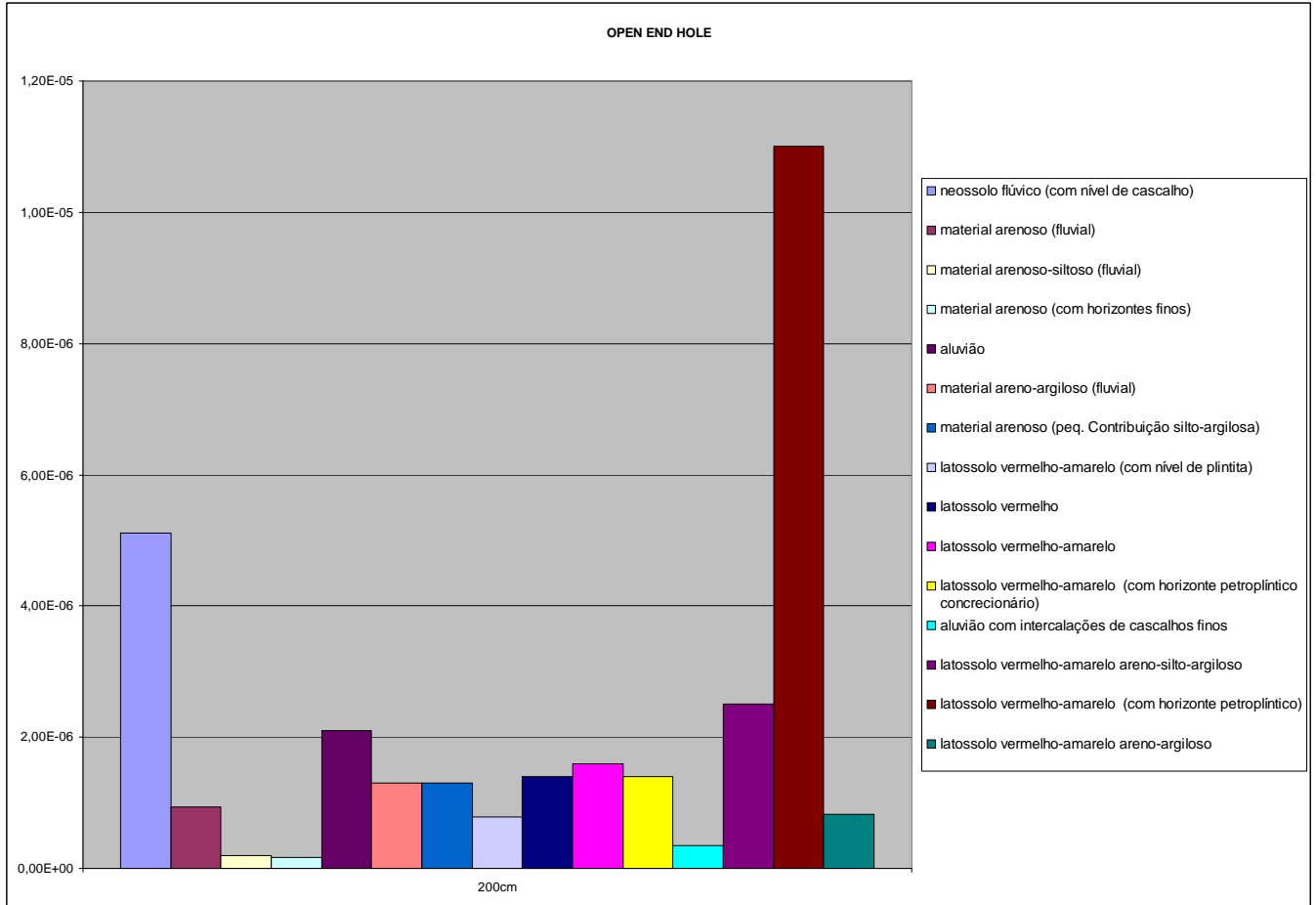
**Figura 28.** Ilustração gráfica dos valores médios de K em 50 cm de profundidade (método *open end hole*) - TO.



**Figura 29.** Ilustração gráfica dos valores médios de K em 100 cm de profundidade (método *open end hole*) - TO.



**Figura 30.** Ilustração gráfica dos valores médios de K em 150 cm de profundidade (método *open end hole*) - TO.



**Figura 31.** Ilustração gráfica dos valores médios de K em 200 cm de profundidade (método *open end hole*) -TO.

### 3.2.2. Resultados dos Ensaios de *Slug Test*

As tabelas 46 a 49, a seguir apresentadas, trazem os resultados, isto é, os valores de condutividade hidráulica obtidos com o tratamento dos dados dos ensaios realizados.

**Tabela 46.** Dados dos ensaios realizados no DF, tratados com planilhas eletrônicas no Programa *Excel*.

|         | Método Vazão |            | Hvorslev   |            | Bouwer & Rice Re=3R |            | Bouwer & Rice Re=5R |            | Bouwer & Rice Re=7R |            |
|---------|--------------|------------|------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
|         | Manual       | Diver      | Manual     | Diver      | Manual              | Diver      | Manual              | Diver      | Manual              | Diver      |
| Pzt 05  | 2,3415E-05   | 3,0675E-05 | 9,1621E-06 | 8,5513E-06 | 2,4948E-07          | 5,5385E-07 | 6,6045E-07          | 2,1113E-06 | 3,2868E-07          | 1,9958E-06 |
| Pzt 08  | 3,2827E-04   | 1,2416E-04 | 3,6648E-06 | 3,1671E-06 | 1,6717E-07          | 1,1949E-07 | 2,4490E-07          | 1,7504E-07 | 2,9610E-07          | 2,1164E-07 |
| Pzt 10  | 9,8582E-06   | 5,5872E-06 | #          | 1,3824E-07 | 1,2695E-08          | 5,2769E-08 | 1,8598E-08          | 7,7306E-08 | 2,2487E-08          | 9,3468E-08 |
| Pzt 20  | 2,4348E-05   | 4,0584E-05 | 8,1212E-06 | 7,8312E-06 | 8,6681E-07          | 1,6483E-06 | 1,2699E-06          | 2,4147E-06 | 1,5353E-06          | 2,9195E-06 |
| Pzt 24  | 8,1755E-06   | 4,3425E-06 | 4,2756E-07 | 2,9386E-07 | 4,5395E-08          | 1,9662E-08 | 6,6503E-08          | 2,8804E-08 | 8,0406E-08          | 3,4826E-08 |
| Pzt 27  | 3,9901E-03   | 3,41E-04   | #          | 7,33E-05   | 1,3237E-07          | 6,08E-07   | 1,9392E-07          | 8,91E-07   | 2,3446E-07          | 1,08E-06   |
| Pzt 31  | 2,7219E-05   | 2,5759E-05 | 1,9246E-07 | 1,9155E-07 | 3,7732E-08          | 4,2535E-08 | 5,5277E-08          | 6,2313E-08 | 6,6833E-08          | 7,5340E-08 |
| Pzt 40  | 6,8807E-06   | 7,1471E-06 | 1,8053E-06 | 2,6494E-06 | 1,0992E-07          | 1,2400E-07 | 1,6103E-07          | 1,8166E-07 | 1,9469E-07          | 2,1964E-07 |
| Pzt 41  | 1,4218E-05   | 9,3633E-06 | 3,4205E-06 | 5,0302E-06 | 1,5742E-07          | 1,9615E-07 | 2,3062E-07          | 2,8736E-07 | 2,7883E-07          | 3,4743E-07 |
| Pzt 42  | 8,1159E-04   | 1,8500E-04 | 5,4818E-05 | 5,1593E-05 | 1,2036E-06          | 2,3130E-06 | 1,7633E-06          | 3,3885E-06 | 2,1319E-06          | 4,0969E-06 |
| Pzt 49  | 1,8119E-03   | 5,2474E-04 | 6,2649E-05 | 1,9067E-05 | 1,7681E-06          | 1,7112E-06 | 2,5902E-06          | 2,5069E-06 | 3,1317E-06          | 3,0310E-06 |
| Pzt 54  | 1,7465E-04   | 1,1246E-04 | 1,2827E-05 | 7,3297E-06 | 1,2631E-07          | 7,5026E-08 | 1,8504E-07          | 1,0991E-07 | 2,2372E-07          | 1,3289E-07 |
| Pzte 01 | 3,1396E-03   | 6,9686E-04 | 1,0689E-06 | 1,8324E-05 | 8,3314E-08          | 1,2599E-06 | 1,2205E-07          | 1,8457E-06 | 1,4757E-07          | 2,2315E-06 |
| Pzte 02 | 8,0488E-04   | X          | 7,3297E-06 | X          | 1,0017E-06          | X          | 1,4675E-06          | X          | 1,7743E-06          | X          |

X = dados do *diver* não compatíveis; # = NÃO RECUPEROU O SUFICIENTE PARA ENCONTRAR H – H<sub>0</sub> = 0,37



**Tabela 47.** Dados dos ensaios realizados no DF, tratados no Programa *Aquifer Test*.

|        | Hvorslev-geral |          | Hvorslev-inicial |          | Bouwer & Rice-geral |          | Bouwer & Rice-inicial |          | Cooper et al-geral |          | Cooper et al-inicial |          |
|--------|----------------|----------|------------------|----------|---------------------|----------|-----------------------|----------|--------------------|----------|----------------------|----------|
|        | Manual         | Diver    | Manual           | Diver    | Manual              | Diver    | Manual                | Diver    | Manual             | Diver    | Manual               | Diver    |
| Pze 02 | 7,84E-06       |          | 1,18E-05         |          | 5,27E-06            |          | 7,91E-06              |          | 1,97664E-05        |          | 1,97664E-05          |          |
| Pzt 05 | 2,03E-06       | 8,73E-06 | 1,03E-05         | 1,31E-05 | 1,77E-06            | 6,73E-06 | 8,97E-06              | 1,01E-05 | 1,50E-06           | 3,37E-06 | 1,50E-06             | 2,25E-06 |
| Pzt 08 | 3,64E-06       | 6,58E-06 | 2,42E-06         | 4,39E-06 | 2,88E-06            | 5,05E-06 | 1,92E-06              | 3,36E-06 |                    | 5,39E-06 |                      | 2,39E-06 |
| Pzt 10 | 3,33E-07       | 6,77E-06 | 3,79E-06         | 1,52E-05 | 3,89E-07            | 5,59E-06 | 2,95E-06              | 1,26E-05 | 1,07E-07           | 1,84E-06 | 8,20E-07             | 2,44E-06 |
| Pzt 20 | 3,53E-06       | 3,33E-06 | 5,29E-06         | 3,33E-06 | 2,66E-06            | 2,51E-06 | 3,99E-06              | 4,74E-06 | 7,12E-06           | 4,33E-06 |                      |          |
| Pzt 24 | 4,77E-07       | 3,88E-07 | 1,07E-06         | 7,44E-06 | 2,28E-07            | 2,37E-06 | 7,70E-07              | 5,34E-06 | 1,61E-07           | 1,83E-06 | 5,43E-07             | 2,75E-06 |
| Pzt 27 |                | 1,99E-05 |                  | 1,50E-05 |                     | 1,50E-05 |                       | 7,60E-05 |                    | 5,42E-06 |                      | 1,22E-05 |
| Pzt 31 | 2,50E-07       | 8,66E-07 | 3,76E-07         | 4,39E-06 | 1,64E-07            | 6,03E-07 | 2,47E-07              | 3,05E-06 | 2,43E-07           | 2,14E-08 | 3,64E-07             | 1,61E-07 |
| Pzt 40 | 1,74E-06       | 2,94E-06 | 2,61E-06         | 2,94E-06 | 1,52E-06            | 2,22E-06 | 2,28E-06              | 2,22E-06 | 6,97E-07           | 1,05E-06 |                      | 1,05E-06 |
| Pzt 41 | 2,10E-06       | 6,22E-06 | 4,73E-06         | 2,76E-06 | 1,61E-06            | 4,77E-06 | 3,36E-06              | 2,12E-06 | 8,16E-07           | 1,84E-06 | 1,23E-06             | 5,47E-07 |
| Pzt 49 |                | 1,94E-05 |                  | 4,36E-05 |                     | 1,42E-05 |                       | 3,19E-05 |                    | 3,17E-05 |                      | 4,76E-05 |
| Pzt 55 | 1,35E-06       | 9,42E-07 | 1,35E-06         | 2,12E-06 | 1,35E-06            | 6,99E-07 | 1,35E-06              | 1,57E-06 | 5,89E-07           | 1,76E-07 | 5,89E-07             | 3,95E-07 |

**Tabela 48.** Dados dos ensaios realizados no TO, tratados com planilhas eletrônicas no Programa *Excel*.

|        | Método Vazão |            | Hvorslev   |            | Bouwer & Rice Re=3R |            | Bouwer & Rice Re=5R |            | Bouwer & Rice Re=7R |            |
|--------|--------------|------------|------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
|        | Manual       | Diver      | Manual     | Diver      | Manual              | Diver      | Manual              | Diver      | Manual              | Diver      |
| SP 100 | 1,9218E-04   | 1,0852E-04 | 4,2756E-06 | 2,7291E-06 | 5,0118E-07          | 1,7102E-07 | 7,3421E-07          | 2,5055E-07 | 8,8771E-07          | 3,0293E-07 |
| SP 101 | 4,0204E-05   | 4,0319E-05 | 6,9901E-07 | 6,3815E-07 | 6,5144E-08          | 6,4252E-08 | 9,5435E-08          | 9,4128E-08 | 1,1539E-07          | 1,1381E-07 |
| SP 103 | 2,1195E-05   | 8,4234E-06 | 2,2702E-06 | 1,3361E-07 | 2,1831E-07          | 2,3242E-07 | 3,1981E-07          | 3,4049E-07 | 3,8667E-07          | 4,1168E-07 |
| SP 105 | 4,0518E-05   | 2,5962E-05 | 7,1261E-07 | 1,2216E-05 | 7,4619E-08          | 2,2341E-07 | 1,0931E-07          | 3,2729E-07 | 1,3217E-07          | 3,9571E-07 |
| SP 107 | 2,2756E-06   | 2,3802E-06 | 3,1750E-07 | 3,7126E-07 | 3,4954E-08          | 3,3889E-08 | 5,1206E-08          | 4,9647E-08 | 6,1911E-08          | 6,0026E-08 |
| SP 202 | 5,0837E-05   | 1,8966E-05 | 6,4135E-06 | 1,1661E-05 | 1,0858E-07          | 1,2143E-07 | 1,5906E-07          | 1,7789E-07 | 1,9232E-07          | 2,1508E-07 |
| SP 205 | 1,2664E-05   | 1,18E-05   | 4,9334E-06 | 4,75E-06   | 2,2888E-07          | 2,24E-07   | 3,3530E-07          | 3,28E-07   | 4,0539E-07          | 3,97E-07   |
| SP 207 | 3,3679E-05   | 2,6310E-05 | 1,2216E-06 | 3,6648E-06 | 1,6895E-07          | 1,8281E-07 | 2,4751E-07          | 2,6781E-07 | 2,9926E-07          | 3,2380E-07 |
| SP 209 | 2,1824E-03   | 1,1775E-03 | 7,7739E-06 | 7,5452E-06 | 4,5696E-07          | 3,9451E-07 | 6,6944E-07          | 5,7794E-07 | 8,0939E-07          | 6,9877E-07 |
| SP 210 | 5,9159E-05   | 1,6220E-05 | 9,1621E-06 | 6,4135E-06 | 2,2100E-07          | 1,8382E-07 | 3,2377E-07          | 2,6929E-07 | 3,9145E-07          | 3,2558E-07 |
| SP 211 | 2,3922E-05   | 5,0228E-04 | 4,2756E-06 | 9,1621E-06 | 2,4423E-07          | 3,0278E-06 | 3,5779E-07          | 4,4356E-06 | 4,3259E-07          | 5,3629E-06 |
| SP 300 | 2,8574E-05   | 4,8042E-05 | #DIV/0!    | 6,2570E-06 | 2,0993E-08          | 5,4095E-07 | 3,0755E-08          | 7,9248E-07 | 3,7184E-08          | 9,5816E-07 |



|        | Método Vazão |            | Hvorslev   |             | Bouwer & Rice Re=3R |             | Bouwer & Rice Re=5R |             | Bouwer & Rice Re=7R |             |
|--------|--------------|------------|------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|
|        | Manual       | Diver      | Manual     | Diver       | Manual              | Diver       | Manual              | Diver       | Manual              | Diver       |
| SP 303 | 5,1492E-06   | 2,0299E-06 | 1,14E-06   | 8,52569E-08 | 7,90529E-08         | 4,01668E-08 | 1,1581E-07          | 5,88433E-08 | 1,40022E-07         | 7,11452E-08 |
| SP 304 | 3,1074E-03   | 4,8805E-05 | 3,1671E-06 | 1,4252E-05  | 1,6782E-07          | 1,6488E-07  | 2,4585E-07          | 2,4154E-07  | 2,9724E-07          | 2,9204E-07  |
| SP 305 | 9,7995E-06   | 5,3813E-06 | 3,91E-06   | 2,07489E-07 | 3,32137E-07         | 1,98872E-07 | 4,86572E-07         | 2,91342E-07 | 5,88296E-07         | 3,52251E-07 |
| SP 306 | 1,2720E-05   | 8,8301E-06 | 1,3156E-06 | 2,7291E-06  | 1,5861E-07          | 1,8833E-07  | 2,3236E-07          | 2,7590E-07  | 2,8094E-07          | 3,3358E-07  |
| SP 307 | 1,0491E-05   | 9,1523E-06 | 1,14E-06   | 1,27631E-06 | 1,0754E-07          | 1,17956E-07 | 1,57543E-07         | 1,72803E-07 | 1,9048E-07          | 2,08929E-07 |
| SP 308 | 3,3098E-06   | 3,405E-06  | 1,39E-06   | 1,33614E-06 | 5,68897E-08         | 8,27717E-08 | 8,33419E-08         | 1,21258E-07 | 1,00766E-07         | 1,46609E-07 |
| SP 309 | 3,36E-05     | X          | 6,73E-07   | X           | 1,33E-07            | X           | 1,95E-07            | X           | 2,35E-07            | X           |
| SP 311 | 0,00183543   | 0,00028626 | 1,57E-05   | 1,27502E-05 | 1,2328E-06          | 4,40335E-06 | 1,80602E-06         | 6,45079E-06 | 2,18359E-06         | 7,79941E-06 |
| SP 313 | 2,6101E-04   | 4,1735E-05 | #          | 1,7103E-05  | 1,4015E-08          | 5,6736E-08  | 2,0532E-08          | 8,3116E-08  | 2,4824E-08          | 1,0049E-07  |
| SP 314 | 3,5230E-05   | 2,8184E-05 | 2,2308E-06 | 2,2503E-06  | 1,0276E-06          | 6,8981E-07  | 1,5054E-06          | 1,0106E-06  | 1,8201E-06          | 1,2218E-06  |
| SP 315 | 5,3892E-05   | 1,5489E-05 | 4,6643E-06 | 1,2827E-05  | 8,3003E-08          | 1,0603E-07  | 1,2160E-07          | 1,5533E-07  | 1,4702E-07          | 1,8780E-07  |

Tabela 49. Dados dos ensaios realizados no TO, tratados no Programa *Aquifer Test*.

|        | Hvorslev-geral |          | Hvorslev-inicial |          | Bouwer & Rice-geral |          | Bouwer & Rice-inicial |            | Cooper et al-geral |          | Cooper et al-inicial |          |
|--------|----------------|----------|------------------|----------|---------------------|----------|-----------------------|------------|--------------------|----------|----------------------|----------|
|        | Manual         | Diver    | Manual           | Diver    | Manual              | Diver    | Manual                | Diver      | Manual             | Diver    | Manual               | Diver    |
| SP 100 | 2,78E-06       | 2,57E-06 | 2,78E-06         | 8,68E-06 | 1,89E-06            | 1,75E-06 | 1,89E-06              | 5,90E-06   | 1,20E-05           | 3,55E-06 | 1,20E-05             | 8,00E-06 |
| SP 101 |                | 6,49E-07 |                  | 9,73E-07 |                     | 5,84E-07 |                       | 8,75E-07   |                    | 4,77E-07 |                      | 7,15E-07 |
| SP 103 |                | 5,40E-07 |                  | 2,74E-06 |                     | 4,24E-07 |                       | 7,28E-07   |                    | 3,22E-06 |                      | 2,38E-07 |
| SP 105 | 3,39E-07       | 1,05E-06 | 7,62E-07         | 1,05E-06 | 2,45E-07            | 1,05E-06 | 8,27E-07              | 1,57E-06   | 2,74E-07           | 7,02E-06 | 2,74E-07             | 7,02E-06 |
| SP 107 | 1,89E-07       | 2,58E-07 | 4,25E-07         | 2,58E-07 | 0,000000146         | 2,00E-07 | 3,29E-07              | 2,00E-07   | 7,83E-08           | 5,20E-08 | 7,83E-08             | 6,90E-09 |
| SP 202 | 3,79E-07       | 1,02E-06 | 1,28E-06         | 1,16E-05 | 1,00E-03            | 1,79E-06 | 1,56E-06              | 9,05E-06   | 1,19E-06           | 2,66E-06 | 1,19E-06             | 9,01E-06 |
| SP 300 | 1,36E-07       | 4,93E-06 | 1,03E-06         | 1,66E-05 | 6,22E-08            | 3,38E-06 | 7,09E-07              | 1,14E-05   | 5,13E-08           | 9,98E-06 | 2,59E-07             | 9,98E-06 |
| SP 303 | 4,07E-07       | 6,74E-07 | 1,37E-06         |          | 2,54E-07            | 4,21E-07 | 8,58E-07              |            | 6,77E-07           | 4,52E-07 | 1,02E-06             | 1,02E-06 |
| SP 304 | 1,13E-06       | 2,95E-06 | 2,54E-06         | 1,49E-05 | 7,71E-07            | 2,02E-06 | 1,73E-06              | 1,02E-05   | 8,74E-07           | 6,63E-06 | 1,96E-06             | 2,24E-05 |
| SP 305 | 1,01E-06       | 5,41E-07 | 2,26E-06         | 1,83E-06 | 6,66E-07            | 3,59E-07 | 1,50E-06              | 0,00000112 | 4,76E-06           | 4,18E-07 |                      | 9,41E-07 |
| SP 306 | 8,75E-07       | 2,12E-06 | 1,31E-06         | 4,77E-06 | 6,34E-07            | 1,54E-06 | 9,51E-07              | 3,46E-06   | 1,65E-06           | 1,65E-06 |                      | 3,73E-06 |
| SP 307 | 5,38E-07       | 1,30E-06 | 1,21E-06         | 1,95E-06 | 3,45E-07            | 8,36E-07 | 7,77E-07              | 1,25E-06   | 1,01E-06           | 1,52E-06 |                      |          |
| SP 308 | 8,00E-08       | 1,18E-06 | 6,08E-07         | 1,76E-06 | 5,44E-08            | 7,99E-07 | 4,13E-07              | 1,20E-06   | 4,45E-08           | 1,14E-06 | 1,49E-07             |          |
| SP 311 | 6,21E-06       | 1,38E-05 | 1,40E-05         | 1,38E-05 | 3,60E-06            | 8,01E-06 | 8,09E-06              | 8,01E-06   | 1,99E-05           | 2,99E-05 |                      | 2,99E-05 |
| SP 313 | 6,64E-07       | 6,39E-06 | 1,49E-06         | 2,16E-05 | 5,05E-07            | 4,86E-06 | 7,57E-07              | 1,64E-05   | 3,01E-07           | 7,70E-06 | 4,51E-07             | 1,16E-05 |





|        | Hvorslev-geral |          | Hvorslev-inicial |          | Bouwer & Rice-geral |            | Bouwer & Rice-inicial |          | Cooper et al-geral |          | Cooper et al-inicial |          |
|--------|----------------|----------|------------------|----------|---------------------|------------|-----------------------|----------|--------------------|----------|----------------------|----------|
|        | Manual         | Diver    | Manual           | Diver    | Manual              | Diver      | Manual                | Diver    | Manual             | Diver    | Manual               | Diver    |
| SP 314 | 4,43E-08       | 3,02E-06 | 1,70E-06         |          | 3,70E-08            | 0,00000252 | 9,48E-07              | 2,52E-06 | 2,26E-09           | 4,39E-07 |                      |          |
| SP 315 | 5,67E-07       | 3,45E-06 | 4,31E-06         | 1,75E-05 | 4,12E-07            | 2,51E-06   | 3,13E-06              | 1,27E-05 | 5,52E-07           | 4,19E-06 | 2,79E-06             | 1,42E-05 |
| SP 205 |                | 4,80E-06 |                  |          |                     | 3,43E-06   |                       | 3,43E-06 |                    | 5,58E-06 |                      |          |
| SP 210 |                | 2,58E-06 |                  | 5,81E-06 |                     | 1,84E-06   |                       | 4,15E-06 |                    | 5,23E-06 |                      | 7,84E-06 |
| SP 211 |                | 7,50E-06 |                  |          |                     | 5,45E-06   |                       | 5,45E-06 |                    | 4,87E-06 |                      |          |

## CAPÍTULO IV - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para a caracterização da aplicabilidade e dos resultados dos ensaios, o conjunto de dados foi estudado de forma a se evidenciar sua adequação para os diferentes meios estudados e para se determinar as formas mais adequadas de aquisição dos dados em campo.

### 4.1. ZONA NÃO SATURADA

Para os ensaios que estudam a condutividade hidráulica vertical na zona vadosa foram fixados parâmetros e analisada a importância de cada um na determinação do resultado. Posteriormente, foram analisados os resultados dos ensaios de campo quanto aos meios estudados de forma a se evidenciar as formas mais adequadas para a aquisição dos dados.

#### 4.1.1. Anéis Concêntricos

Foram utilizados os seguintes dados para as avaliações preliminares: profundidades de cravação dos anéis  $I_1 = 50$  mm e  $I_2 = 90$  mm, intervalos de tempo de ensaio  $\Delta t_1 = 40$  min e  $\Delta t_2 = 20$  min; coluna d'água inicial  $h_0 = 150$  mm e colunas d'água finais  $h$ , respectivamente de 100, 50 e 5 mm. A Tabela 50 traz os resultados das simulações.

**Tabela 50.** Resultados hipotéticos de condutividade hidráulica a partir de simulação com variáveis fixadas.

|     |                       |                                       |
|-----|-----------------------|---------------------------------------|
| K1  | $8,4 \times 10^{-6}$  | $\Delta t_1 = 40$ min / $I_1 = 50$ mm |
| K2  | $2,2 \times 10^{-5}$  |                                       |
| K3  | $7,1 \times 10^{-5}$  |                                       |
| K4  | $1,5 \times 10^{-5}$  | $\Delta t_1 = 40$ min / $I_2 = 90$ mm |
| K5  | $4,1 \times 10^{-5}$  |                                       |
| K6  | $1,2 \times 10^{-4}$  |                                       |
| K7  | $1,65 \times 10^{-5}$ | $\Delta t_2 = 20$ min / $I_1 = 50$ mm |
| K8  | $4,5 \times 10^{-5}$  |                                       |
| K9  | $1,4 \times 10^{-4}$  |                                       |
| K10 | $3,4 \times 10^{-5}$  | $\Delta t_2 = 20$ min / $I_2 = 90$ mm |
| K11 | $8,2 \times 10^{-5}$  |                                       |
| K12 | $2,5 \times 10^{-4}$  |                                       |

Os resultados das simulações realizadas para 33%, 67% e 97% de recuperação da coluna d'água inicial mostram os seguintes fatos:

- A profundidade de cravação I não afeta muito nos resultados. Dessa forma é adequado que, para a realização dos ensaios de campo a profundidade mínima de cravação seja igual ao necessário para evitar o vazamento da água durante a infiltração, e que a profundidade máxima seja inferior a 100 mm;

- O parâmetro mais importante é o rebaixamento da coluna d'água no anel interno, uma vez que o  $\ln$  (logaritmo neperiano) utilizado na equação sofre incrementos consideráveis para as diferentes taxas de rebaixamento (50, 100 e 145 mm) ou  $\ln$  da razão entre  $h$  e  $h_0$  igual a 0,4054651; 1,098612 e 3,401197;
- O rebaixamento ideal para a determinação da condutividade hidráulica em m/s deve ser em torno de 67% da recuperação da coluna d'água inicial. Neste caso, os resultados em diferentes tempos de ensaio (40 min ou 20 min) para diferentes profundidades de cravação apresentam apenas incrementos reduzidos e não mudam a ordem de grandeza dos resultados;
- O tempo apenas influencia de forma linear e apenas muda a ordem de grandeza do resultado no início do ensaio. Depois de 40 minutos de infiltração a redução é mínima e a estabilização da capacidade de infiltração se dá a partir de 150 minutos para a maioria dos solos.

A análise dos resultados dos ensaios de campo permite as seguintes discussões:

- A condutividade hidráulica na superfície é uma ordem de grandeza maior que em profundidade em função da bioturbação ser mais efetiva nos primeiros centímetros dos solos naturais. Neste caso, principalmente, a atividade das raízes é responsável pelo aumento da porosidade e formação de canalículos para o fluxo preferencial da água. Em maiores profundidades há diminuição progressiva da atividade de raízes e aumento da bioturbação por invertebrados (cupins, formigas e anelídeos), que é menos efetiva para a infiltração vertical;
- Em gleissolos drenados os valores na superfície são elevados devido ao ressecamento, que amplia a porosidade entre as estruturas granulares comumente presente na porção superficial destes solos;
- Em cambissolos os valores podem ser até 100 vezes maiores na superfície que em profundidade devido a presença comum de fase cascalhenta e de pedregosidade no horizonte A.

Deve-se salientar que os valores obtidos pelo método dos anéis concêntricos representam as máximas capacidades de infiltração (condutividade hidráulica potencial máxima). Esta característica se deve ao fato de o ensaio ser desenvolvido sob uma carga hidráulica acima da superfície, ou seja, sob lâmina d'água saturada acima do terreno em que o ensaio é desenvolvido. O uso de outros métodos, como por exemplo, simulador de chuvas tende a reduzir os resultados (Costa *et al.* 1999).

#### **4.1.2. Open End Hole**

Para a determinação da condutividade hidráulica em profundidade foram aplicados os seguintes dados para a simulação: profundidades de 50 cm e de 150 cm, intervalos de tempo de ensaio  $\Delta t_1 = 2400$ s e  $\Delta t_2 = 1200$  s; coluna d'água inicial  $h_0 = 140$  cm (para o furo de 150 cm) e

de 45 cm (para o furo de 50 cm) e colunas d'água finais  $h$ , respectivamente de 100, 80, 40 e 20 cm (para o furo de 150 cm) e de 40, 30, 10 e 5 cm (para o furo de 50 cm) e raio de 0,05 m.

A Tabela 51 traz os resultados das simulações.

**Tabela 51.** Resultados hipotéticos de condutividade hidráulica em m/s a partir de simulação com variáveis fixadas.

| Profundidade | Condutividade Hidráulica $\Delta t_1$ | Condutividade Hidráulica $\Delta t_2$ |
|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 50           | $2,4 \times 10^{-6}$                  | $4,9 \times 10^{-6}$                  |
|              | $8,4 \times 10^{-6}$                  | $1,6 \times 10^{-5}$                  |
|              | $3,1 \times 10^{-5}$                  | $5,2 \times 10^{-5}$                  |
|              | $4,5 \times 10^{-5}$                  | $8,1 \times 10^{-5}$                  |
| 150          | $7,0 \times 10^{-6}$                  | $1,4 \times 10^{-5}$                  |
|              | $1,6 \times 10^{-5}$                  | $2,3 \times 10^{-5}$                  |
|              | $2,6 \times 10^{-5}$                  | $5,2 \times 10^{-5}$                  |
|              | $4,0 \times 10^{-5}$                  | $8,1 \times 10^{-5}$                  |

Os resultados das simulações para 50 e 150 cm mostram que:

- Deve-se sempre manter o mesmo intervalo de tempo do ensaio para cada profundidade investigada, pois o tempo aumenta o valor da condutividade de forma linear;
- O ideal é que o ensaio seja desenvolvido até 60% de recuperação da coluna d'água inicial, pois a partir daí o processo é muito lento e tende a estabilização;
- O ensaio deve ser realizado por pelo menos 40 minutos, pois intervalos de tempo muito reduzidos tendem a subestimar os resultados;
- Uma taxa mínima de rebaixamento deve ser considerada, pois o log (logaritmo na base 10) da razão entre as colunas d'água inicial e final aumenta de forma lenta, por isso os valores mais realistas são obtidos entre 55 e 75% de recuperação da coluna d'água.

Com relação aos resultados dos ensaios reais de campo, pode-se afirmar que:

- a condutividade hidráulica diminui com o aumento da profundidade, em função do aumento do próprio peso da seção (que reduza a porosidade) e em outros casos em função da translocação de argilas ao longo do perfil de solo;
- latossolos de textura arenosa e neossolos quartzarênicos tendem à manutenção dos valores de condutividade ao longo do perfil entre 50 e 200 cm de profundidade. Este fator é decorrente da grande homogeneidade textural e estrutural destes solos;
- Neossolos flúvicos apresentam valores variáveis em função do perfil do material parental, que pode ter o conteúdo de finos (silte e argila) variável ao longo do perfil deposicional;
- Plintossolos pétricos também apresentam valores de condutividades hidráulicas variáveis em função do grau de degradação do horizonte petroplântico. Em plintossolos pétricos litoplânticos

os valores são muito baixos, enquanto que em plintossolos pétricos concrecionários os valores variam de moderados a elevados.

## 4.2. ZONA SATURADA

Neste item serão discutidos os métodos de aquisição de dados, bem como o tratamento destes dados pelos métodos mais comumente utilizados para a determinação de condutividade hidráulica na zona saturada dos aquíferos.

### 4.2.1. Avaliação dos Métodos de Aquisição dos Dados em Campo

No que se refere à aquisição dos dados, ressalta-se que para a aquisição manual: utilizou-se um medidor de nível com graduação em milímetros e um cronômetro e para a aquisição automática: utilizou-se um transdutor de pressão e um computador portátil para programação e descarga dos dados coletados.

Assim, observou-se que:

- existem diferenças nos valores da carga hidráulica ao final da elevação no nível ( $h - h_0$ );
- as diferenças da carga hidráulica, assim como as diferenças de tempo não são lineares, para os dois tipos de aquisição;
- a aquisição manual apresenta menor número de medidas/observações, pois o *diver* pode ser programado para aquisição em períodos de um segundo, facilitando a visualização dos detalhes do rebaixamento (nos gráficos).

Portanto, a aquisição automática apresenta dados mais detalhados, além de obter um valor mais preciso para o  $h$  (altura máxima da lâmina d'água após o lançamento do volume de água).

A perda de precisão na aquisição da primeira medida tem como consequência valores mais elevados de condutividade, pois todos os métodos para cálculo da condutividade hidráulica utilizam esse parâmetro e em todos os casos quanto menor o valor do  $h$  maior o valor da condutividade hidráulica.

### 4.2.2. Avaliação do Método da Vazão

O método da vazão é o mais simples para os cálculos, pois só considera um parâmetro construtivo do poço. São considerados: vazão ( $Q$ ), obtida através do volume de água utilizado no ensaio e o tempo de rebaixamento; o raio do poço e a altura máxima da lâmina d'água após o lançamento do volume de água conhecido.

Dos resultados obtidos para os dados coletados no Distrito Federal:



- 53,8% apresentam valores maiores de condutividade para os dados obtidos manualmente, porém na mesma ordem de grandeza;
- 30,7% apresentam valores de condutividade muito maiores para os dados obtidos manualmente;
- 15,3% apresentam valores de condutividade maiores para os dados obtidos por meio de *diver*, porém na mesma ordem de grandeza.

Dos resultados obtidos para os dados coletados no estado do Tocantins:

- 50% apresentam valores maiores de condutividade para os dados obtidos manualmente, porém na mesma ordem de grandeza;
- 27,2% apresentam valores de condutividade muito maiores para os dados obtidos manualmente;
- 18,1% apresentam valores de condutividade maiores para os dados obtidos por meio de *diver*, porém na mesma ordem de grandeza;
- 4,5% apresentam valores de condutividade muito maiores para os dados obtidos por meio de *diver*. Caso do piezômetro SP-211, único caso onde o tempo e o h são maiores para os dados obtidos manualmente.

Na maioria dos casos o h (altura máxima da lâmina d'água após o lançamento do volume de água) é maior para os dados obtidos com *diver*, geralmente esses dados são mais precisos que os obtidos manualmente, pois pode-se perder o maior valor de elevação em função do tempo que decorre até a introdução da fita para a medição do nível.

Portanto, para a maioria dos poços observados (> 80% no DF e > 77% no TO) os valores de condutividade são maiores para os dados obtidos manualmente. A perda da precisão de obtenção do h, manualmente, tende a superestimar os valores de condutividade hidráulica.

Este método é o que apresenta os maiores valores de condutividade hidráulica para os meios estudados.

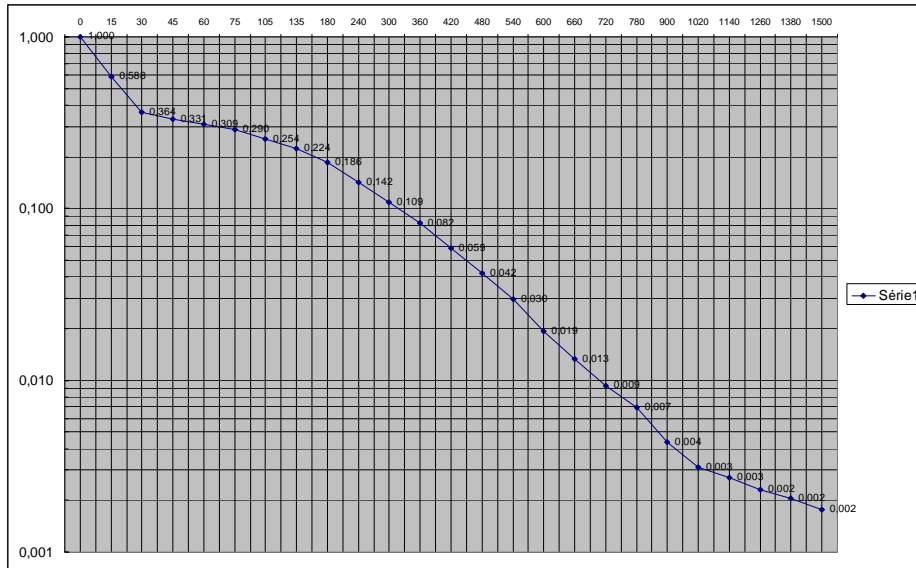
#### **4.2.3. Avaliação do Método de Hvorslev**

O método de *Hvorslev*, utilizado para aquífero confinado e livre, homogêneo, isotópico, de espessura uniforme, considera o raio do revestimento, comprimento da seção de filtro e o raio de perfuração do poço.

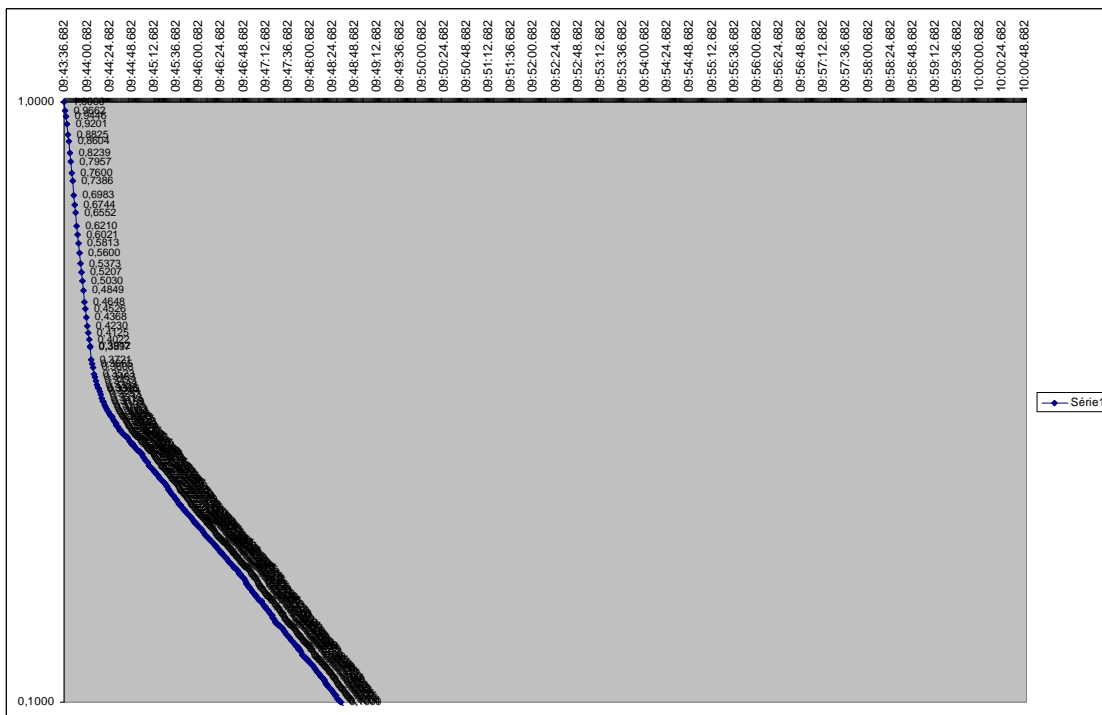
Para o tratamento com as planilhas eletrônicas, para se calcular o tempo, a ser utilizado na solução matemática, deve-se encontrar o tempo que corresponda à  $h - h_0 = 0,37$  (ou seja, o tempo gasto para o nível da água subir ou descer para 37 % do lançamento inicial).

Considerando que o rebaixamento tem sua intensidade diminuída com o passar do tempo, cria-se um gráfico *monolog* (tempo *versus* rebaixamento, Figura 32 e Figura 33) para se obter o  $t_{37}$ .

Para que este método seja utilizado deve-se garantir que se tenha o tempo exato para que  $h - h_0 = 0,37$ , caso contrário o método não pode ser utilizado para o cálculo.



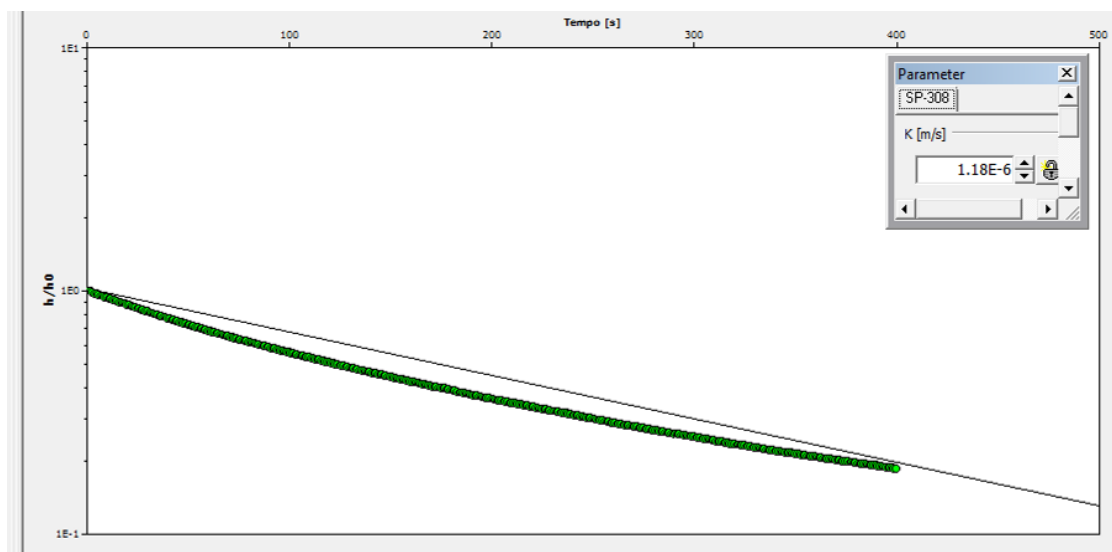
**Figura 32.** Exemplo de gráfico gerado para obtenção do tempo em 37% do rebaixamento, a partir dos dados obtidos manualmente (gerado no Programa *Excel*).



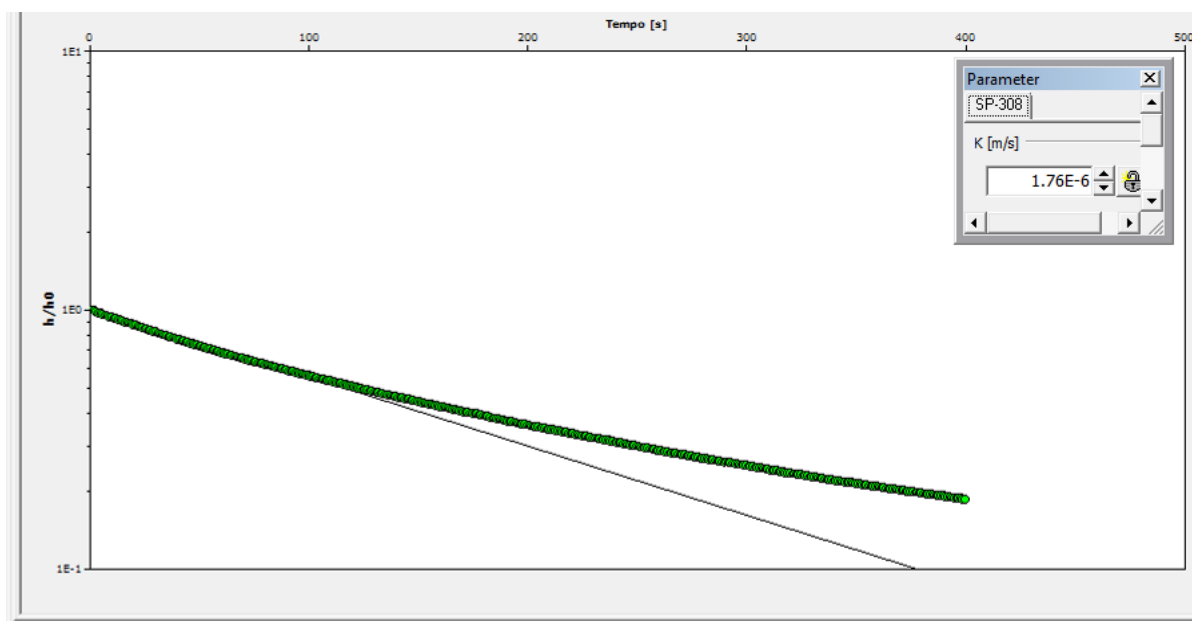
**Figura 33.** Exemplo de gráfico gerado para obtenção do tempo em 37% do rebaixamento a partir dos dados obtidos com o *diver* (gerado no Programa *Excel*).

Para o tratamento dos dados no programa *Aquifer test*, foram utilizados dois ajustes às curvas de rebaixamento, que nas tabelas com os resultados são representadas por: “*Hvorslev-geral*” (Figura 34) e “*Hvorslev-inicial*” (Figura 35). Para o geral utiliza-se a curva que melhor se

adequa à todo o conjunto de dados; para o inicial utiliza-se a curva que melhor se adequa aos dados do início do rebaixamento, antes do mesmo tender a estabilizar.



**Figura 34.** Exemplo de gráfico utilizando a curva geral, que se adequa aos dados até que o rebaixamento tenda a estabilizar (produzido diretamente pelo Programa *Aquifer Test*).



**Figura 35.** Exemplo de gráfico utilizando a curva inicial, que se adequa aos dados até que o rebaixamento tenda a estabilização (gerado no Programa *Aquifer Test*).

Os resultados obtidos por meio de planilhas eletrônicas são similares aos resultados obtidos pelo *software*, os quais foram denominados “*Hvorslev* geral”. Os resultados denominados “*Hvorslev* inicial” tendem a ser maiores, pois o rebaixamento é exponencial e a coluna d’água, maior no início do ensaio, o que influencia na velocidade do fluxo.

Além disto, no início do ensaio, há influência mais significativa dos aspectos construtivos do poço, pois no início ocorre a saturação de espaços vazios no pré-filtro, por exemplo.



Para os resultados obtidos por meio do programa *Aquífer test* verifica-se que 50% dos resultados, tanto “*Hvorslev* geral” quanto “*Hvorslev* inicial” apresentam valores de condutividade hidráulica maiores para os dados obtidos manualmente. Isso pode ser explicado pelo fato de se ter menor detalhe dos dados do rebaixamento para os dados obtidos manualmente.

Avaliando-se os gráficos gerados pelo programa, observou-se que para os dados obtidos manualmente a tendência é de se perder o intervalo de tempo no qual se encontra o  $t$  para 37% da recuperação. Com os dados obtidos automaticamente, geralmente obtém-se um maior valor de  $h$  e maior número de medidas, melhorando significativamente a visualização do rebaixamento e, principalmente, os critérios para a obtenção do tempo para 37% do rebaixamento.

#### **4.2.4. Avaliação do Método de *Bouwer & Rice***

O método de *Bouwer & Rice*, comumente é utilizado para aquífero livre, podendo ser utilizado para aquífero confinado desde que a base da camada confinante fique consideravelmente acima do filtro do poço, considera o raio do poço, comprimento do filtro e o raio efetivo de dissipação da carga hidráulica.

Para o tratamento nas planilhas eletrônicas do Programa *Excel*, considerou-se o conhecimento prévio dos parâmetros construtivos dos poços, bem como as características físicas das regiões estudadas.

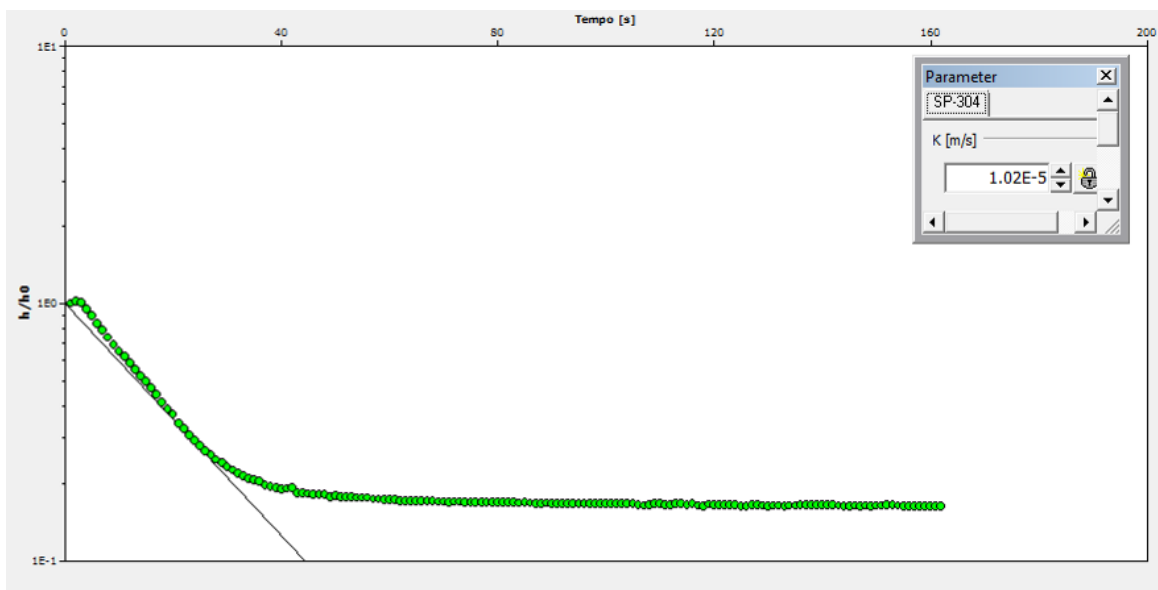
Para o tratamento dos dados no *software* foram consideradas distâncias de três, cinco e sete vezes o raio do poço, como raio de interferência ou distância em que efetivamente a condutividade hidráulica é medida. Assim, os valores da condutividade hidráulica foram calculados para três diferentes valores de  $R_e$  para se avaliar a influência deste parâmetro nas estimativas.

Observou-se que, para todos os poços estudados o raio de interferência não exerceu influência nos resultados, pois a seção de filtro de todos os poços encontra-se na zona saturada. Portanto, o raio de interferência só será relevante para ensaios realizados em poços cujas seções de filtro estejam em parte posicionadas na zona vadosa do aquífero.

Para obtenção do raio efetivo de dissipação no programa *Aquífer Test, Bouwer & Rice* utilizam curvas empíricas para determinar esse raio por três coeficientes (A, B e C), todos em função da razão  $L/R$  (comprimento da seção de filtro e raio do revestimento). Os coeficientes A e B são utilizados para poços parcialmente penetrantes (caso dos poços aqui estudados) e o coeficiente C para poços totalmente penetrantes.

O conjunto de dados utilizados é observado e escolhido manualmente, pois para esse método no programa, deve-se eliminar os dados que sofrem influência dos parâmetros construtivos do poço (Figura 36).

Assim, os gráficos gerados pelos dados obtidos automaticamente são mais facilmente visualizados, tornando mais precisa a escolha da segunda porção da curva de rebaixamento. Observou-se que para os dados obtidos manualmente, na maioria dos casos não se pode visualizar a primeira porção da curva de rebaixamento, que deve ser desprezada.



**Figura 36.** Exemplo gráfico que mostra três intervalos do rebaixamento, onde o primeiro, mais influenciado pelos parâmetros construtivos do poço de monitoramento, foi desconsiderado (gerado no Programa *Aquifer Test*).

#### 4.2.5. Avaliação do método de *Cooper et. al*

O método de *Cooper et al.* foi desenvolvido para tratamento de dados de ensaios do tipo *Slug* em aquífero confinado e em poços com grande diâmetro. Este procedimento considera a variação da lâmina d'água, distância radial entre o poço de observação e um ponto no cone de depressão radial, raio efetivo do poço, transmissividade, coeficiente de armazenamento.

O uso deste método requer ainda que o poço seja totalmente penetrante e que a seção de filtro fique totalmente inserida na zona saturada.

Este método, eventualmente permite que o coeficiente de armazenamento seja determinado para o meio estudado, desde que o raio de revestimento do poço e a seção de filtros possibilite a determinação do parâmetro  $\alpha$ .

Este método foi utilizado apenas no tratamento dos dados obtidos com o transdutor de pressão e por medição manual com o programa *Aquifer Test*. Para esse tratamento os resultados dos dados obtidos manual e automaticamente são bem similares, sendo todos na mesma ordem

de grandeza. Ressalta-se que o método foi desenvolvido para aquíferos confinados com fluxo não estacionário.

Quando comparados aos métodos de *Hvorslev* e *Bouwer & Rice* 50% dos resultados apresentam valores de condutividades hidráulicas menores que os outros métodos e 50% mostram valores de K maiores.

Para os poços SP 313, 314 e 315, situados na Vila do Espírito Santo - TO, cujo aquífero é fraturado, os valores são mais coerentes com os resultados dos demais métodos. Este fato indica que a metodologia proposta por Cooper *et al.* pode ser adaptada para meios fraturados.

#### **4.2.6. Avaliação dos Valores Reais de K em Profundidade**

A condutividade hidráulica é um parâmetro utilizado para várias áreas do conhecimento; para pesquisas agrícolas é utilizada para o planejamento do manejo do solo, determinação de taxas de aspersão em sistemas de irrigação, entre outros, utilizando sempre unidades de comprimento por tempo.

Na engenharia civil, mais especificamente em geotecnia, esse parâmetro também é utilizado principalmente para caracterização de erodibilidade do solo e obtenção de parâmetros geotécnicos, entretanto os métodos de determinação e as unidades de medidas são distintos (comumente medido com vazão por tempo por unidade de área).

Em estudos hidrogeológicos é um parâmetro fundamental do aquífero e é utilizado para a própria definição do aquífero, para a caracterização do comportamento de plumas de contaminação e avaliação das condições de recarga (sua dimensão é unidade de comprimento por unidade de tempo, comumente m/s).

Para a determinação e proposição de valores de condutividades hidráulicas considerados “reais” ou mais adequados aos meios testados foram utilizados três parâmetros: comparação com valores considerados típicos para cada tipo de material, uso de resultados de ensaios de traçador (para o caso do DF, Lousada 2005) e avaliação direta do material em que a seção de filtros está instalada (feições granulométricas dos sedimentos e textura/estrutura dos solos).

Os valores de condutividade hidráulica podem ser classificados em função de intervalos de valores como apresentado na Tabela 52.

**Tabela 52.** Classificação de magnitudes da condutividade hidráulica (adaptado de Freeze & Cherry 1996 e Fetter 1994).

| Valores de K<br>(ordem de<br>grandeza em m/s) | Magnitude   | Exemplo de materiais  |
|---|-------------|---|
| $> 10^{-3}$                                   | Muito Alta  | Cascalho clasto-suportado / Fratura com abertura maior que 5 mm.        |
| $10^{-3}$ a $10^{-5}$                         | Alta        | Arenito grosso, puro e bem selecionado.                                 |
| $10^{-6}$                                     | Moderada    | Arenito fino a média, com pequena quantidade de matriz / Solo arenoso.  |
| $10^{-7}$ a $10^{-8}$                         | Baixa       | Solo argiloso / Siltito pouco fraturado / Grauvaca / Arenito cimentado. |
| $< 10^{-8}$                                   | Muito Baixa | Siltito argiloso / Solo argiloso sem estruturação / Folhelho.           |

Os materiais, nos quais foram realizados os ensaios do tipo *Slug*, foram organizados em grupos com características físicas similares e então avaliados em termos de valores de referência, que seriam mais adequados a cada situação.

Para a região do Distrito Federal, foram considerados quatro grupos de poços a seguir descritos.

Os poços PZE 001 e PZE 002 apresentam situações de transição entre latossolos vermelho-amarelos e cambissolos e apresentam concreções de plintita de forma comum. Nesta área, foram realizados ensaios de traçador, que mostram velocidade linear média de fluxo bastante elevada. Estes resultados e a própria análise da textura e estrutura do solo mostram que um valor da ordem de  $10^{-5}$  m/s é considerado adequado para a zona saturada nesta localidade.

Um segundo grupo é representado pelos poços PZ 01, PZ 20, PZ 27 e PZ 42, todos instalados em áreas de gleissolo háplico. O valor de K, considerado real para estes meios, deve variar entre  $5 \times 10^{-4}$  e  $5 \times 10^{-5}$  m/s. Estes valores são mais elevados que os esperados para gleissolos argilosos, pois se tratam de áreas fortemente antropizadas com instalação de drenagem artificial e desmatamentos.

Por se tratar de solos com estruturação granular comum, os valores atuais são elevados. Resultados de ensaios de infiltração em solos naturais realizados em poços no estado de Goiás (Almeida *et al.* 2006) mostram resultados de condutividade saturada inferiores a  $10^{-7}$  m/s.

Os valores de condutividade considerados para o grupo representado pelos poços PZ 54, PZ 10 e PZ 24, instalados em áreas de latossolos argilosos a muito argilosos, é da ordem de  $5 \times 10^{-6}$  a  $5 \times 10^{-7}$  m/s.

Neste caso, os valores menores são resultantes do próprio modelo conceitual de fluxo local em que parte do saprolito confina pequenas fraturas existentes em rocha fresca/alterada abaixo do perfil dos solos (Modelo de Superfície Potenciométrica Única com Confinamento, Lousada 2005).

O último grupo relacionado aos poços da região do Distrito Federal é representado pelos poços PZ 05, PZ 31, PZ 49 e PZ 55 e as condutividades consideradas como adequadas devem variar entre  $1 \times 10^{-6}$  e  $5 \times 10^{-5}$  m/s. Os solos associados a este grupo são latossolos com textura média a arenosa (o que explica os valores mais elevados), ou quando de textura argilosa apresentam estruturação granular pequena e/ou grumosa comum.

Para os poços da região do sul do estado do Tocantins cinco grupos de poços com características similares e comportamento homogêneo foram definidos.

O primeiro grupo é representado por poços com seção de filtros em material saprolítico derivados de granitos e de filitos ricos em *boudins* de quartzo. Neste grupo, estão inseridos os poços SP 101, SP 103, SP 105, SP 107, SP 303, SP 304, SP 305, SP 306, SP 307, SP 308, SP 311, sendo considerada a variação de valores de condutividade da ordem de grandeza de  $10^{-6}$  até  $10^{-7}$  m/s como valores coerentes com o meio testado.

Outro grupo, com seção de filtro em areia fina argilosa, inclui os poços SP 100, SP 211, SP 300. Admite-se um valor de referência de  $10^{-5}$  m/s para a condutividade hidráulica neste conjunto de poços.

O grupo de poços no qual foram instalados filtros em seção rica em areia mal selecionada em associação com cascalhos inclui os poços SP 202, SP 205 e SP 207. Neste caso, foi atribuído um valor da ordem de  $5 \times 10^{-5}$  m/s como um valor adequado para a condutividade hidráulica.

Os poços SP 209 e SP 210 têm seção de filtros em material composto por areia fina a média homogênea e bem selecionada em associação com seixos de quartzo e quartzito. Este grupo deve apresentar as maiores condutividades hidráulicas observadas, sendo atribuído um valor de referência de  $10^{-4}$  m/s.

Os poços SP 313, SP 314 e SP 315 foram instalados diretamente em material lítico (metagranito milonítico) e, portanto, se trata de um meio anisotrópico fraturado em que as condutividades hidráulicas podem variar de forma extrema em função da densidade, abertura e interconexão de fraturas, e assim não foram atribuídos valores de referência.

## CAPÍTULO V - CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, a condutividade hidráulica na zona saturada e não saturada foi avaliada em diferentes materiais. Foram estudados os seguintes meios: intergranular com grãos simples (areias e cascalhos de aluviões do sul do estado do Tocantins); intergranular com estruturação (solos do Distrito Federal) e meios fraturados, além de saprolitos de materiais pelíticos e graníticos.

O comportamento da condutividade hidráulica destes diferentes materiais apresenta contrastes, tanto na zona saturada, quanto na zona não saturada dos aquíferos. As variações são decorrentes da textura, selecionamento e granulometria dos diferentes materiais.

Foi observado que a estruturação dos solos é um fator fundamental no controle da condutividade hidráulica na zona não saturada. Por exemplo, latossolos gerados a partir de diferentes materiais parentais apresentam condutividades similares e neossolos têm condutividade diretamente controlada pelo grau de desenvolvimento de seu perfil.

Nos casos em que o material é formado por grãos simples, a condutividade é diretamente proporcional ao selecionamento do sedimento.

A condutividade hidráulica é vista de maneira diferente para as diversas áreas que a utilizam; para a agricultura, por exemplo, este parâmetro é considerado basicamente para caracterização da superfície do terreno e é utilizado, principalmente, para determinação de taxas de aspersão em sistemas de irrigação, tanto que se observa na literatura a realização basicamente de ensaios na porção rasa da zona não saturada.

Em engenharia civil observa-se que a condutividade hidráulica também é, geralmente, obtida em superfície e é utilizada principalmente para avaliação da colapsividade/erodibilidade, visando caracterizar ou controlar o surgimento de processos erosivos.

Para a hidrogeologia a condutividade hidráulica é analisada tanto em superfície quanto em profundidade, pois esse parâmetro é importante para avaliação de condições de recarga dos aquíferos, regularização de vazões de cursos d'água, caracterização da vulnerabilidade de diferentes tipos de solo à contaminação das águas subterrâneas, dentre outras aplicações.

Com relação à condutividade hidráulica na zona não saturada pode-se concluir:

- O método dos anéis concêntricos mede a condutividade próxima à superfície e resulta em valores elevados em função da biopedoturbação causada por insetos, anelídeos e raízes. A própria metodologia, que requer a constância de uma coluna de água sobre a área em que o ensaio é desenvolvido, também pode influenciar na produção de valores elevados;
- O método *Open end Hole* é adequado para a determinação da condutividade em profundidade na zona não saturada. É uma metodologia relativamente rápida e de baixo custo. Para ampliar a

acurácia na determinação deve-se causar a mínima deformação do material no fundo do furo de trado e durante a cravação do tubo de revestimento.

A comparação dos resultados obtidos nesta pesquisa com os apresentados em outros trabalhos mostra que, o efeito da estruturação dos solos e a bioturbação no controle da condutividade hidráulica são subestimados pela maioria dos pesquisadores.

Com relação ao tratamento dos dados dos ensaios do tipo *Slug Test* pode-se concluir:

- O uso de diferentes métodos para a determinação da condutividade hidráulica da zona saturada sobre um mesmo conjunto de dados, pode resultar em contrastes superiores a 100 vezes, o que obviamente representa valores incorretos;
- O tratamento dos dados pelo Método da Vazão apenas considera o raio do revestimento do poço, de forma que esta é a solução mais simples a ser aplicada. Sua aplicabilidade deve ser considerada, pois em muitos casos práticos é necessário que este tipo de ensaio seja realizado para responder questões ambientais em que não se tem acesso a esses parâmetros construtivo ou descritivo do poço em estudo.

De qualquer modo, os resultados devem ser avaliados com cuidado e reserva, pois na maioria dos casos, esta equação tende a superestimar os valores de condutividade hidráulica;

- O método de *Hvorslev*, o mais utilizado pela a maior parte dos autores, apresenta certa dificuldade na obtenção do tempo ( $T_0$ ) onde  $H-H_0 = 0,37$ , em planilhas eletrônicas, pois nem sempre os gráficos gerados apresentam de forma visual o  $T_0$ , e a partir do momento que o usuário deve obter esse dado manualmente diminui-se a precisão, pois cada operador pode encontrar um valor diferente, gerando resultados contrastantes.

Para que este método de tratamento seja aplicável, deve-se garantir um tempo suficiente para que se possa obter o  $T_0$  durante a execução do ensaio. Para este mesmo método de tratamento, com a utilização do programa *Aquifer Test*, o  $T_0$  é obtido matematicamente, eliminando o erro ou imprecisão para obtenção deste importante parâmetro;

- O método Bouwer & Rice foi originalmente desenvolvido para aplicação em aquíferos livres. No tratamento dos dados com planilhas eletrônicas, observou-se que o raio efetivo ( $R_e$ ) não apresenta influência significativa em poços de monitoramento que apresentem seções de filtro totalmente ou parcialmente instaladas na zona saturada.

Para o tratamento utilizando-se o *software Aquifer Test* verificou-se que é realmente necessário se identificar e eliminar dados que são submetidos a influência dos parâmetros construtivos do poço de monitoramento, principalmente da seção do pré-filtro, que apresenta espaços vazios que ao serem preenchidos aumentam significativamente o valor da condutividade hidráulica no primeiro momento do ensaio de rebaixamento;

- O método de *Cooper et al.* apresentou valores pouco confiáveis para os aquíferos livres, uma vez que em sua concepção inicial foi aplicado para poços de monitoramento instalados em áreas de sistemas fraturados. Para estes casos este método de tratamento dos dados mostrou-se bastante coerente.

Para todos os métodos, exceto o da Vazão que utiliza apenas o raio do revestimento, é fundamental ter conhecimento dos dados construtivos do poço, bem como obter precisamente os dados de nível estático, tempo e obtenção da altura máxima da lâmina d'água após o lançamento do volume de água, durante a execução do ensaio de rebaixamento.

Os resultados obtidos nos ensaios de rebaixamento (*Slug test*), somados a avaliação dos resultados dos ensaios de infiltração e às características físicas dos meios e dos materiais presentes em cada meio, levam a considerar que os dados tratados por meio do método de *Hvorslev* indicam valores de condutividade hidráulica mais próximos dos esperados para os meios estudados.

O método de *Hvorslev* considera os parâmetros construtivos dos poços de monitoramento, e tais parâmetros realmente exercem influência nos momentos iniciais dos ensaios, pois em todos os resultados obtidos esse fato foi observado. Esta influência é hidráulicamente esperada, pois na zona não saturada os espaços existentes no pré-filtro são primeiramente preenchidos pela água lançada nos poços e causam a superestimação dos valores de condutividade hidráulica.

Esta pesquisa mostrou que os resultados são equivalentes quando os dados são tratados em softwares comerciais (ex. *Aquifer Test Pro*) ou manualmente com auxílio de planilhas eletrônicas (ex. Microsoft Excel). Para a otimização do uso de softwares deve-se escolher um conjunto de dados que inclua a porção final do ensaio, uma vez que o uso de dados do início da curva tende a superestimar o resultado.

Deve-se tratar cuidadosamente os dados, buscando-se identificar e avaliar os dados que sofrem influência dos parâmetros construtivos dos poços de monitoramento. As curvas de rebaixamento devem ser minuciosamente avaliadas para que não se utilize a porção inicial, que mostra a influência de qualquer parâmetro construtivo, podendo mascarar, superestimando ou subestimando os valores de condutividade hidráulica.

Os resultados mostram que ensaios do tipo *Slug Test* podem ser realizados de forma manual, isto é, sem necessariamente se dispor de um transdutor de pressão. Nestes casos, cuidados especiais devem ser considerados como repetir o experimento quando não se tem segurança de que a máxima elevação tenha sido medida e avaliar os intervalos de tempo entre



cada medida (de forma que se tenha uma escala aproximadamente logarítmica do rebaixamento *versus* tempo).

Os estudos de campo desenvolvidos neste trabalho mostram que a introdução de um volume de água é mais vantajosa que o uso de uma barra para elevação do nível d'água. Este procedimento é viável em casos em que o poço penetra apenas uma reduzida seção da zona saturada, facilita a repetição do ensaio com volumes sucessivamente maiores e permite eliminar mais facilmente os efeitos construtivos sobre os resultados de condutividades hidráulicas obtidos.

Duas recomendações para estudos futuros podem ser consideradas a partir dos resultados do presente trabalho: otimizar o método da vazão para aquíferos diversos (a partir da incorporação de parâmetros construtivos do poço) e considerar o método de Cooper *et al.* como uma metodologia adequada para estudos de aquíferos fraturados.

Esta pesquisa alcançou o objetivo proposto e poderá ser utilizada para auxiliar futuros trabalhos práticos de hidrogeologia e para a validação de resultados de ensaios de infiltração *in situ* e do tipo *slug test*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABGE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. *Ensaio de Permeabilidade em Solos: Orientações para sua Execução no Campo*. Boletim nº 4, São Paulo, 1996.
- Ab'Saber, A. N. 1964. As altas superfícies de aplainamento do Brasil sudeste. *Rev. Fac. Campineiras*, 1(4):60-67.
- Almeida, F. F. M. 1967. Observações sobre o Pré-Cambriano da região central de Goiás. In: CONGR. BRAS. GEOL., 21. Curitiba, 1967. Programa, resumo das comunicações, roteiro das excursões...Curitiba, SBG. 1967, p.19-22.
- Almeida, L; Resende, L; Rodrigues, A.P; Campos, J.E.G. 2006. Hidrogeologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. Superintendência de Geologia de Mineração, Governo de Estado de Goiás. 230p.
- Amore L. 1994. Fundamentos para uso e proteção das águas subterrâneas do Distrito Federal. São Carlos, 1994. (Dissertação de Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos.
- Barbosa, O. 1955. Guia das Excursões. In: CONGR. BRAS. GEOL, 9, São Paulo, 1955. SBG. Not.3.
- Barbosa, O.; Braun, O. P. G.; Baptista, M. B.; Cartner-Dyer, R. & Cotta, J. C. 1969. Geologia e inventário dos recursos minerais da região central do estado e Goiás – Projeto Brasília. DNPM/PROSPEC S.A. Brasília. 148 pp.
- Barros, J.C.C. 1994. Caracterização geológica e hidrogeológica do Distrito Federal. In: NOVAES-PINTO, M. (org.) Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas. Brasília. 1994. p. 265-283
- Bonhomme, M. G. 1976. Mineralogie des Fractions et Datation Rubidium – Stronium dans le Group Bambuí, MG, Brésil. *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 6, pp 211-222.
- Bonhomme, M. G.; Cordani, U. G.; Kawashita, K.; Macedo, M. H. F. & Thomaz Filho, A. 1982. Radiochronological Age and Correlation of Proterozoic Sediments in Brazil. *Precambrian Res.*, vol. 18, pp 103-118.
- Botelho, N.F & Moura, M.A. 1998. Granite-ore deposit relationship in central Brazil. *Journal of South America Earth Science*. v 11 (5). p. 427-438.
- Bouwer, H. and R.C. Rice, 1976. A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, *Water Resources Research*, vol. 12, no. 3, pp. 423-428.
- BRASIL/DNPM/CPRM, DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL/CIA PESQ. RECURSOS MINERAIS. 1983. *Províncias Hidrogeológicas do Brasil*.
- Braun, O.P.G. 1968. Contribuição a estratigrafia do Grupo Bambuí. In: CONGR. BRAS. GEOL., 22. Belo Horizonte, 1968. *Anais...*Belo Horizonte, SBG, vol. 1, p.155-156.
- Braun, O.P.G. 1971. Contribuição à geomorfologia do Brasil Central. *Rev. Bras. Geogr.*, 32(3):3-39.
- Brown, D.; Narasimhan, T. and Demir, Z. 1995. An Evaluation of the Bouwer and Rice Method of Slug Test Analysis, *Water Resources Research*, 31(5), 1239-1246.
- Cadamuro A.L.M. 2002. Proposta, avaliação e aplicabilidade de técnicas de recarga artificial em aquíferos fraturados para condomínios residenciais do Distrito Federal. Brasília, 2002. (Dissertação de Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 126p.

- Campos, J.E.G., Freitas-Silva F H. 1998. Hidrogeologia do Distrito Federal. In: Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal, Brasília: IEMA/SEMATEC/UnB, v. 4, p. 01-85.
- Campos J.E.G. & Freitas-Silva, F.H. 1999. Arcabouço hidrogeológico do Distrito Federal. In: SBG, Simp. Geol. Centro-Oeste, 12, Boletim de Resumos. Brasília. 113p.
- Campos, J. E. G. & Dardenne, M. A. 1999. Geologia da Região de Cavalcante / Teresina de Goiás. In: Geologia da Região do Distrito Federal e Entorno Próximo. Brasília. Relatório Inédito. FAPDF / UnB. Parte V. pp: 104-136.
- Campos, J. E. G., Tröger, U. 2000. Groundwater occurrence in hard rocks in the Federal District of Brasília. A sustainable supply?. PROCEEDINGS DO XXX IAH CONGRESS. CAPE TOWN, 2000, p. 109-113.
- Campos, J.E.G. 2004. Hidrogeologia do Distrito Federal: base para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Rev. Bras. Geogr., 34(1):41-48.
- Chievagatto, J.R.S. 1992. Análise estratigráfica das sequências tempestíticas da Formação Três Marias (Proterozóico Superior), na porção meridional da Bacia do São Francisco. Ouro Preto, 1992. 216 p. MSc. Thesis, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Chiavegatto, J. R. S. & Gomes, N. S. 1993. Análise Estratigráfica das Sequências Tempestíticas da Formação Três Marias na Porção Meridional da Bacia do São Francisco. In: Simpósio sobre o Cráton do São Francisco, 2. Salvador. 1993. Anais... Salvador, SBG, pp 189-191.
- Coimbra, A.R.S.R. 1987. Balanço hídrico preliminar do Distrito Federal. In: Inventário hidrogeológico do Distrito Federal. (GDF/CAESB) Brasília DF. P. 50-78.
- Cooper, H.H., J.D. Bredehoeft and S.S. Papadopulos. 1967. Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water, Water Resources Research, vol. 3, no. 1, pp. 263-269.
- Costa, M.T. & Branco, J.J.R. 1961. Roteiro da excursão Belo Horizonte-Brasília-Belo Horizonte. Instit. Pesqui. Radioativas/UFMG. Contribuição ao XIV Congr. Bras. Geol.. Publicação 5. 126p.
- Costa, É.L da; Silva, A.M. da; Colombo, A. & Abreu, A.R. de. 1999. Infiltração de Água em Solo, Determinada por Simulador de Chuvas e pelo Método do Anéis. Ver. Brás. De Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB; v.3, n.2, p.131-134.
- Cruls, L. 1894. Relatório da Comissão Exploradora do Planalto Central do Brasil. Brasília. CODEPLAN 5ª ed., 1995. 343p.
- Dardenne, M.A.1978. Zonação tectônica da borda ocidental do Cráton São Francisco. In: CONGR. BRAS. GEOL., 30, Recife, 1978. Anais...Recife, SBG, vol.1, p. 299-308, 1978.
- Dardenne, M. A. 1981. Os Grupos Paranoá e Bambuí na Faixa Dobrada Brasília. In: SIMP. SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO E SUAS FAIXAS MARGINAIS, 1981.
- Dardenne, M.A. 2000. *The Brasilia Fold Belt*. In: Tectonic evolution of South America, 2000. P.: 231-263. Cordani, U. G., Milani, E. J., Thomaz Filho, D. & Campos, D. A. (Coord.). Rio de Janeiro.
- EMBRAPA. 1978. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Distrito Federal. Escala 1:100.000. Rio de Janeiro. EMBRAPA. SNLCS. Boletim Técnico. 455p.
- EMBRAPA. 2006. Centro Nacional e Pesquisa em Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006. 306 p.

- Faria, A. 1985. Mapa Geológico do Distrito Federal - Folha 1:100.000 (Convênio DNPM/ IG - Universidade de Brasília).
- Faria, A. 1989. O Grupo Paranoá no Distrito Federal. In: SIMP. GEOL. MINAS GERAIS, 5 Belo Horizonte, 1989. Anais... Belo Horizonte, SBG/MG. Bol. 10, p.262-265.
- Faria, A. 1995. Estratigrafia e sistemas deposicionais do Grupo Paranoá nas áreas de Cristalina, Distrito Federal e São João D'Aliança-Alto Paraíso de Goiás. Brasília, 1995. 199p. (Tese de Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.
- Fetter, C. W. 1994. Applied Hydrogeology, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 3rd ed., 691p.
- Freeze, R.A. & Cherry, J.A. 1996. Groundwater. Prentice Hall, New York. 4ª edição. 604p.
- Freitas-Silva, H. F. 1996. Metalogênese do Depósito do Morro do Ouro, Paracatu – MG. Brasília, 1996. (Tese de Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 338 p.
- Freitas-Silva, F. H. & Dardenne, M. A. 1994. Proposta de subdivisão estratigráfica formal para o grupo Canastra no oeste de Minas Gerais e leste de Goiás. In: SIMP. GEOL. CENTRO OESTE., 4. Brasília, Anais...Brasília, 1994, SBG-DF/CO, p.164-165.
- Freitas-Silva, F.H. & Campos, J.E.G. 1998. Geologia do Distrito Federal. In: Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília. IEMA/SEMATEC/UnB. Parte I. 87p.
- Fuck, R.A.; Marini, O.J. 1981. O Grupo Araxá e unidades homataxiais. In: SIMPOSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO E SUAS FAIXAS MARGINAIS, 1, Salvador, 1981. Anais ... Salvador: SBG/BA. p.118-130.
- Fuck, R.A.; Marini, O.J; Dardenne, M.A.; Figueiredo, A.N. 1988. Coberturas Metassedimentares do Proteozóico Médio: os Grupos Araí e Paranoá na Região de Niquelândia - Colinas, Goiás. RBG:18(1),. p. 54-62
- Gaspar, M.T.P; Campos, J.E.G.; Cadamuro, A.L.M. 2007. Condições de infiltração em solos na região de recarga do sistema aquífero Urucuia no oeste da Bahia sob diferentes condições de usos. Revista Brasileira de Geociências, 37(3): 542-550.
- Guimarães, E.M. 1993. Implicações da Caracterização Mineralógica e Química da Formação Três Marias - Região de Cabeceiras (GO) - na Interpretação da Gênese da Bacia. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO E SUAS FAIXAS MARGINAIS, 2. Salvador, 1993. Anais... Salvador, SBG, pp 298-301.
- Hazen, A. 1911. Discussion. Dams on sand foundations. Transactions, American Society of Civil Engineers, 73:199.
- Hvorslev, M.J., 1951. *Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations*, Bull. Nº. 36, Waterways Exper. Sta. Corps of Engrs, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, pp. 1-50.
- Joko, C. T. 2002. Hidrogeologia a Região de São Sebastião – DF: Implicações para a Gestão do Sistema de Abastecimento de Água. Universidade de Brasília/Instituto de Geociências. 158p. (Dissertação de Mestrado).
- King, L.C. 1956. A geomorfologia do Brasil Oriental. *Rev. Bras. Geogr.*, 18(2):147-265.
- Lousada, E. O. 2005. Estudos hidrogeológicos e isotópicos em águas subterrâneas do Distrito Federal: modelos conceituais dos aquíferos. Brasília. 128p. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília).
- Maior, C.R. 1986. Alterações ambientais no Distrito Federal baseadas an geomorfologia dinâmica. Revista Brasileira de Geografia, IBGE, Rio de Janeiro, 48(3), p259 - 284.

- Marini, O.J. & Botelho, N.F. 1986. A Província de Granitos Estaníferos de Goiás. *RBG Rev. Bras. de Geociências*, v 16(1). pp: 119-131.
- Marini, O.J.; Fuck, R.A.; Dardenne, M.A.; Teixeira, N.A. 1977. Dobramentos da borda oeste do Cráton do São Francisco. Salvador. SBG/BA. Public. Espec.. bol. 3, p. 155-193.
- Martins, E. S. 1998. Sistemas pedológicos do Distrito Federal. In: Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. Brasília: IEMA/SEMATEC/UnB, v. 1, p. 139-163.
- Martins, E.S. & Baptista, G.M.M. 1998. Compartimentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal. In: Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília. IEMA/SEMATEC/UnB. Parte II. 53p.
- Mauro, C.A.; Dantas, M.; Roso, F.A. 1982. Geomorfologia. In: BRASIL, MME. Folha SD-23 Brasília. Rio de Janeiro. Projeto RADAM BRASIL. v.29. p. 205-296.
- Mendonça A.F. 1993. Caracterização da erosão subterrânea nos aquíferos porosos do Distrito Federal. Anexo 3a: Reservas de água de superfície do Parque Nacional de Brasília. Brasília. Universidade de Brasília/Instituto de Geociências. 154p. (Dissertação de Mestrado).
- Ment, A. 2000. As condições hidrogeológicas do Brasil. In: Hidrogeologia, Conceitos e Aplicações. CPRM/REFO, LABHID, UFPE. Fortaleza. 1ª Edição. p. 323-340.
- Moraes, L.L. 2004. Estudo do rebaixamento de lagoas cársticas no Distrito Federal e entorno: a interação hidráulica entre águas subterrâneas e superficiais. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 128p.
- Novaes Pinto, M. & Carneiro, P.J.R. 1984. Análise preliminar das feições geomorfológicas do Distrito Federal. In: CONGR. BRAS. DE GEÓGRAFOS. 4. 1984. *Anais ...* São Paulo. Livro II, v.2. p.190-213.
- Novaes Pinto, M. 1986a. Caracterização morfológica do Curso Superior do Rio São Bartolomeu - Distrito Federal. *Rev. Bras. Geogr.*, 48(4):377-397.
- Novaes Pinto, M. 1986b. Unidades geomorfológicas do Distrito Federal. *Geografia*, 11(21):97-109.
- Novaes Pinto, M. 1987. Superfícies de aplainamento do Distrito Federal. *Rev. Bras. Geogr.*, 49(2):9-26.
- Novaes Pinto, M. 1994a. Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. In: NOVAES PINTO, M. (org). Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas. Brasília. Editora UnB. 2ª ed.. p. 285-320.
- Novaes Pinto, M. 1994b. Paisagens do cerrado no Distrito Federal. In: Novaes Pinto, M. (org). Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas. Brasília. Editora UnB. 2ª ed.. p. 511-542.
- Penteado, O.M.M. 1976. Tipos de concreção ferruginosa nos compartimentos geomorfológicos do Planalto de Brasília. *Not. Geom.*, 16:39-53.
- PGIRH. 2005. Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal. Secretaria de Infra-Estrutura e Obras - SEINFRA-DF Brasília - DF, abril 2005.
- Reatto, A.; Correia, J. R.; Spera, S. T.; Chagas, C.S.; Martins, E.S.; Andahur, J.P.; Godoy, M.J. S.; Assad, M.L.C.L. 2000. Levantamento semidetalhado dos solos da Bacia do Rio Jardim-DF, escala 1:50.000. Boletim de pesquisa-EMBRAPA Cerrados, (18) 66p.

- Romano, O. & Rosas, J.G.C. 1970. Água subterrânea para fins de abastecimento de água e irrigação no Distrito Federal. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 24. 1970. Anais..., Brasília, SBG. p.313-333.
- SEPLAN. 2003. Atlas do Tocantins - Subsídios ao planejamento da gestão territorial. Governo do Estado do Tocantins. Secretaria do Planejamento e Meio Ambiente. Diretoria de Zoneamento Ecológico-Econômico. Palmas.
- Souza, M.T. 2001. Fundamentos para Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Distrito Federal. Brasília. Universidade de Brasília/Instituto de Geociências. 94p. (Dissertação de Mestrado).
- Zoby J.L.G. 1999. Hidrogeologia de Brasília - Bacia do Ribeirão Sobradinho. São Paulo. Universidade de São Paulo - Instituto de Geociências. (Dissertação de Mestrado - inédita). 178p.