



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DA RECARGA E DA CONEXÃO HIDRÁULICA DO
SISTEMA AQUÍFERO GRANULAR-FISSURAL NO CAMPUS
PAMPULHA DA UFMG, BELO HORIZONTE, MG**

AUTOR: João Pedro Marques Ribeiro

ORIENTADORA: Profa. D^{ra}. Leila Nunes Menegasse Velásquez

BELO HORIZONTE
2013



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Análise da recarga e da conexão Hidráulica do Sistema aquífero Granular-Fissural no Campus Pampulha da UFMG, Belo Horizonte, MG.

Dissertação apresentada ao curso de mestrado do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais
Área de concentração: Geologia econômica e aplicada

AUTOR: João Pedro Marques Ribeiro

BANCA EXAMINADORA:

Prof^a Dr^a LEILA NUNES MENEGASSE VELÁSQUEZ
(IGC/UFMG)

Dr. GERSON CARDOSO DA SILVA JÚNIOR
(UFRJ)

Dr^a MARIA ANTONIETA ALCÂNTARA MOURÃO
(CPRM)

BELO HORIZONTE
2013

Agradecimentos

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa concedida ao longo do mestrado.

Agradeço a Infraero, na pessoa do Superintendente Mário Jorge Fernandes de Oliveira pelos dados meteorológicos fornecidos.

Agradeço a PRODABEL, na pessoa do senhor Felipe Antônio Carneiro, do setor de atendimento, pelos dados fornecidos.

Agradeço ao CDTN pelos dados cedidos, e pela oportunidade de poder utilizar de suas instalações para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Departamento de obras da UFMG (DPFO), nas pessoas do arquiteto José Domício Sobrinho e do engenheiro Kelso A. Nogueira, por toda a ajuda prestada, por todas as dúvidas sanadas, pelo cuidado em fornecer a maior quantidade possível de informações, pelo auxílio em alguns momentos em campo, pelo empréstimo de ferramentas, por tantos dados, mapas e imagens cedidas.

Agradeço ao Namir, do CDTN, por toda ajuda paciência e dedicação no processo de instalação dos diveres, que com certeza sem a sua ajuda não teriam sido instalados com tanta segurança e rapidez.

Agradeço ao Liéssi Luiz Santos (Pózinho), do CDTN, por toda ajuda e dicas dadas em campo.

Agradeço a Lilian Catone, pela ótima recepção ao IGC, pelas boas conversas, pelo companheirismo, e, sobretudo pelas dicas e ajudas no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a Pedro Casagrande, pela ajuda dada ao longo do monitoramento dos parâmetros físico-químicos.

Agradeço ao geólogo Peter Marshall Fleming, pelas longas conversas, dicas, conhecimentos transmitidos e auxílios na instalação dos diveres.

Agradeço ao geólogo Paulo Rodrigues, pelos ensinamentos, conselhos, dicas e por todo auxílio prestado, que foi dado com muito cuidado e comprometimento.

Agradeço ao engenheiro Alberto Avelar Barreto, pela pronta disposição em ajudar e ceder dados meteorológicos com o máximo de cuidado e critério e pelas discussões de ideias.

Agradeço ao geólogo Carlos Alberto de Carvalho Filho, por toda ajuda prestada, pelos conselhos, ensinamentos, conversas, dicas, piadas e companheirismo. Ao lado da professora Leila me auxiliou e orientou neste trabalho, mesmo que extra oficialmente, com muita dedicação e esmero.

Agradeço a professora Leila, que me aceitou como aluno mesmo não me conhecendo e por ter acreditado em mim, se dedicado, se preocupado com meu desenvolvimento no mestrado, por todos os “puxões de orelha”, que tanto me ensinaram e me fizeram aprender e crescer um pouco mais.

Agradeço imensamente ao geógrafo Antônio Guilherme S. Diniz, pelo incentivo à ingressar na UFMG e por todo apoio e amizade. À Ana Paula S. Diniz e Ana Luiza S. Diniz, por todo carinho ao me acolher em sua casa, no início do mestrado.

Agradeço à Carolina Imura, pela delicadeza e atenção em tentar me deixar o mais confortável possível em Belo Horizonte, por me apresentar pessoas extraordinárias, que se tornaram grandes amigos, e, por toda sua preocupação comigo.

Agradeço à Diogo A. Caminhas, Geélison F. da Silva e Davy A. Caminhas, por me receberem em sua casa, e ao longo do período do mestrado. Por todo companheirismo, amizade, conversas, risadas, e por tornarem Belo Horizonte mais minha casa.

Agradeço a toda a minha família pelo apoio, compreensão, auxílio para o mestrado. À minha mãe Clemári, pelas longas conversas por “Skype” e telefone, pelas palavras certas nos momentos necessários e por todo carinho nas minhas visitas à São Paulo. Ao meu pai, Roberto, pela força e apoio dado em todos os momentos da dissertação.

Agradeço aos meus irmãos Cyati e Lucas, pela paciência e grande amizade!

Termino agradecendo quem esteve do meu lado, apoiando nos momentos difíceis, ouvindo minhas reclamações e sendo sempre compreensível e carinhosa. A responsável por me fazer mais feliz nessa jornada em Minas Gerais, minha flor Aline E. R. Santos.

Análise da recarga e da conexão hidráulica do Sistema aquífero Granular-Fissural no Campus Pampulha da UFMG, Belo Horizonte, MG

RESUMO

Nesse estudo foram analisadas a recarga e a conexão hidráulica entre os aquíferos granular e fissural do sistema aquífero do campus Pampulha da UFMG, em Belo Horizonte, Minas Gerais. Na área, o aquífero granular é livre, se sobrepõe ao fissural, e é constituído por aluviões, colúvios e solo residual, enquanto o aquífero fissural é livre a semiconfinado, representado por gnaisses, granitos e diques de diabásio do Complexo Belo Horizonte. A precipitação média é de 1.404,8 mm/ano incidente entre outubro e março. Duas etapas de trabalho foram executadas: a primeira envolveu o estudo da recarga aquífera e conexão hidráulica entre o meio granular e o meio fissural com dados de monitoramento manual, quinzenal, executado no projeto PROHBEN de 1997 a 2000, numa rede de poços profundos inativos (7) representantes do aquífero fissural e piezômetros (4) representantes do aquífero granular. Por meio de correlações estatísticas, foi estabelecida, a evidência de existência da conexão hidráulica, o grau de influência de fatores texturais do solo e pluviométricos sobre a recarga aquífera, bem como realizado o cálculo da recarga do aquífero granular. Os resultados nortearam a seleção de poços para o monitoramento automatizado e manual por 8,5 meses envolvendo completamente a estação chuvosa, de agosto/2012 a abril/2013, constituindo a segunda e mais importante etapa do estudo. Transdutores de pressão foram instalados em 3 piezômetros e 3 poços profundos inativos, com leituras a cada 15 minutos, e o monitoramento manual foi realizado semanalmente em 2 poços profundos e em 1 piezômetro. A caracterização da conexão hidráulica foi realizada estimando-se o tempo de resposta do nível d'água de cada aquífero à precipitação e o tempo gasto entre a recarga direta do meio granular e a recarga indireta deste ao meio fissural. Para isso foram empregadas técnicas de análise de funções de correlação cruzada. Os resultados mostraram que, no aquífero granular, a recarga se efetivou espacialmente entre 45 a 70 dias e no aquífero fissural entre 59 a 69 dias. O tempo de resposta à recarga do aquífero fissural a partir do granular foi de menos de um dia, corroborando a elevada conexão hidráulica entre ambos aquíferos. A recarga do aquífero granular foi realizado segundo a técnica de variação espacial do nível d'água natural, com resultados de 264 a 390 mm, 28 a 41% da precipitação. O fator mais influente para recarga foi a precipitação e o fator menos influente foi a profundidade do nível d'água. A influência do uso e ocupação do solo foi evidenciada pelos menores percentuais de recarga 264 mm (28% de P) e 279 mm (29% de P), obtidos nos piezômetros localizados em área com predomínio de vegetação arbórea, enquanto o maior valor de 390 mm (41% de P) em piezômetro localizado em área com ocupação predominantemente gramínea. As variações do NA dentro do aquífero fissural permitiram uma avaliação preliminar de que, da água de recarga do aquífero granular (775.000 m³), cerca de 14% chegaria ao aquífero fissural (109.200 m³).

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento; Recarga direta; Conexão hidráulica; Correlação cruzada; Auto correlação; Transdutores de Pressão.

Analysis on Recharge And Hydraulic Connection of Aquifer System Granular and Fissure on UFMG Campus Area, Pampulha, Belo Horizonte, MG.

ABSTRACT

This paper was analyzed the recharge and hydraulic connection between the aquifers granular and fractured of aquifer system UFMG campus Pampulha in Belo Horizonte, Minas Gerais. In the area, the granular aquifer is free, overlaps the fractured aquifer, and consists of alluvial, colluvial and residual soil, while the fractured aquifer is semi-confined to free, represented by gneisses, granites and diabase dikes of Complex Belo Horizonte. Where the average rainfall is 1,404.8 mm / year incident between October and March. Two work steps were performed: the first involved the study of aquifer recharge and hydraulic connection between the porous medium and fractured medium, with manual monitoring data, fortnightly, PROHBEN carried out on the project from 1997 to 2000, in a network the deep wells inactive (7) representatives of the fractured aquifer and piezometers (4) representatives of the granular aquifer. Through statistical correlation was established, the evidence of existence of hydraulic connection, the degree of influence of textural soil, rainfall on recharging aquifer, and the calculation of the recharge in the granular aquifer. The results guided the selection of wells for monitoring automated and manual for 8 months and half, completely surrounding the rainy season, from August/2012 to April/2013, the second stage of the study. Pressure transducers were installed in 3 piezometers and 3 deep wells inactive, with readings every 15 minutes, and manual monitoring was conducted weekly in 2 paralyzed deep wells and one piezometer. The characterization of the hydraulic connection was detailed estimating the response time of the potentiometric water table to precipitation of each aquifer and the time separating the direct recharge the granular medium and indirect recharge through the fractured. Cross correlation techniques were used to this detailed. The results showed that in the granular aquifer the recharge was effective between 45 to 70 days and in the fractured aquifer the recharge was effective between 59 to 69 days. The delay of recharge with granular aquifer to fractured aquifer is the less than one day, confirming the hydraulic connection between these two aquifers. The recharge in granular aquifer calculated was according to the technique of water table fluctuation method, the result is 264 to 390mm, 28 - 41% the precipitation. The factor most influence in recharge was rainfall and the factor less influence in recharge was water table depth. The influence of use and occupation land was evidenced by the smaller percentage of recharge 264 mm (28% R) and 279 mm (29% R), obtained in piezometers located in tree vegetation, the bigger percentage of recharge is 390 mm (41% R) in piezometer located in grass area. The oscillation of potentiometric level of fractured aquifer allowed a preliminary assessment the granular aquifer recharge (775.000 m³), 14% approximately, would reach to the fractured aquifer (109.200 m³).

Keywords: Monitoring; Recharge; Hydraulic connection; Cross-correlation; Auto correlation; Automated Monitoring.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. JUSTIFICATIVAS	3
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
4.1 ESTUDOS GERAIS SOBRE O TEMA	4
4.2 ESTUDOS ANTERIORES	6
5. LOCALIZAÇÃO	9
6. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA BACIA DA REGIÃO DE ESTUDO	12
6.1 CONTEXTOS GEOLÓGICO E GEOTECTÔNICO	12
6.2 ASPECTOS FÍSICO- CLIMÁTICOS	14
6.3 HIDROGEOLOGIA	15
7. MATERIAIS E MÉTODOS	18
7.1 INVENTÁRIO DOS PONTOS D'ÁGUA	19
7.2. MONITORAMENTO DO NÍVEL ESTÁTICO	23
7.3 TESTES DE PERMEABILIDADE DO AQUIFERO POROSO	27
7.4 TESTES DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO AQUIFERO FISSURAL	28
7.5 ANÁLISE DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	29
7.6. TRATAMENTO ESTATÍSTICO	30
7.6.1 <i>ESTATÍSTICA DESCRITIVA E CORRELAÇÕES</i>	30
7.6.2 <i>AUTOCORRELAÇÃO</i>	32
7.6.3 <i>CORRELAÇÃO CRUZADA</i>	34
7.7. CÁLCULO DA RECARGA	35
7.8. MONITORAMENTO FÍSICO-QUÍMICO	36
8. RESULTADOS DA 1ª ETAPA	37
8.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO SOBRE A RECARGA	37
8.2ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEXTURA DO SOLO SOBRE A RECARGA	45
8.3 LOCALIZAÇÃO DAS REGIÕES DE MAIOR RECARGA	47
8.4ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DO NÍVEL POTENCIOMÉTRICO SOBRE A INFILTRAÇÃO ANUAL Δh	49
8.5 CÁLCULO DA RECARGA DO AQUIFERO POROSO - 1ª ETAPA	50
8.6ANÁLISE DA CONEXÃO HIDRÁULICA ENTRE OS AQUIFEROS GRANULAR E FISSURAL	51
9. RESULTADOS DA 2ª ETAPA	52
9.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO NA RECARGA	53

9.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEXTURA DO SOLO NA RECARGA	66
9.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DO NÍVEL POTENCIOMÉTRICO NA RECARGA	67
9.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA RECARGA	69
9.5 CONEXÃO HIDRÁULICA ENTRE OS AQUIFEROS POROSO E FISSURAL.....	72
9.6 PARÂMETROS FÍSICOS DOS AQUIFEROS – CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (K), TRANSMISSIVIDADE (T) E ARMAZENAMENTO ESPECÍFICO (Sy)	74
9.7 RECARGA 2º ETAPA	75
9.8 MONITORAMENTO FÍSICO-QUIMICO	77
10. CONCLUSÃO	80
11. RECOMENDAÇÕES	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA	83
ANEXOS	86
Anexo 1. Piezômetro - PM1 – CDTN	86
Anexo 2. Piezômetro - PM2 – Centro de Microscopia	87
Anexo 3. Piezômetro - PM6 – Creche	88
Anexo 4. Piezômetro - PM8 – Reitoria; leitura de diver sendo feita	89
Anexo 5. Poço Profundo - P2 – Bambuzal	90
Anexo 6. Poço Profundo - P4 – COLTEC	91
Anexo 7. Poço Profundo - P10 – DPFO – Belas Artes	92
Anexo 8. Diver	93
Anexo 9. Tarugo para execução de slug test	94
Anexo 10. Pluviômetro da estação meteorológica do CDTN	95
Anexo 11. Dados do teste de vazão feito no P3 pela empresa Hidropoços	96
Anexo 12. Gráficos dos Slug test realizados na 1ª campanha (out. e nov. 2012) e na 2ª campanha (fevereiro 2013)	97
Anexo 13. Descrições detalhadas dos Piezômetros e Poços Profundos	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1. Localização do município de Belo Horizonte no Estado de Minas Gerais, e do campus da UFMG na cidade de Belo Horizonte.	10
Figura 5.2. Localização do campus da UFMG em Belo Horizonte.	10
Figura 5.3. Imagem do Campus da UFMG, com destaque para as avenidas e pontos de referência no seu entorno.	11
Figura 6.1. Roseta de direção das fraturas.	13
Figura 6.2. Perfil Geológico da área.	14
Figura 6.3 Mapa de características do solo.	18
Figura 7.1. Planta do campus da UFMG com todos os poços e piezômetros.	20
Figura 7.2. Localização dos pontos d'água monitorados em 2012/2013.	25
Figura 7.3. Esquema de instalação da rosca na tampa do poço.	26
Figura 7.4. Esquema de instalação dos <i>divers</i> nos poços.	26
Figura 7.5. Método de Hvorlev.	28
Figura 7.6. Gráfico típico do método de Hvorlev.	28
Figura 7.7. Curva Típica de Neuman. Fonte: Feitosa <i>et. al.</i> 2008.	29
Figura 7.8. Exemplo de correlograma de auto-correlação. Lee & Lee (2000).	33
Figura 7.9. Exemplo de correlograma de correlação - cruzada. Lee & Lee (2000).	35
Figura 8.1. Exemplo de comportamento do NA e pluviosidade - PM3 1997/1998.	39
Figura 8.2. Exemplo de comportamento do NA e pluviosidade - PM3 - 1998/1999.	39
Figura 8.3. Exemplo de comportamento do NA e pluviosidade - PM3- 1999/2000.	39
Figura 8.4. Exemplo de comportamento do NA e pluviosidade - P1 - 1998/1999.	40
Figura 8.5. Exemplo de comportamento do NA e pluviosidade - P1 - 1998/1999.	40
Figura 8.6. Exemplo de comportamento do NA e pluviosidade - 1999/2000.	40
Figura 8.7. Percentual da correlação entre Nível estático e Precipitação – Piezômetros.	42
Figura 8.8. Percentual da correlação entre Nível estático e Precipitação – Poços Profundos.	42
Figura 8.9. Correlogramas de FCC da 1ª etapa para os poços profundos, $r_{xy(k=15 \text{ dias})}$, destaque para os pontos $K=7$	44
Figura 8.10. Correlograma de FCC para a 1ª etapa, $r_{xy(k=15 \text{ dias})}$, destaque para os pontos $K=7$	45
Figura 8.11. Mapa potenciométrico do Aquífero Poroso – mês de junho 2000.	48
Figura 8.12. Mapa potenciométrico do Aquífero fissural/misto – mês de junho 2000.	49
Figura 9.1. Precipitação e profundidade do nível de água com transdutor de pressão no piezômetro PM6.	53
Figura 9.2. Precipitação e profundidade do nível de água com transdutor de pressão no piezômetro PM8.	54
Figura 9.3. Precipitação e profundidade do nível de água com transdutor de pressão no poço profundo P8.	54
Figura 9.4. Precipitação e profundidade do nível de água com transdutor de pressão no poço profundo P10.	55
Figura 9.5. Precipitação e profundidade do nível de água monitorado manualmente no piezômetro PM2.	56
Figura 9.6. Precipitação e profundidade do nível de água monitorado manualmente no poço profundo P2.	56
Figura 9.7. Precipitação e profundidade do nível de água monitorado manualmente no poço profundo P4.	57
Figura 9.8. FCC de precipitação e nível d'água – PM6.	58
Figura 9.9. FCC de precipitação e nível d'água - PM8.	59
Figura 9.10. FCC de precipitação e nível d'água - P8.	59
Figura 9.11. FCC de precipitação e nível d'água - P10.	59
Figura 9.12. Correlograma da FAC para o PM6.	64
Figura 9.13. Correlograma da FAC para o PM8.	64
Figura 9.14. Correlograma da FAC para o P8.	64
Figura 9.15. Correlograma da FAC para o P10.	65
Figura 9.16. Imagem do PM2, com buffer de 30m. Usos e ocupações do solo.	70
Figura 9.17. Imagem do PM6, com buffer de 30m. Usos e ocupações do solo.	71
Figura 9.18. Imagem do PM8, com buffer de 30m. Usos e ocupações do solo.	72
Figura 9.19. Correlograma FCC entre NA de poço e piezômetro – PM6 e P10 ($r_{xy} (k=1 \text{ dia})$).	73
Figura 9.20. Correlograma FCC entre NA de poço e piezômetro – PM8 e P8 ($r_{xy} (k=1 \text{ dia})$).	73
Figura 9.21. Variação do pH no aquífero poroso no período de monitoramento 2012/2013.	77

Figura 9.22. Comportamento do ORP ao longo do tempo de monitoramento.	78
Figura 9.23. Comportamento do STD ao longo do período de monitoramento.	79
Figura 9.24. Gráfico do comportamento da Condutividade Elétrica ao longo do período de monitoramento	79
Figura 9.25. Comportamento da temperatura da água no período monitorado.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 7.1. Características dos poços profundos quanto à pressão da água.	21
Tabela 7.2. Profundidade dos piezômetros e textura do solo.....	22
Tabela 7.3. Profundidade dos poços profundos e textura da zona granular	22
Tabela 7.4. Características dos poços profundos para o posicionamento dos <i>divers</i>	25
Tabela 7.5. Características dos poços de monitoramento para o posicionamento dos <i>divers</i>	26
Tabela 7.6. Valores dos testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov (K-S) e Shapiro Wilk, para os dados do monitoramento de 1997 a 2000.....	31
Tabela 7.7. Valores dos testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov (K-S) e Shapiro Wilk, para os dados do monitoramento de 2012/2013.	31
Tabela 7.8. Valores dos graus de correlação segundo o método de Pearson e Spearman..	32
Tabela 8.1. Estatística descritiva dos dados por piezômetro.....	37
Tabela 8.2. Estatística descritiva dos dados por poço profundo.	37
Tabela 8.3. Tratamento estatístico dos dados de NA da primeira etapa do trabalho.	38
Tabela 8.4. Total de precipitação anual por ano hidrológico.....	38
Tabela 8.5. Correlação de Spearman da média mensal do nível de água com a pluviosidade mensal nos Piezômetros	41
Tabela 8.6. Correlação de Spearman da média mensal do nível de água com a pluviosidade mensal nos Poços tubulares.	41
Tabela 8.7. Elevação do nível d'água ($\Sigma\Delta h$) em relação à textura do subsolo nos piezômetros.	46
Tabela 8.8. Comparação entre a descrição litológica e a variação positiva anual do nível de água - poços profundos.....	47
Tabela 8.9. Coeficientes de correlação de Δh com a profundidade do NA nos piezômetros.	50
Tabela 8.10. Coeficientes de correlação de Δh com a profundidade do NA nos poços profundos.....	50
Tabela 8.11. Valores da recarga nos piezômetros, valores expressos em <i>mm</i>	51
Tabela 8.12. Coeficiente de correlação entre as medidas de nível de água dos poços profundos e dos poços de monitoramento.	52
Tabela 9.1. Tratamento estatístico dos dados de NA medidos automaticamente, com frequência de medição de 15 em 15 minutos.....	53
Tabela 9.2. Tratamento estatístico dos dados de NA medidos manualmente na 2ª etapa, com frequência de medição semanal.....	53
Tabela 9.3. Coeficiente de Correlação de Spearman entre Precipitação e Nível d'água – poços com transdutor de pressão com leituras de 15 em 15 min. e leituras manuais semanais.....	57
Tabela 9.4. Coeficiente de Correlação de Spearman Precipitação e N.A. para dados quinzenais.....	58
Tabela 9.5. Coeficiente de Correlação de Spearman Precipitação e N.A. para dados mensais.	58
Tabela 9.6. Defasagem de tempo (dias) entre a Precipitação e o NA, nos poços, por análise de FCC.....	59
Tabela 9.7. Correlação <i>Spearman</i> entre NA e precipitação com <i>lag</i> em dias para os piezômetros.	62
Tabela 9.8. Correlação <i>Spearman</i> entre NA e precipitação com <i>lag</i> em dias para os poços profundos.....	62
Tabela 9.9. Valores da Função de Autocorrelação (FAC) para piezômetros (PM) e poços profundos (PP), em dias.	63
Tabela 9.10. Valores encontrados de <i>lag</i> (em dias) por meio da Função de Correlação Cruzada (FCC), Spearman e Função de Auto correlação (FAC).	66
Tabela 9.11. Comparação de Δh com a textura dos solos nos piezômetros.	66
Tabela 9.12. Valores de Δh para os poços profundos.	67
Tabela 9.13. Valores das médias anuais de nível estático para os dois momentos de monitoramento - piezômetros.....	68
Tabela 9.14. Valores das médias anuais de nível estático para os dois momentos de monitoramento – poços profundos.	68
Tabela 9.15: Coeficientes de correlação de Spearman (<i>r</i>) entre profundidade Nível d'água e Δh	69
Tabela 9.16. Valores de área e peso dos usos e ocupações do solo para cada piezômetro.	70
Tabela 9.17. Correlação entre os pares de piezômetros e poços de monitoramento.	72

Tabela 9.18. Tempo de início de resposta de deslocamento da água entre os aquíferos, calculado por FCC em dias.....	73
Tabela 9.19. Valores de K obtidos em slug test.....	74
Tabela 9.20. Média dos resultados do teste de bombeamento pela solução de Neuman, com dados do diver e os resultados da empresa Hidropoços.....	74
Tabela 9.21. Valores de teste de bombeamento com dados retirados do <i>diver</i> instalado no P3.	75
Tabela 9.22. Valores de Recarga expressos em mm, calculados pelo método VNA.....	75
Tabela 9.23. Valores de Recarga expressos em mm, calculados pelo método VNA.....	76
Tabela 9.24. Cálculo do volume de água recarregado em cada aquífero.....	77
Tabela 9.25: Valores de pH para os piezômetros no período de monitoramento 2012/2013.	77
Tabela 9.26. Valores de ORP para os piezômetros ao longo do período de monitoramento.	78
Tabela 9.27. Valores de STD para os piezômetros.....	78
Tabela 9.28. Valores de Condutividade Elétrica nos piezômetros.	79
Tabela 9.29: Valores da Temperatura para os piezômetros.....	80

ANÁLISE DA RECARGA E DA CONEXÃO HIDRÁULICA NO SISTEMA AQUÍFERO GRANULAR- FISSURAL NO CAMPUS PAMPULHA DA UFMG -BELO HORIZONTE, MG.

1. INTRODUÇÃO

As características climáticas, geológicas e de ocupação do solo controlam a dinâmica e a quantidade de água que recarrega os aquíferos, portanto tais conhecimentos são imprescindíveis para o gerenciamento do uso sustentável da água subterrânea.

Conceitualmente, recarga é a quantidade de água que se infiltra naturalmente no subsolo a partir de chuvas e corpos de água, ou artificialmente, por meio de atividades humanas (irrigação, perdas nas redes de abastecimento e esgoto, sistemas de tratamento de água e esgoto, etc.) até atingir o aquífero.

Segundo Feitosa & Manoel Filho (2008), a recarga é resultado de uma das partes da infiltração da água no solo. A infiltração, segundo estes autores, é dividida em três partes, a primeira parte é representada pela água que fica retida na zona não saturada, a segunda parte que se aloca nas franjas capilares e que constitui o fluxo subsuperficial e a terceira parte que consegue percolar até o aquífero, a qual constitui a recarga.

De acordo com Wahnfried & Hirata (2005) existem dois tipos de recarga, a direta e a indireta. O primeiro tipo, recarga direta, é quando a precipitação atinge o aquífero, acontecendo obrigatoriamente em partes não confinadas do aquífero. O segundo tipo, recarga indireta, é a infiltração que acontece quando corpos d'água superficiais são influentes, tais como rios e lagos que cedem água para o aquífero, ou a ação antrópica através da irrigação e de perdas nas estruturas de adução. Processos de drenança através de aquitardo para o aquífero confinado também constituem um tipo de recarga indireta.

As áreas disponíveis para ocorrência da recarga direta e indireta são denominadas zonas de recarga, as quais são providas de características geológicas e pedológicas propícias à infiltração. Juntamente com estas características propícias à infiltração está a intensidade das chuvas, o que significa que chuvas muito intensas em solos de pouca permeabilidade resultam em maior escoamento superficial ao passo que chuvas menos intensas não resultam nestes escoamentos superficiais, e, lentamente,

acabam por infiltrar no solo, através da pressão gravitacional, e aumentam a recarga (REBOUÇAS, 2002).

A recarga pode ser estimada por métodos diretos (medidas de variação do nível de água e lisímetro) indiretos (balanço hídrico, análise de curva de recessão, estimativa Darcyniana, traçadores, dentre outros métodos). A obtenção de resultados mais precisos de estimativa da recarga demanda a realização de mais de um método para comparação, em função da complexidade dos mecanismos que regem a recarga aquífera.

Os aquíferos fraturados estão presentes em todas as regiões do Brasil, sendo as maiores presenças no Nordeste, Sudeste e Norte brasileiro, representados por diversos tipos de rochas, entre elas os gnaisses, xistos, filitos, granitos metacalcários e quartzitos pré-cambrianos.

A água nestes aquíferos encontra-se armazenada nas fraturas, tornando a produtividade dos poços nestes terrenos dependente da sua intensidade, abertura e da conectividade. Em geral esse tipo de aquífero tem produtividade inferior à média dos aquíferos sedimentares, mesmo assim, por se encontrarem em regiões carentes de recursos hídricos (como, por exemplo, o nordeste brasileiro) estes aquíferos têm uma função estratégica muito importante para o abastecimento público (ANA, 2007).

Para aquíferos fraturados em regiões de clima úmido uma das principais formas de infiltração e, conseqüentemente, de recarga, é o manto de intemperismo sobrejacente constituído de solo residual ou transportado. Esses depósitos granulares facilitam o armazenamento da água pluvial infiltrada, que é percolada até o aquífero fraturado, configurando, portanto, a recarga indireta (VASCONCELOS, 2005).

A quantificação da recarga indica a quantidade de água que efetivamente atinge o aquífero e o entendimento de seu processo permite identificar os elementos naturais e ou antrópicos atuantes como facilitadores ou como obstáculos à efetivação da infiltração. A proposta deste estudo compreende esses dois campos de investigação aplicados a uma área de 2,5 km², pertencente ao campus Pampulha da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, município de Belo Horizonte/MG.

A área assenta-se sob o Domínio litoestrutural e morfológico do Complexo Belo Horizonte, constituído de rochas gnáissicas e graníticas, com espesso manto de intemperismo. Hidrograficamente contextualizada na bacia do Córrego Engenho Nogueira, canalizado em praticamente todo o seu percurso interno à área.

Neste estudo foi utilizada a rede de poços de monitoramento existente no campus da UFMG (poços profundos e poços de monitoramento) e a estação

meteorológica instalada e operada pela Comissão Nacional de Energia Nuclear/Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CNEN/CDTN) localizada dentro do campus universitário.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do estudo foi a investigação quantitativa da recarga e dos elementos envolvidos no processo de infiltração e recarga do Sistema aquífero granular e fissural na área do campus da Pampulha da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Os objetivos específicos foram:

1. Avaliar o comportamento potenciométrico sazonal dos aquíferos granular e fissural concomitantemente;
2. Investigar a conexão hidráulica entre os aquíferos granular e fissural por meios estatísticos;
3. Estimar a recarga do aquífero granular;
4. Avaliar os fatores físicos que influenciam a infiltração e recarga, quais são: a Precipitação, a Profundidade do nível d'água (NA), Textura do solo, Cobertura do solo.
5. Avaliação da variação sazonal das características físico-químicas.

3. JUSTIFICATIVAS

Nesta data o abastecimento de água para consumo humano da UFMG é quase totalmente feito pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais - COPASA MG, como informado pelo Departamento de Planejamento Físico e Obras (DPFO) da UFMG. Dois poços tubulares estão em operação para uso secundário da água na escola de Veterinária e um poço locado na área do CDTN para seu uso interno.

Desde que foi criado o Campus Pampulha em 1940, com ocupação a partir da década de 1960, seu espaço sempre sofreu transformações manifestas por desmate para construção de novos prédios, verticalizações, novos arruamentos, e aumento do contingente humano, demandando, assim, um maior consumo de água e diminuindo os volumes de recarga natural do sistema aquífero.

A importância desse estudo permeia os aspectos quantitativo e qualitativo da recarga aquífera. No primeiro caso, os valores de recarga, são primordiais para o planejamento de exploração do sistema aquífero. No aspecto qualitativo o estudo

intentou analisar os elementos físicos relevantes para promover a proteção das principais zonas de recarga, garantindo, assim, a alimentação sazonal dos aquíferos, bem como fornecer subsídios para a instalação de empreendimentos futuros que possam ameaçar a qualidade da água subterrânea, ou que acabem por impermeabilizar o solo, comprometendo ainda mais a infiltração.

Um maior conhecimento da hidrogeologia do campus possibilitaria a universidade de ampliar o abastecimento de água para outras finalidades, inclusive para consumo humano, além de subsidiar ações de gerenciamento dos recursos para a proteção quantitativa e contra a poluição dos aquíferos. O uso eficiente da água subterrânea no campus é especialmente importante para manutenção das atividades acadêmicas mesmo durante os eventos de *stress* hídrico.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 ESTUDOS GERAIS SOBRE O TEMA

Healy & Cook (2002) fizeram uma revisão teórica do método de estimativa de recarga pelo meio da variação do nível de água, que consiste em analisar a recarga a partir da variação dos níveis potenciométricos durante um determinado período de tempo. Este estudo mostra o quão simples e de fácil aplicação é este método, mas faz a ressalva para importância da criticidade na escolha dos valores do rendimento específico (S_y) já que este é um parâmetro fundamental para a determinação da recarga por meio da variação de nível d'água. O estudo sistematiza os valores de S_y e os apresenta em uma importante tabela de valores. Tabela esta que foi amplamente usada em outros trabalhos que utilizaram esta metodologia.

Lerner (1990) publicou artigo que trata da recarga de aquíferos em meios urbanos, fazendo as ressalvas quanto à importância que estruturas prediais e estruturas de abastecimento de água e esgoto podem ter na recarga dos aquíferos, tanto positivamente quanto negativamente.

Wanfried & Hirata (2005), realizaram um estudo comparativo entre os seguintes métodos de estimativa de recarga aplicados em uma planície aluvionar localizada em São Paulo: análise de balanço hídrico, variação do nível d'água (VNA) e a estimativa darcyniana. As diferenças entre os valores de recarga entre os métodos, segundo os autores, deveram-se a variação em sua utilização em função do período de tempo usado para os cálculos, podendo-se aplicar esta metodologia em várias escalas temporais. O

VNA resultou em 187 mm, o método do balanço hídrico resultou em 48 mm e a estimativa Darcyniana de 66 mm. Os autores concluíram que a eficácia dos métodos tem relação com tempo em que é feita a análise, para dias, semanas, meses e anos de monitoramento, sendo o método do balanço hídrico mais adequado a períodos superiores a um ano de análise. O método de VNA se encaixa em análises de apenas um evento de chuva até o período de um ano de monitoramento, assim como a estimativa Darcyniana que também pode se aplicar a um evento de chuva. Os autores ressaltam que o rendimento específico (S_y) usado no método de VNA deve ser determinado de forma muito criteriosa, pois influenciam diretamente no resultado final, sendo assim, valores mal escolhidos comprometeriam os resultados.

Bertol (2007) fez a análise da recarga em duas sub-bacias pertencentes ao Ribeirão das Araras, na cidade de Araguari, MG, utilizando o método de VNA. O método de VNA foi aplicado para o período de março de 2005 a fevereiro de 2006, e apresentou resultados consistentes com a literatura, com média de valores de recarga de 27% da precipitação.

Carnier Neto & Kiang (2008), aplicaram o método de variação de nível de água para estimar a recarga no Aquífero Rio Claro, estado de São Paulo. Foram utilizados dois poços de monitoramento construídos no campus da UNESP em Rio Claro. Um deles foi monitorado entre 2001 e 2004, e o outro entre 2003 e 2005, por meio de transdutores de pressão. Os autores fizeram a ressalva de que a recarga obtida, de 53,8 a 63,6 mm, é referente somente à área de estudo onde se localizaram os poços e não ao Aquífero Rio Claro como um todo.

Maziero & Wendland (2008) realizaram estudo determinando a variabilidade espacial da recarga em área urbana, na cidade de São Carlos, estado de São Paulo, compreendendo duas sub-bacias hidrográficas localizadas na região central da cidade. A recarga foi determinada pelo método de variação do nível de água em doze poços de monitoramento, de fevereiro de 2004 a janeiro de 2005. O valor médio obtido foi de 14,7% do total anual da precipitação, contudo esta média foi contestada pelos próprios autores, que apontam para uma grande variabilidade de resultados de um ponto para outro. Os autores concluem que a variabilidade é causada pela heterogeneidade dos solos e influências antropogênicas, como a perda na rede de distribuição e esgoto da cidade.

Pinto *et al.* (2010) fizeram um estudo da recarga na região de Juatuba, a 50 km de Belo Horizonte em Minas Gerais. Nesta área estão compreendidos dois sistemas

aquíferos, um granular e outro fissural. O método utilizado foi o da variação do nível d'água. Para tanto fizeram o monitoramento de 14 poços tubulares e 6 piezômetros ao longo do ano hidrológico de 2008/2009, tendo como resultado uma recarga de 35,2% da precipitação anual.

Maréchal et. al. (2009) calcularam a recarga para aquíferos fraturados em gnaisses e granitos em floresta tropical na Índia. Para a região a média anual de precipitação é de 1120 mm, para a determinação da recarga este estudo usou os métodos de análises de fluxo, variação de nível d'água e geofísica. O estudo determina para o aquífero fraturado um $S_y = 0,015$.

Foram monitorados 13 poços manualmente e automaticamente ao longo de três anos, os mesmos poços foram monitorados manualmente e automaticamente. Os intervalos de monitoramento foram de meia hora de intervalo entre as medidas automatizadas e mensalmente medidos automaticamente. Os resultados deste estudo apontam para a recarga de 30 a 45 mm/ano.

Lee & Lee (2000) aplicaram a função de correlação cruzada e a função de autocorrelação para compreender o comportamento da recarga em aquíferos fraturados em região úmida da Coreia do Sul. Para isso foi feito o monitoramento do nível de água com transdutores de pressão e manualmente, pelo período de três anos (1995 a 1997) utilizando quatro poços profundos e três poços de monitoramento. Os resultados mostraram que os poços de monitoramento responderam de forma mais rápida à precipitação, (média de 27 horas) do que os poços profundos, (média de 52 horas). Esta diferença foi atribuída à espessura do solo (poucos centímetros a até 10 m), quantidade e direção das fraturas, armazenamento e a porosidade, considerados neste trabalho como principais fatores analisados que influenciam na recarga.

4.2 ESTUDOS ANTERIORES

Diversos estudos hidrogeológicos foram realizados na região englobando a área do campus da Cidade Universitária da UFMG. O campus foi também alvo de vários estudos hidrogeológicos específicos.

O primeiro estudo hidrogeológico sistematizado na cidade de Belo Horizonte foi realizado por Silva *et al.* (1995), denominado *Estudo Geológico, Hidrogeológico, Geotécnico e Geoambiental, integrados no município de Belo Horizonte*. O capítulo que trata da hidrogeologia tem especial importância por ser o primeiro estudo

hidrogeológico sistemático realizado em Belo Horizonte, no qual foi realizado um resgate histórico das perfurações dos poços tubulares profundos da cidade. As perfurações começaram na década de 1950 e atingiram seu ápice na década de 1960. Entre a década de 1960 e a década de 1980, o número de perfurações diminuiu, e na década de 1990 o número de perfurações de poços profundos voltou a aumentar.

Um dos principais objetivos deste estudo hidrogeológico foi à sistematização de informações e a concepção de um modelo hidrogeológico físico para o município. Este modelo incorpora dois sistemas aquíferos na cidade de Belo Horizonte: o de maior expressão em área é referente às rochas do Complexo Belo Horizonte, de interesse neste trabalho, e o outro sistema possui as maiores reservas, constituído das rochas metassedimentares do Supergrupo Minas.

O Sistema Aquífero presente nas rochas do Complexo Belo Horizonte, é do tipo livre, constituído de: uma zona superior, formada por rochas inconsistentes do manto de alteração gnáissico-migmatíticas caracterizando o aquífero poroso, e por uma zona inferior, formada por rochas fraturadas, constituindo o aquífero fissural, subjacente ao aquífero poroso. Este pode apresentar tanto características de aquífero livre como de aquífero semiconfinado. O fluxo das águas subterrâneas se mostrou congruente aos fluxos superficiais, tendo o rio das Velhas como nível de base.

No Estudo Hidrogeológico da Bacia da Pampulha, CPRM (2001) definiu o modelo físico hidrogeológico com o objetivo de avaliar impactos ambientais visando a proposição de soluções para a preservação dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais. Resultados deste estudo mostraram que o volume de armazenamento de água subterrânea está entre de 196 e 329 Mi m³, referente ao aquífero poroso, sendo que anualmente são retirados cerca de 1,57 Mi m³.

As águas, do aquífero poroso e fissural quando em seu estado natural, são bicarbonatadas cálcico-sódicas, neutras e pouco mineralizadas. Quando contaminadas, apresentam elevadas concentrações de cloreto, nitrato, são ácidas a levemente ácidas e apresentam maior grau de mineralização.

O estudo da CPRM (2001) concluiu que a vulnerabilidade natural à poluição dos aquíferos da Bacia da Pampulha é baixa a moderada. O referido estudo ainda faz, entre outras, a recomendação de que seja feito um monitoramento dos aquíferos e dos cursos d'água, além de análises mais detalhadas sobre as situações dos aterros da região e de programas de conscientização ambiental, visando à proteção e preservação eficaz dos recursos hídricos.

Os principais usuários da água subterrânea, na cidade de Belo Horizonte, são a indústria e os domicílios. A vazão específica para a captação de água somente das fraturas é considerada baixa, sendo a média de 0,16 m³/h/m, enquanto que nos poços que captam água somente no manto de intemperismo, a média é de 0,36m³/h/m (BEATO *et al.* 2003).

Integrado ao Projeto Hidrogeológico da Bacia do engenho Nogueira (PROHBEN), Carvalho Filho (1997) realizou um estudo que trata da caracterização hidrodinâmica dos aquíferos na área do campus da UFMG e CDTN, tendo como principais resultados um modelo conceitual físico e um modelo numérico de simulação de fluxo subterrâneo em regime estacionário. Este estudo contemplou a estimativa da recarga, realizada por meio do método indireto, o balanço hídrico (Thorthwaite), que resultou entre 22 a 42% da precipitação. O autor fez uma ressalva de que no ano considerado, a precipitação foi 29% mais elevada que a média histórica. O autor expôs as características geológicas, geomorfológicas e hidrológicas e assumiu a existência de dois aquíferos, sendo um formado pelas fraturas das rochas do Complexo Belo Horizonte e outro formado por rochas inconsistentes do manto de intemperismo e por depósitos aluviais e coluviais.

Oliveira (1997) *in* Carvalho Filho (1997) também com base no balanço hídrico, e utilizando o método do *Soil Conservation Service* (SCS) estimou a recarga na bacia toda do córrego Engenho Nogueira em 25% da precipitação anual.

Raposo (1997) *in* Carvalho Filho (1997), a partir de métodos de ensaios com trítio em solos residuais e de alteração de gnaisses do Complexo Belo Horizonte, na região do Aterro de São Eduardo, localizado na divisa entre Belo Horizonte e Santa Luzia, estimou a recarga de 30% da precipitação anual.

Marra (2000) realizou um estudo que trata da qualidade da água subterrânea no campus da UFMG, também integrado ao projeto PROHBEN. O trabalho consistiu no monitoramento das águas dos poços instalados na UFMG e no CDTN, no período de fevereiro a novembro de 1997, para determinação de: pH, condutividade elétrica, fosfatos, nitratos, óleos e graxas e radiológicos. Os resultados foram comparados com padrões ambientais de potabilidade, a fim de determinar se a água do sistema aquífero existente na área de estudo é de boa qualidade para o consumo humano. Entre os resultados obtidos destaca-se que os poços, próximos ao trecho não canalizado do córrego engenho Nogueira, tem seus parâmetros físico-químicos diretamente influenciados pelo regime pluviométrico, enquanto nos demais poços esta variação é

menos nítida, ou acontece de forma mais lenta. As águas contaminadas do córrego Engenho Nogueira influenciam diretamente na qualidade das águas subterrâneas, fato observado nos poços próximos ao mesmo córrego. Os parâmetros alterados encontrados nestes poços foram os teores de óleos e graxas e Fe solúvel. A autora do referido trabalho classifica as águas subterrâneas como bicarbonatadas cátion-indiferenciada, não fazendo diferenciação das águas captadas do aquífero granular ou do fissural.

Costa (2002) realizou estudo caracterizando as condições de uso e preservação das águas subterrâneas de Belo Horizonte, tendo realizado um estudo de vulnerabilidade à poluição dos aquíferos pelo método DRASTIC às principais cargas contaminantes encontradas na cidade. O estudo apontou vulnerabilidade à contaminação média a alta para a cidade de Belo Horizonte, sendo que no centro da cidade a vulnerabilidade a contaminação é extrema. Na região norte da cidade de Belo Horizonte, na área que compreende este estudo a vulnerabilidade do aquífero é média alta e extrema média.

As principais cargas contaminantes na cidade provêm de postos de gasolina, seguidos pela indústria, depósitos de resíduos sólidos, cemitérios e áreas não atendidas pela rede de esgoto.

5. LOCALIZAÇÃO

O estudo foi realizado no campus universitário da UFMG localizado na bacia hidrográfica da Pampulha, região norte da cidade de Belo Horizonte (Fig. 5.1). A área do campus comporta parte das sub-bacias dos Córregos Engenho Nogueira (Fig. 5.2) e Mergulhão, entretanto, somente a porção média da sub-bacia do Córrego Engenho Nogueira, foi alvo desse estudo.

A área está dentro das coordenadas UTM 607.200 e 609.600 Oeste, e 7.800.800 e 7.804.000 Sul, onde se encontram ainda as estruturas do Colégio Militar, o Estádio Magalhães Pinto e o CDTN (Fig. 5.3).

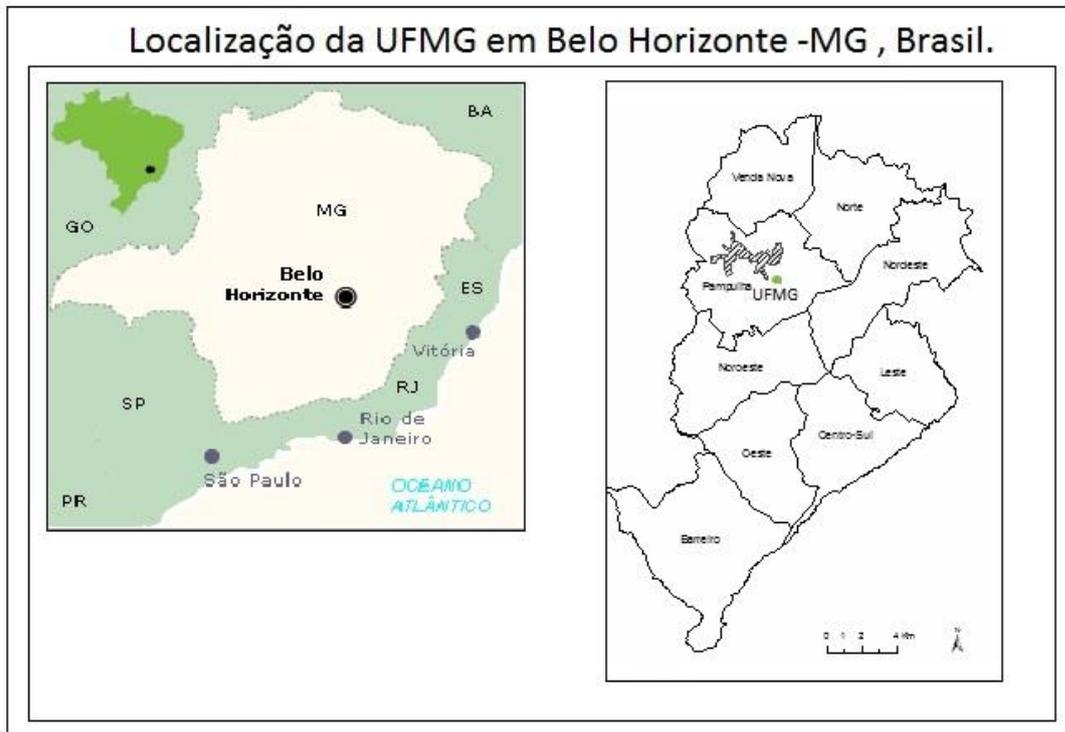


Figura 5.1: Localização do município de Belo Horizonte no Estado de Minas Gerais, e do campus da UFMG na cidade de Belo Horizonte.

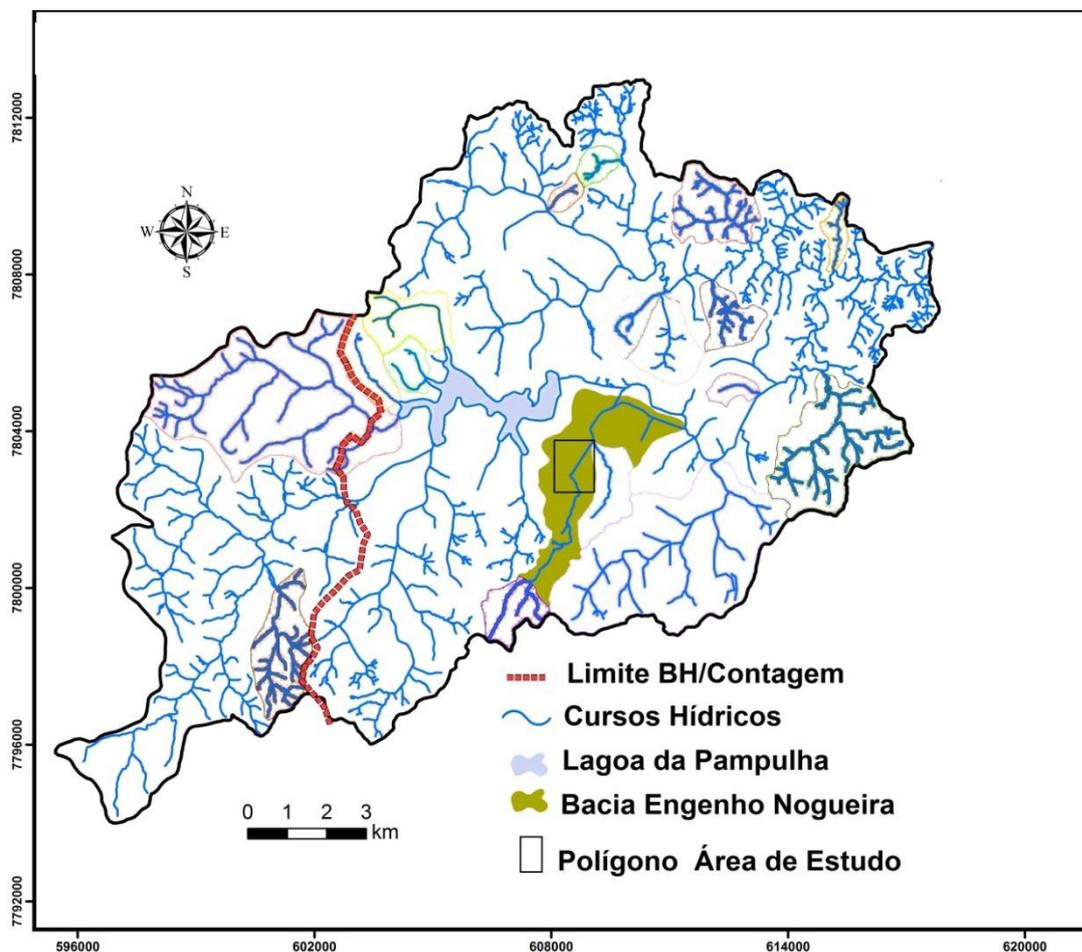


Figura 5.2: Localização do campus da UFMG em Belo Horizonte. Fonte: Projeto Manuelzão

O campus da UFMG em Belo Horizonte ocupa uma área de 3.340.000 m², dos quais 430.867 m² são de área construída, de acordo com dados do Departamento de Planejamento Físico e Projetos (DPFO), atualizados em 2013. A extensão total da área deste estudo é de 2.500.000 m².

De acordo com a reitoria da UFMG o campus Pampulha é frequentado por 30.254 alunos, 2.267 professores e 4.323 funcionários. O abastecimento hídrico do campus é feito, principalmente, pela empresa de abastecimento público de Minas Gerais – COPASA, salvo as instalações do Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear que é abastecido por um poço tubular profundo instalado em suas dependências e dois poços do campus para abastecimento da escola de Veterinária.



Figura 5.3: Imagem do Campus da UFMG, com destaque para as avenidas e pontos de referência no seu entorno. Fonte: Google Earth, 2013.

6. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA BACIA DA REGIÃO DE ESTUDO

6.1 CONTEXTOS GEOLÓGICO E GEOTECTÔNICO

O município de Belo Horizonte insere-se na grande unidade geotectônica conhecida como Cráton do São Francisco, referente ao extenso núcleo crustal do centro-leste do Brasil. Predominam as rochas arqueanas do Complexo Belo Horizonte e sequências supracrustais do período Paleoproterozóico (COSTA, 2002).

O domínio do Complexo Belo Horizonte integra a unidade geomorfológica denominada Depressão de Belo Horizonte, que representa cerca de 70% do território da capital mineira, contexto em que se encontra a área de estudo. A porção restante está sobre outras três unidades: Grupos Sabará, Piracicaba e Itabira (COSTA, 2002).

O complexo Belo Horizonte é formado por rochas gnáissicas e migmatíticas parcialmente miloninizadas. Estas rochas apresentam a característica de suas fraturas serem abertas e penetrativas, mas, distantes umas das outras, resultando em pouca intercomunicação entre elas, comprometendo a capacidade específica (COSTA, 2002).

O Complexo Belo Horizonte teria passado por retrabalhamentos ao longo do evento Transamazônico, resultando em duas manifestações. A primeira manifestação resultou em zonas de cisalhamento com foliação milonítica, falhamentos com direção preferencial N10°-30°W e N50°-70°E, e mergulho de alto ângulo. A segunda manifestação se sobrepõe a primeira e engloba as zonas de cisalhamento dúctil-rúptil na direção NE-SW (CPRM, 2001).

A reativação destas zonas de cisalhamento, no início do Brasiliano, se manifestou como falhas normais no regime rúptil, e foram seguidas pelo soerguimento da pluma mantélica e o abatimento do Complexo Belo Horizonte, do que resultou em novas falhas normais ao longo de zonas de cisalhamento transcorrentes pré-existentes ao Brasiliano (CPRM, 2001).

As fraturas do Complexo Belo Horizonte possuem mergulhos verticais a subverticais e paredes lisas. As fraturas têm direções com predominância de direção NE-SW e NW-SE (Fig. 6.1), sendo as fraturas NE-SW abertas, confirmadas pela presença de diques clásticos, e as fraturas NW-SE, por sua vez, são preenchidas pelos diques máficos de segunda geração, detectados com base em fotografias aéreas (CPRM 2001).

Carvalho Filho (1997) e Silva *et al.* (1995) identificaram por meio de fotointerpretação a existência de três fotolineamentos no campus, sendo o primeiro de

direção sudoeste-nordeste, correspondente a um veio de quartzo, próximo à estação meteorológica do CDTN; o segundo na porção sul do campus, próximo ao Colégio Técnico (Coltec) de direção N-S; e o terceiro na porção norte do campus, possui direção SW-NE. Estima-se que estes fotolineamentos são correspondentes a antigos planos ou zonas de fraqueza estrutural das rochas do Complexo Belo Horizonte, ocorrendo no canal ou na várzea do córrego Engenho Nogueira. Na porção referente ao campus o córrego apresenta retilinearidade na direção norte-sul, concordante com o segundo fotolineamento, apontando para evidências do controle estrutural da drenagem (CARVALHO FILHO, 1997).

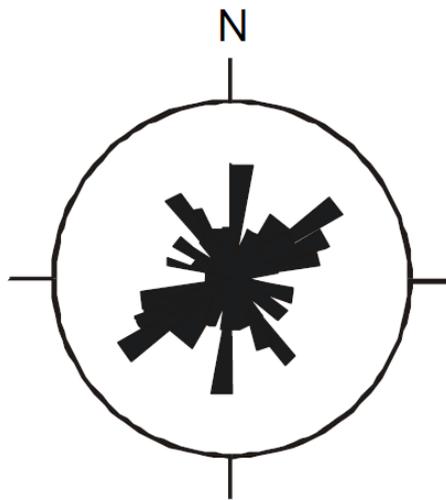


Figura 6.1: Roseta de direção das fraturas na bacia da Pampulha. Fonte CPRM (2001).

Carvalho Filho (1997) identificou na área do campus da UFMG uma lente de argila que, de acordo com o perfil geológico, atravessa os poços P10 e P9 (Fig. 6.2). Esta lente de argila está localizada próxima à entrada da universidade pela Avenida Antônio Carlos (Fig. 5.3), na porção norte da área de estudos, e pode servir como barreira hidráulica configurando aquíferos suspensos nesta porção.

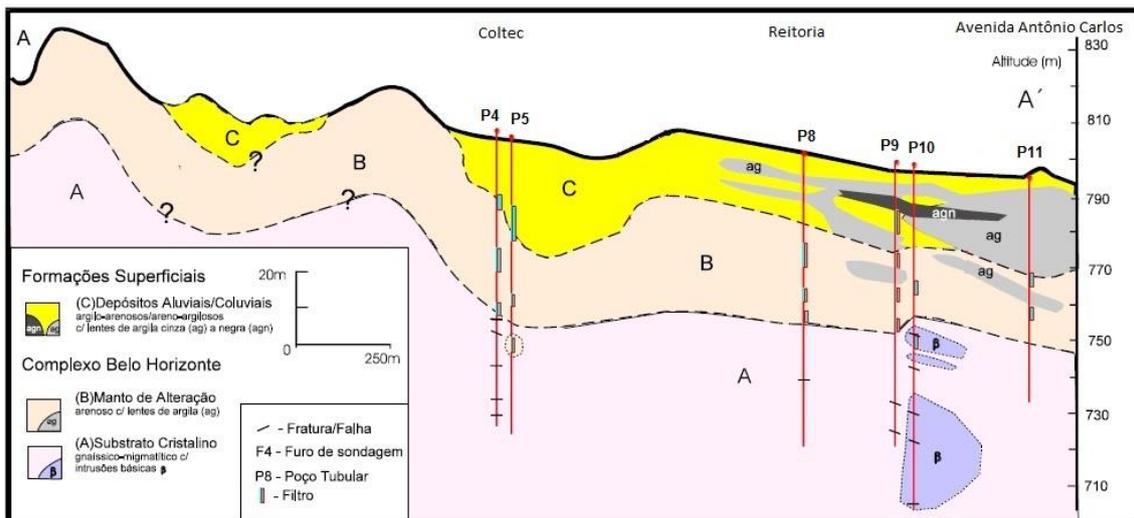


Figura 6.2: Perfil Geológico da área. Fonte: Carvalho Filho, 1997, adaptado.

6.2 ASPECTOS FÍSICO- CLIMÁTICOS

A bacia hidrográfica da Pampulha engloba partes dos municípios de Belo Horizonte e Contagem, por estendendo-se por 97,91 km². Em 1999 a bacia apresentava uma taxa de impermeabilidade urbana de 62,77%. É neste contexto hídrico que se insere a sub-bacia do Córrego Engenho Nogueira, que possui uma extensão de 10 km² (VACCARO *et al.*, 2009).

Na área de estudo, o Córrego Engenho Nogueira (CEN) encontra-se canalizado na maior parte do campus. A canalização compreende o trecho entre o Coltec, na porção sul da área de estudo, até a entrada principal da UFMG pela Avenida Antônio Carlos, na porção norte da área de estudo. No trecho entre o Coltec até o anel rodoviário, que fica fora da área de estudo, o córrego Engenho Nogueira, encontra-se sem canalização. Em 2010 o Programa de Recuperação Ambiental e Saneamento dos Fundos de Vale e Córregos em Leito Natural de Belo Horizonte (Drenurbs) da Prefeitura de Belo Horizonte criou, como forma de contenção às enchentes no campus, uma bacia de contenção localizada à montante do córrego Engenho Nogueira ao sul da área de estudo (Prefeitura de Belo Horizonte, 2013. Na porção norte da área de estudo o córrego Engenho Nogueira descarrega suas águas no córrego São Francisco, localizado na rua Assis Chagas, paralela a avenida Antônio Carlos.

O clima da região de estudo, segundo a classificação de Köppen, é Cwa, isto é, tropical de altitude com inverno seco e verão chuvoso. A temperatura média anual é de 21,5°C, a precipitação média de 1.479,5mm e a evapotranspiração potencial (ET₀)

calculada pelo método de Penman é de 1.404,8mm, referentes ao período de monitoramento de 1997 a 2000 (BEATO *et al.* 2003). O período de deficiência hídrica se estende de maio a outubro, com maiores *déficits* em agosto, e a partir de novembro se inicia o período chuvoso, com excedente hídrico de dezembro a março, este de 234 mm a 477 mm, calculado por Beato *et al.* (2003) para os anos de 1997 a 2000.

Carvalho Filho (1997) calculou a evapotranspiração real (ETR) para a região do campus da UFMG, pelo método de Thornthwaite, obtendo 1083,3mm no ano de 1996, bem próximo do calculado por Beato *et al.* (2003).

A unidade geomorfológica em questão faz parte da chamada Depressão Belo Horizonte, caracterizada pelo predomínio de relevo pouco declivoso, com drenagem pouco encaixada. As declividades moderadas se encontram associadas a morros nos bairros Engenho Nogueira e Alípio de Melo. A principal característica do relevo são as colinas de topo plano a arqueado (CPRM, 2001).

O relevo onde está compreendido o campus da UFMG pode ser dividido em duas unidades fisiográficas, sendo uma referente ao conjunto de colinas subdivididas em vertente e topo, localizadas a oeste e a leste da várzea do córrego Engenho Nogueira (CEN); e a outra referente à várzea do CEN, sendo que o córrego cruza o campus na direção sul-norte (CARVALHO FILHO, 1997).

6.3 HIDROGEOLOGIA

A maior parte da capital mineira, incluindo a área objeto desse estudo, assenta-se sobre o chamado Sistema Aquífero Fraturado, constituído de rocha sã (granitos, gnaisses, migmatitos e milonitos) sotoposta ao manto de intemperismo, que constitui um aquífero granular.

Enquanto o aquífero granular superior é sempre livre, o aquífero fraturado pode se apresentar livre a semiconfinado, heterogêneo e anisotrópico. Independentemente da rocha formadora e da natureza do solo que o recobre, o aquífero fraturado está intercomunicado com o aquífero granular que o sobrepõe (COSTA, 2002). Assim, a recarga do aquífero fraturado ocorre, majoritariamente, pela infiltração de águas pluviais através das coberturas detríticas, isto é, através dos aquíferos granulares.

As fraturas, do Aquífero Fissural na região da bacia da Pampulha, têm direções predominantes NW e N (Fig. 5.3). E, sendo que as fraturas com direção NE são mais favoráveis à circulação de águas subterrâneas se comparadas às fraturas com direção NW. Isso por que, as fraturas de direção NW são preenchidas com diques básicos

possuindo menor condutividade. Sendo assim, poços abertos nas fraturas de direção NE teriam maior potencial de vazão do que em fraturas NW (BEATO *et al.*, 2003).

A baixa capacidade de produção é atestada pelos baixos valores de capacidade específica, média de $0,16\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ nos poços que captam água exclusivamente das fraturas (CPRM, 2001). A interpretação de testes de bombeamento feitos na área de estudo por Carvalho Filho (1997) resultou em valores de transmissividade entre 5,4 e $28,0\text{ m}^2/\text{dia}$.

O manto de intemperismo possui espessuras muito variáveis, desde poucos metros, alcançando, excepcionalmente 100 metros na bacia da Pampulha (BEATO *et al.*, 2003).

O aquífero granular, presente na bacia da Pampulha, é livre a semi-confinado (CPRM, 2001), ocorrendo em sedimentos colúvio-aluvionares, em solo residual ou elúvio do substrato rochoso, com predominância de areias e argilas. Os sedimentos colúvio-aluvionares localizam-se ao longo de cursos d'água e tem média de espessura de 10 metros, o solo residual é formado por materiais que variam de argilo-arenoso nos horizontes superficiais a silto-arenoso no subsolo. Os fluxos subterrâneos acompanham o modelado do relevo, com zonas de recarga localizadas em áreas mais elevadas e aflorando em nascentes e ao longo de drenagens de rios.

O meio granular possui baixa capacidade específica, média de $0,23\text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, transmissividade de 0,74 a $35,74\text{ m}^2/\text{dia}$ (mediana: $7,62\text{ m}^2/\text{dia}$), valores esses obtidos para toda a bacia da Pampulha por CPRM (2001).

Na área de estudo existiam, em 1997, 9 poços de monitoramento no Aquífero Granular, e 9 poços profundos atravessando o Aquífero Fissural na bacia do CEN. Entre os poços profundos, 4 possuem dados de entradas de água através de fraturas e filtros, 4 com entradas de água somente por fraturas e 1 poço não tem descrição de entradas de água. A profundidade média, dos poços profundos, é de 85 m, com máxima de 100 m e a mínima de 60 m. A vazão média encontrada em 1996 nestes poços foi de $11,41\text{ m}^3/\text{h}$, máxima $24,02\text{ m}^3/\text{h}$ e mínima de $2,52\text{ m}^3/\text{h}$ (CARVALHO FILHO, 1997).

Nos poços de monitoramento, em 1996, a profundidade média do revestimento era de 9,55 m e do nível estático de 4,93 m a partir da cota do terreno.

Em 2012 haviam 7 (sete) poços profundos pertencentes ao campus da UFMG, uma vez que, dentre os nove que existiam em 1997, um foi obstruído para a construção de um viaduto e outro está localizado na bacia do Mergulhão. Foram encontrados cinco

poços de monitoramento, sendo um deles totalmente seco. A profundidade dos sete poços tubulares é de 100 a 80 m e dos quatro poços de monitoramento de 12 a 7 m.

Em função da construção dos prédios que compõe a universidade os solos da área de estudo foram muito revolvidos, com isso uma análise do tipo de solos não seria eficaz para identificar possíveis características do meio que interferissem na recarga do aquífero.

A Figura 6.3 mostra a distribuição espacial das coberturas de acordo com o material de origem, aluvião, colúvio e solo residual jovem.

As menores variações de nível incidiram nos substratos mais argilosos (aluvião) onde estão localizados os piezômetros PM3, PM4 e PM8. Observa-se que embora o PM7 esteja situado em aluvião, ele possui uma elevada variação do NA. Este fato deve-se a presença de espessa lente de argila na porção basal do PM7, retardando o escoamento vertical da água.

As maiores variações incidiram sobre os solos residuais jovens, PM6 e PM9, e possivelmente o PM2 que está situado numa área de transição entre solo residual jovem e colúvio. Destaca-se que, além da textura do solo ser mais arenosa, essas áreas são também extensamente cobertas pela vegetação natural, facilitadora da infiltração.

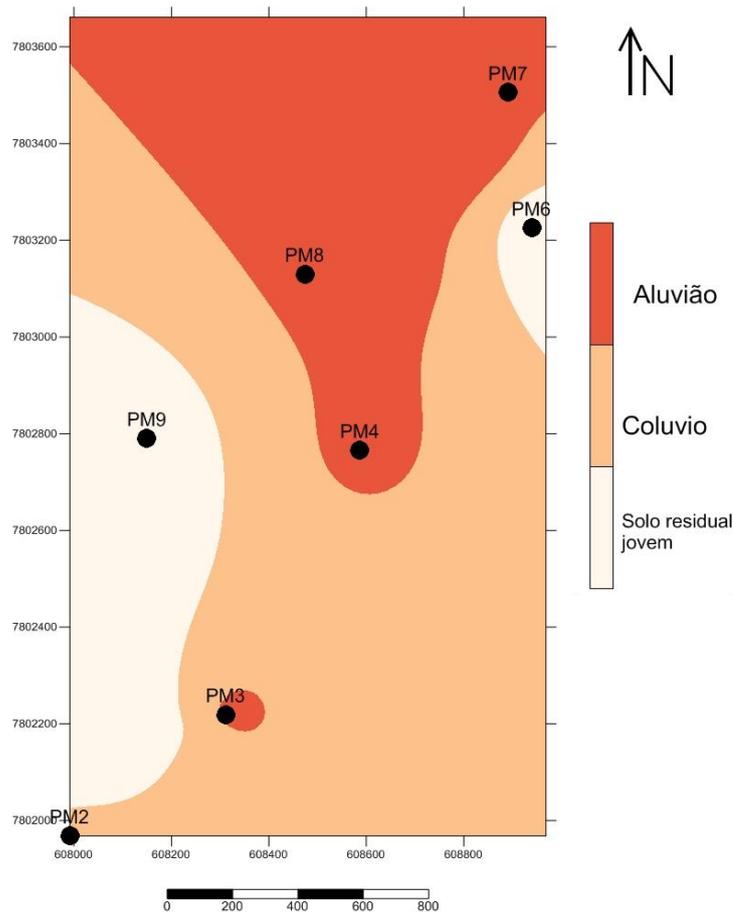


Figura 6.3: Mapa de características do solo

7. MATERIAIS E MÉTODOS

O termo piezômetro foi aqui informalmente utilizado para designar, no sentido *lato sensu*, os poços de monitoramento no aquífero poroso.

O trabalho foi organizado em duas etapas distintas que se complementaram para a compreensão da recarga e da conexão hidráulica entre os aquíferos. A primeira etapa consistiu de um estudo preliminar utilizando dados do monitoramento manual do nível estático dos poços na área foco realizado no âmbito do Projeto Hidrológico da bacia do Engenho Nogueira (PROHBEN) e pelo Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CDTN), no período de 1995 a 2000.

Nesta etapa foram estatisticamente avaliados os fatores físicos potenciais que influenciam na infiltração e recarga, o valor da recarga e a conexão hidráulica entre os aquíferos, poroso e fissural. Tal estudo teve como finalidade embasar o planejamento do estudo subsequente que foi realizado com monitoramento automatizado, utilizando transdutores de pressão, e também manualmente, a fim de se obter uma maior precisão nos resultados.

As variáveis dos piezômetros e poços profundos utilizados na primeira etapa consistiram de: variação do nível d'água, localização, perfis construtivos e cota do terreno.

Primeiramente foi feito um mapeamento dos dados da frequência do monitoramento feito pelo PROHBEN. Com esse mapeamento foi possível delimitar qual o período continha maior regularidade de medidas e maior número de dados, pois as medidas não foram rigorosamente realizadas na frequência semanal programada. Assim, estabeleceram-se três anos hidrológicos a serem trabalhados, compreendidos entre setembro de 1997 até agosto de 2000.

Ainda para esta primeira etapa, as medidas de precipitação foram também cedidas do PROHBEN pelo CDTN, originadas da Estação meteorológica do CDTN. Notou-se que o ano hidrológico de 1998/1999 foi atípico em relação à quantidade de chuva. Para confirmar essa baixa precipitação foram solicitados dados de precipitação da estação meteorológica instalada próxima à área de estudo, a estação do Aeroporto Carlos Drummond de Andrade (Aeroporto da Pampulha). De fato, os dados atestaram a anomalia, 29% menor que os outros dois anos hidrológicos analisados.

Para a segunda etapa (agosto de 2012 a maio de 2013) os dados de precipitação foram igualmente obtidos junto ao CDTN.

7.1 INVENTÁRIO DOS PONTOS D'ÁGUA

Foi feita uma sistematização das informações adquiridas junto ao CDTN dos 13 poços profundos (Tab 7.1) e dos 9 piezômetros (Tab. 7.2) existentes até 1995 e 1997, respectivamente (Fig. 7.1). Para a primeira etapa do trabalho, foram utilizados os dados construtivos de todos os poços cadastrados (Fig. 7.1), e para a segunda etapa foram utilizados os dados somente de poços e piezômetros identificados em campo.

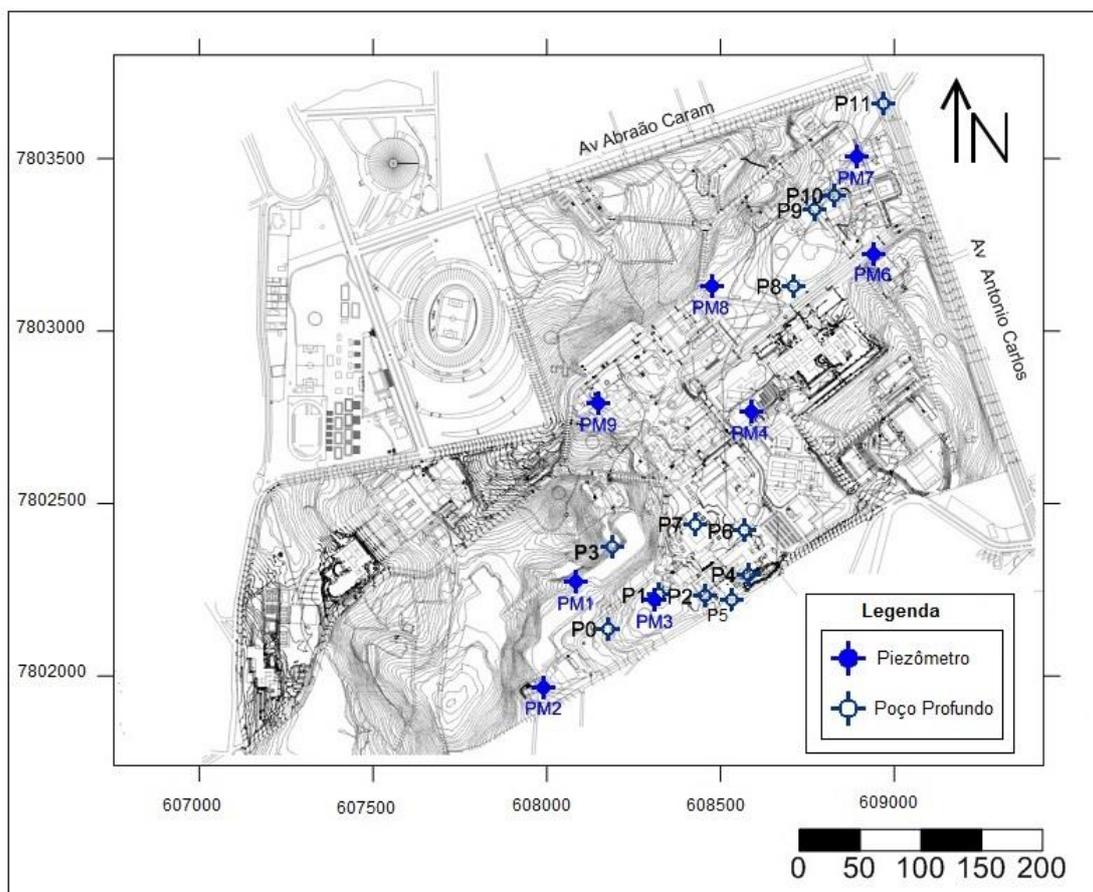


Figura 7.1: Planta do campus da UFMG com todos os poços e piezômetros cadastrados.

Todos os poços profundos têm revestimento e filtros em aço galvanizado, com diâmetro de 6". Os filtros são do tipo espiralado com abertura de 0,75mm, salvo em dois poços (P4 e P9), em que se utilizaram filtros *Nold* galvanizados com abertura de 0,75mm. A vazão média dos poços profundos é de 11,4m³/h.

Os poços profundos foram classificados de acordo com a origem da entrada de água em: “fraturado” (entrada exclusiva das rochas) e “misto” (entradas do meio granular e da rocha) - Tabela 7.1. No caso de poço com entradas de água do meio granular e rochoso, e cujo nível de água dinâmico se posicionasse abaixo do filtro da porção granular foi também classificado como “fraturado”.

Os poços profundos fraturados foram ainda classificados de acordo com a pressão da água em: livre e semiconfinado. Foram considerados poços semiconfinados quando o nível estático se encontrava acima da base do aquífero granular (Tab.7.1). Todos os poços mistos foram admitidos como sendo do tipo livre, indicando existência de conexão hidráulica entre ambos os aquíferos.

Tabela 7.1: Características dos poços profundos quanto à pressão da água.

Poço	Porosidade	Pressão
P0*	Sem dados	
P1 (Casa de com. de bomba)	Sem dados	
P2 (Bambuzal)*	Sem dados	
P3 (CDTN)	Fraturado	Semiconfinado
P4 (Coltec)	Misto	Livre
P5 (Setor 1. Coltec)	Misto	Livre
P6*	Sem dados	
P7*	Sem dados	
P8 (Belas Artes 1)	Fraturado	Livre
P9 (Belas Artes 2)	Misto	Livre
P10 (Setor 1B .Belas Artes)	Fraturado	Semiconfinado
P11 (Setor 1B. Belas Artes)	Fraturado	Semiconfinado
P12 (Educação Física)**	Fraturado	Semiconfinado

*não localizados em campo

* não pertence à bacia do CEN.

Os piezômetros possuem diâmetro do revestimento de 4 polegadas e profundidade média de 9,5 m. Os piezômetros foram caracterizados de acordo com predominância de areias ou argilas (Tab. 7.2). Esta determinação do percentual dos termos texturais da zona não saturada foi feita com base nas descrições litológicas presentes nos relatórios de campo de instalação dos piezômetros e dos poços profundos. Somou-se o total da espessura de cada tipo textural – areia, argila, silte, e determinou-se o percentual da soma de cada um destes termos texturais em relação ao total da profundidade do piezômetro.

Não foi levada em consideração a profundidade em que ocorriam as texturas, contudo estes dados percentuais foram úteis na identificação dos locais com maior expectativa de grandes infiltrações.

O mesmo critério foi adotado para analisar as características texturais da zona não saturada nos poços profundos (Tab.7.3).

Tabela 7.2: Profundidade dos piezômetros e textura do solo.

Identificação do Piezômetro	Profundidade (m)	Constituição litológica (%)	Coordenadas	
			Norte	Leste
PM1 (CDTN)	12	50- silte arenoso a areia 50- solo residual com estruturas da rocha de origem	7802271,79	608085,58
PM2 (Centro de microscopia)	10,5	32- Argila siltosa 37- Silte arenoso a areia 31- Solo residual com estruturas da rocha	7801967,96	607991,36
PM3 (Reator)	7,5	11- argila siltosa 55- areia argilosa 44- areia argilosa	7802219,08	608311,9
PM4 (IGC)	10,2	39- argila siltosa 11- argila siltosa 17- argila pouco arenosa 33- silte arenoso	7802765,57	608587,24
PM5 (Rampa do Col. Pedagógico)	7,8	50- solo residual jovem 50- silte arenoso		
PM6 (Creche)	14,8	50- silte arenoso 50- silte rosa	7803225,06	608939,32
PM7 (DPFO)	6	43- silte arenoso 57- argila siltosa	7803505,54	608891,78
PM8 (Reitoria)	8	39- silte argiloso 11- argila orgânica 16- argila preta 34- silte arenoso	7803129,77	608474,15
PM9 (ICB)	9,2	11- argila siltosa 35- silte arenoso 54- silte residual	7802790	608150,00

Tabela 7.3: Profundidade dos poços profundos e textura da zona granular.

Poço	Constituição Litológica (%)	Profundidade total (m)	Coordenadas	
			Norte	Leste
P1 (Casa de com. de bombas)	20,0 – argilas 80,0 - rocha fraturada	80	7802195	608275
P2 (Bambuzal)	Sem descrição		7802232,4	608454,21
P3(CDTN)	20,00 - argilas 80,00 - rocha fraturada	80	7802250	6008079

P4 (Coltec)	37,5 – argilas 62,5 – rocha fraturada	80	7802295	608579,71
P5 (Coltec)	2,5 – argilas 22,5 – areias 12,5 – material constituído por quartzo e feldspato 62,5 – rocha fraturada	80	7802319,7	608608,68
P8 (Reitoria)	12,5-argilas 17,5 - areias 70,0 - rocha fraturada	80	7803130,2	608710,02
P9 (Belas Artes)	30,0 - argilas 10,0 - areias 60,0 - rocha fraturada	80	7803350,6	608769,51
P10 (Belas Artes)	12,0 - argilas 2,0 - areias 86,0 - rocha fraturada	100	7803394,3	608828,76
P11 (Belas Artes)	43,33 - argilas 6,66 - areias 50,4 - rocha fraturada	60	7803661,2	608968,74
P12 (Educação Física)*	2,0 - argilas 16,0 - areias 82,0 - rocha fraturada	100		

* não pertence à bacia do CEN.

7.2. MONITORAMENTO DO NÍVEL ESTÁTICO

Na primeira etapa do trabalho, a malha de poços utilizada do monitoramento do PROBHEN (1995 a 2000) foi definida eliminando-se os poços profundos que estavam em operação naquele período monitorado (P3, P4 e P5), bem como os piezômetros que estivessem sob a influência desses poços (PM1 junto ao poço profundo P3).

Visando identificar a conexão hidráulica entre aquíferos poroso e fraturado, os critérios considerados para a escolha dos pontos para o monitoramento automatizado foram: a) a máxima proximidade entre um piezômetro e um poço profundo, de modo que o piezômetro pudesse descrever a sazonalidade do nível de água do aquífero granular sobreposto ao aquífero fissural representado pelo poço profundo; b) poços profundos com entradas de água exclusivamente por fratura; c) piezômetro e poço profundo distante de poços em operação para evitar interferência do bombeamento no nível d'água. Desse modo, foram selecionados 2 pares de poços profundos e

piezômetros próximos entre si dois a dois e que atendiam a todas essas condições: P8/PM8 e P10/PM6 (Fig.7.2).

Um terceiro par de poços do CDTN (P3/PM1) foi selecionado ainda que o P3 estivesse em funcionamento, visando apenas a determinação de parâmetros hidráulicos do aquífero.

O monitoramento automatizado foi realizado com transdutores de pressão (*divers*) da marca Schlumberger, e correção da compensação barométrica a partir de um *baro diver* instalado na parte externa em um dos poços que possui proteção por tampo. A frequência das leituras foi de 15 em 15 minutos.

Seguem as características dos pares de poços selecionados e de sua localização (Fig. 7.2):

P3 - PM1 – área de recarga do sistema aquífero, dentro da área do CDTN. O P3 encontrava-se em operação, permitindo a obtenção de parâmetros hidráulicos do aquífero (T, S_y e K);

P8 - PM8 – localizados em posição intermediária entre as áreas de recarga e descarga do sistema aquífero, próximos ao prédio da reitoria.

P10 – PM6 – localizados na área de descarga local do sistema aquífero, na porção norte da área de estudo.

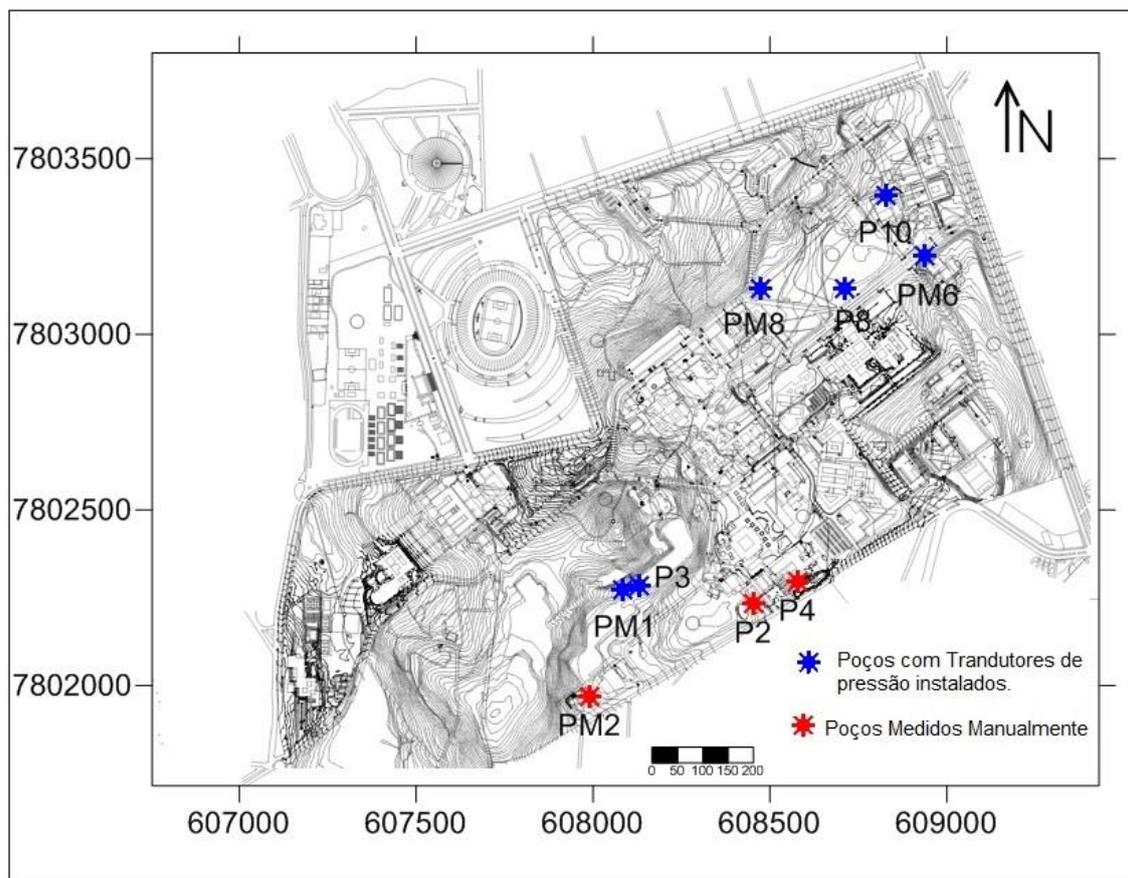


Figura 7.2: Localização dos pontos d'água monitorados em 2012/2013.

As profundidades de instalação dos *divers* foram determinadas a partir da análise de variação do nível de água do monitoramento realizado pelo PROHBEN de 1995 a 2000. Nos poços profundos essas profundidades foram determinadas em 5 m mais profundos do que o nível dinâmico relatado nos documentos dos testes de bombeamento à época da perfuração (Tab. 7.4). E nos piezômetros essas profundidades foram de poucos metros maiores do que a profundidade máxima (Tab. 7.5).

Tabela 7.4: Características dos poços profundos para o posicionamento dos *divers* para o monitoramento automatizado

Poços	Prof. Revestimento (m)	Prof. Max. N.A. (m)	Tipo Porosidade/Pressão	Operação	Prof. Instalação <i>divers</i> (m)
P10	47	30	Fraturado/Semi-conf.	Parado	35
P3	37	30	Fraturado/ Semi- conf.	Ativo	35
P8	33,8	34	Fraturado/Livre	Parado	39

Tabela 7.5: Características dos poços de monitoramento para o posicionamento dos divers.

Poço de monitoramento	Profund. revestimento (m)	Prof. máx. N.A. (m)	Prof. mín. N.A. (m)	Prof. Instalação divers
PM6	6	5,43	0,04	7
PM1	12	7,57	0,89	10
PM8	8	6,62	3,69	8

Do ponto de vista operacional, para que os *divers* fossem fixados dentro dos poços e dos piezômetros, os mesmos foram pendurados por cabos de aço, os quais foram fixados em um gancho rosqueado na tampa do poço e preso por cliques próprios. Este gancho consiste de uma rosca com argola que é instalada na parte central da tampa do poço (Fig. 7.3 e 7.4). Nos *divers* os cabos de aço também são presos por cliques.

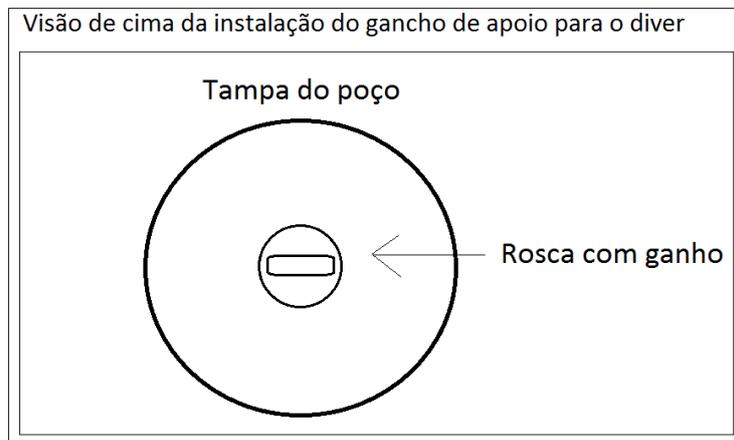


Figura 7.3: Esquema de instalação da rosca na tampa do poço.

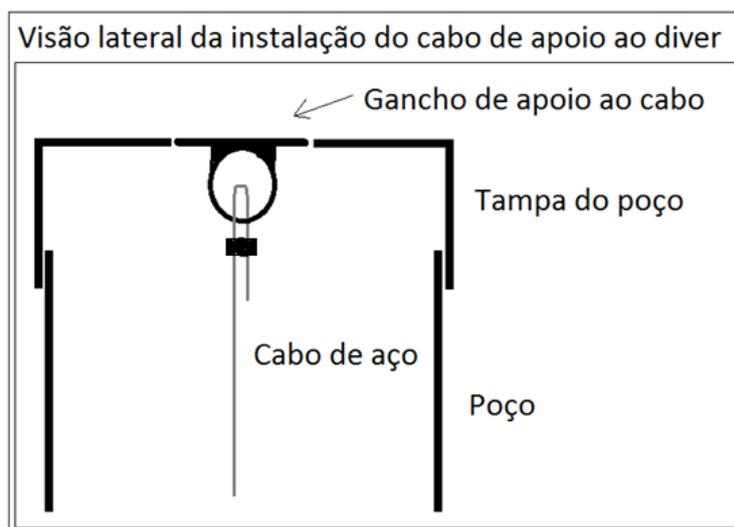


Figura 7.4: Esquema de instalação dos *divers* nos poços.

Na segunda etapa o monitoramento manual foi feito semanalmente em dois poços profundos paralisados (P4 e P2) e em um piezômetro (PM2). Todos localizados na porção sul da área de estudo (Fig. 7.2). Utilizou-se um medidor de nível d'água com sensor elétrico-sonoro.

O monitoramento iniciou-se no final do período de estiagem (17/08/2012) e prolongou-se até 01/05/2013, de modo a se identificar o início e o término das ocorrências dos principais eventos de infiltração.

7.3 TESTES DE PERMEABILIDADE DO AQUÍFERO POROSO

A condutividade hidráulica (K) é a propriedade que define a capacidade de drenagem da água no meio (HIRATA, 2011), ou ainda a facilidade do meio em exercer a função de um condutor hidráulico (FEITOSA *et al.* 2008). Esta propriedade auxilia na identificação da capacidade de percolação do meio. Assim, os ensaios de *slug test* auxiliaram na avaliação espacial das características hidráulicas do aquífero granular.

A condutividade hidráulica (K) do aquífero granular foi determinada em todos os o piezômetros monitorados manual ou automaticamente na segunda etapa.

Utilizou-se o método de ensaio *slug test* (Figura 7.5) pela técnica de injeção de água, a qual foi simulada por meio da introdução de um tarugo de volume conhecido no poço fazendo-se elevar o nível de água. O nível d'água foi medido antes e imediatamente após a perturbação causada, seguindo-se medidas sistemáticas do nível de água durante o seu retorno ao nível natural, mantendo-se o tarugo inserido. Para determinar o K utilizou-se a equação do método Hvorslev (*apud* HIRATA, 2011):

$$K = \frac{r^2 \ln\left(\frac{L}{R}\right)}{2LT_0} \quad (\text{Equação 7.1})$$

Onde:

L: comprimento do filtro - cm

R: raio do furo - cm

r: raio do revestimento - cm

T₀: é o tempo onde h/h₀ = 0.037

h: diferença de cota do nível de água medido durante o ensaio e do NA natural - cm

h₀: diferença de cota do nível de água natural e logo após a perturbação - cm

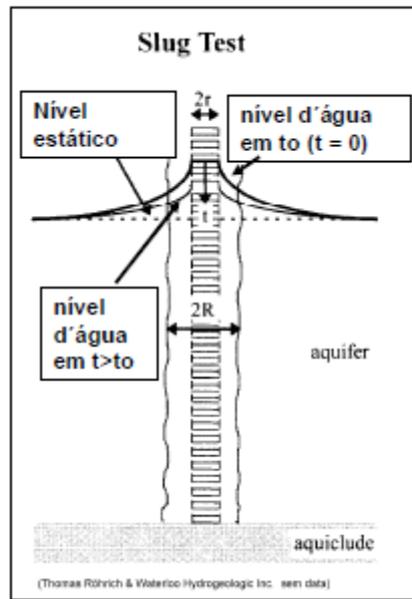


Figura 7.5: Método de Hvorslev. Fonte: Hirata, 2011.

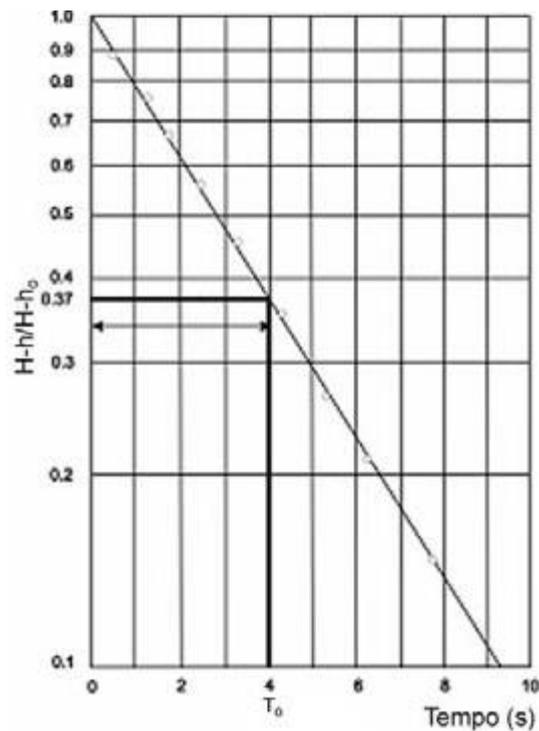


Figura 7.6: Gráfico típico do método de Hvorslev. Fonte: Hirata, 2011.

7.4 TESTES DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO AQUIFERO FISSURAL

Como já mencionado o monitoramento do nível d'água automatizado no P3, poço em operação pertencente ao CDTN, seria utilizado como teste de aquífero. Os parâmetros T e S_y foram calculados utilizando o *software Aquifer Test*. Os métodos utilizados foram referentes a aquíferos livres e drenantes, por meio das soluções de

Neuman. Esta solução se propõe a identificar o S_y , que auxiliará na determinação da recarga. Como os testes foram realizados em um poço com entradas de água pelos dois aquíferos, granular e fissural, admitiu-se a existência da conexão hidráulica entre os dois aquíferos.

A execução do teste de bombeamento pela solução de Neuman se baseia em um ajuste da curva de rebaixamento medido no teste com uma dada curva, chamada de Curva Típica de Neuman (Fig. 7.7), que foi desenvolvida a partir da equação 7.2.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_A, u_B, \Gamma) \quad (\text{Equação 7.2})$$

$W(u_A, u_B, \Gamma)$ é a função referente ao funcionamento do poço para aquíferos livres, também conhecida como Condição de contorno de Neumann, b = Espessura saturada do aquífero no início do teste e Γ = Movimento vertical da água subterrânea.

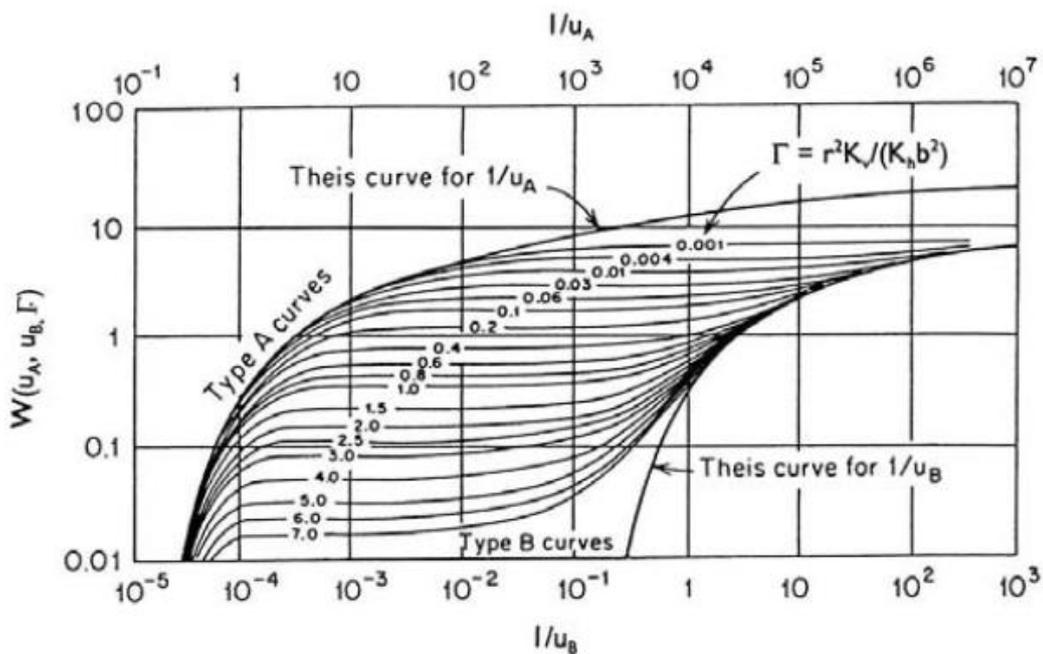


Figura 7.7: Curva Típica de Neuman. Fonte: Feitosa *et. al.* 2008.

7.5 ANÁLISE DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Para a análise do uso do solo no entorno dos poços foi utilizada a técnica de mapas de distâncias conhecida como *buffer*, cujo procedimento foi feito no programa Google Earth Pro, que permite a medição de áreas em imagens de satélite com referências geográficas.

Foram delimitadas circunferências de raio de 30 m no entorno de cada piezômetro monitorado na segunda etapa, e atribuiu-se dentro desse limite um peso, de acordo com os tipos de ocupação encontrados em relação ao seu potencial teórico para infiltração.

- 0 para asfalto e prédios
- 1 para paralelepípedos (pé-de-moleque)
- 1,25 para grama ou vegetação

Esses valores foram definidos de acordo com dados encontrados sobre a capacidade de infiltração dos três materiais em estudos de Maus *et. al.* (2007). De acordo com o referido estudo as áreas gramadas infiltram 1,25 vezes mais do que áreas de paralelepípedos, e a infiltração não acontece em áreas asfaltadas. Assim, asfaltos e prédios, que impermeabilizariam por completo o solo e não permitem infiltração foram associados ao valor mais baixo, igual a 0. Paralelepípedos, que impedem parcialmente a infiltração, foram associados ao valor intermediário, igual a 1. Por fim, áreas com grama e vegetação, que permitem infiltração, receberam o valor máximo, igual a 1,25. O valor numérico final representativo do “uso e ocupação” no entorno de cada poço foi definido pela média ponderada da área dos tipos ocupação segundo os pesos acima definidos.

7.6. TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Descreve-se a seguir as técnicas estatísticas utilizadas nas primeira e segunda etapa do trabalho.

7.6.1 ESTATÍSTICA DESCRITIVA E CORRELAÇÕES

Todas as correlações foram precedidas de testes de normalidade das amostras de dados. Os testes de aderência Kolmogorov–Smirnov e Shapiro Wilk, ($p < 0,05$) foram aplicados aos dados de nível d’água monitorados nos conjuntos de poços profundos (PP) e piezômetros (PM) nos respectivos períodos de análise, 1ª e 2ª etapas. Os resultados dos testes mostraram o comportamento não paramétrico desses dados (Tab. 7.6 e 7.7).

Tabela 7.6: Valores dos testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov (K-S) e Shapiro Wilk, para os dados do monitoramento de 1997 a 2000.

	PP 97/98	PP98/99	PP 99/00	PM97/98	PM98/99	PM99/00
Kolmogorov-Smirnov	0,013	0,012	0,1	0,011	0,013	0,014
Shapiro-Wilk	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,008

Tabela 7.7: Valores dos testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov (K-S) e Shapiro Wilk, para os dados do monitoramento de 2012/2013.

	PM	PP
Kolmogorov-Smirnov	0,007	0,025
Shapiro-Wilk	0,009	0,006

Na segunda etapa, uma menor quantidade de medidas foram usadas no poço profundo P3, em operação, resultante da retirada do *diver* quando a necessidade de retirada da bomba. O P10 apresentou problemas de medição nas últimas semanas do monitoramento, motivo pelo qual essas medidas foram removidas.

Seguiu-se uma análise dos principais fatores capazes de influenciar a variação do nível estático, quais foram:

- Precipitação;
- Materiais de origem e textura do solo;
- Localização em relação ao fluxo subterrâneo (áreas de recarga e descarga dentro da área de estudo)
- Profundidade do nível estático.

Esta análise foi realizada por métodos de correlação estatística considerando cada fator isoladamente. A correlação utilizada foi segundo o método de *Spearman*, em que foi adotada a seguinte classificação de graus de correlação (Tab. 7.8).

Tabela 7.8: Valores dos graus de correlação segundo o método de Pearson e Spearman. Fonte: Sousa, 2012.

Coefficiente de correlação	Correlação
$r=1$	Perfeita
$0,8 \leq r < 1$	Forte
$0,5 \leq r < 0,8$	Moderada
$0,1 \leq r < 0,5$	Fraca
$0 \leq r < 0,1$	Ínfima
$r=0$	Nula

7.6.2 AUTOCORRELAÇÃO

Neste estudo, a Função de Autocorrelação (FAC) quantifica a dependência linear entre os valores sucessivos da série de dados do nível de d'água, em cada poço ou piezômetro, no período de tempo do monitoramento, e o efeito de memória do *input* de recarga na dinâmica aquífera. O efeito de memória é o período de tempo que o evento (*input* de recarga) leva interferindo em um sistema, ou seja, o tempo gasto pelo sistema aquífero para se desfazer do evento da recarga. Em termos práticos, esse efeito de memória indica as condições de armazenamento do aquífero, ou seja, os valores de tempo mais elevados apontam para uma condição de armazenamento inferior, pois levam mais tempo tanto para a água ser incorporada no aquífero quanto para o aquífero liberá-la após a recarga.

Funções de autocorrelação que não tenham nenhuma correlação significativa apresentarão decaimentos rápidos e valores zero em pouco espaço de tempo (*lag*). O contrário, funções que tenham correlações significativas e fortemente interdependentes apresentarão decaimentos longos e valores acima de zero em um grande número de *lags* (LEE & LEE, 2000).

Lags são os intervalos de tempo determinados para se analisar a dependência linear dos dados ao longo do mesmo. Estes intervalos de tempo podem ser segundos, minutos, horas, dias, semanas, ou o período que melhor servir para a análise a ser realizada. Neste trabalho foram usados dois *lags*, os quais foram definidos de acordo com a frequência do monitoramento: de 15 dias na primeira etapa e de 1 dia na segunda.

A FAC permite gerar um correlograma, gráfico que apresenta os valores do coeficiente de autocorrelação (r) versus *lag*. O formato característico dos correlogramas de FAC é uma inclinação decrescente e suave, referente ao período de tempo em que o

efeito de memória demora em se desfazer, dos valores diferentes de zero, em um longo intervalo de tempo (SAMOHYL, 2005).

Esta dependência linear gerada pelo correlograma evidencia o comportamento do aquífero em relação a eventos ocorridos: quanto maior a duração dos eventos maior será o decaimento do correlograma (FERRARI & KARMANN, 2008).

A função de autocorrelação é calculada com as equações (7.3) e (7.4).

$$r(k) = C(k)/C(0) \quad \text{Equação 7.3}$$

$$C(k) = 1/n + \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x}) * (x_{t+k} - \bar{x}) \quad \text{Equação 7.4}$$

Sendo: $r(k)$ o coeficiente de autocorrelação; k o tempo de defasagem, *lag*; n é o comprimento da série temporal; x é o valor de um evento; \bar{x} linha é a média dos eventos e $C(k)$ a função autocorrelação da série usada para um determinado k .

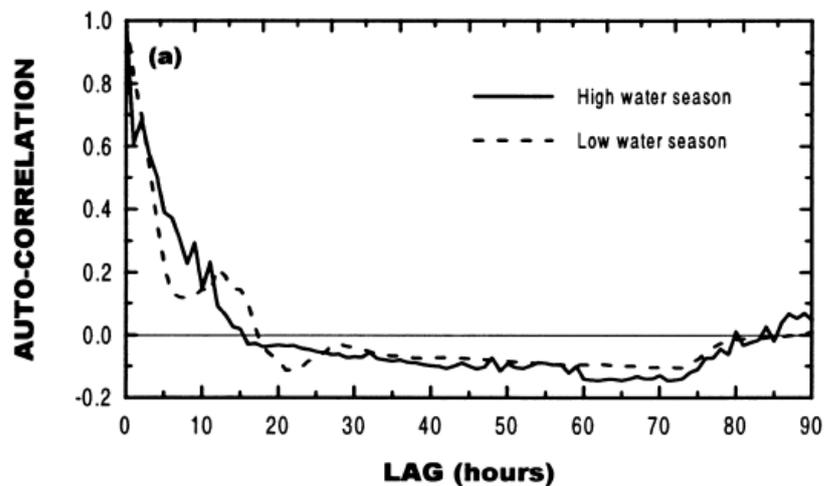


Figura 7.8. Exemplo de correlograma de auto-correlação. Lee & Lee (2000).

A partir do correlograma se identifica o período máximo do efeito de memória. Para eventos em águas subterrâneas observa-se que este período é referente ao valor aproximado de $c(k) = 0,2$, para $lag > 0$ (FERRARI & KARMANN, 2008).

Esta técnica estatística de autocorrelação foi utilizada para auxiliar na interpretação da Correlação cruzada, realizada para se obter a influência da precipitação no nível potenciométrico e na recarga dos aquíferos. Como a técnica exige dados com leitura intervalar bem definida, ela só poderia ser aplicada nos poços com leitura automatizada (2ª etapa). Entretanto esta técnica foi empregada inicialmente aos dados

da primeira etapa de monitoramento, que possui uma frequência de medidas de nível d'água menos rigorosa (dados com frequência média de 15 dias), a fim de testar a sua aplicabilidade.

7.6.3 CORRELAÇÃO CRUZADA

A função de correlação cruzada evidencia a correlação entre duas variáveis temporais que não são necessariamente contemporâneas (SAMOHYL, 2005). Assim, uma variável pode influenciar a outra algum tempo depois, este correspondente a uma defasagem do tempo para que as duas variáveis se correlacionem. Este período de defasagem pode ser determinado segundo a função de correlação cruzada. De acordo com Ferrari & Karmann (2008) essa função é utilizada para análises de séries de entrada e de saída para $k > 0$, sendo k o tempo de defasagem da correlação entre as séries temporais X e Y (Equações 7.5 e 7.6).

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad \text{Equação 7.5.}$$

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad \text{Equação 7.6.}$$

Onde $C_{xy(k)}$ é a função de correlação cruzada; σ_x e σ_y são os desvios padrões das séries temporais x, y; k é o índice que determina o deslocamento temporal entre as séries para que seja feito o cálculo da correlação, o *lag*; n é o comprimento da série temporal e $r_{xy(k)}$ corresponde à resposta do sistema ao *input* (FERRARI & KARMANN, 2008).

Sabe-se que as entradas influenciam as saídas sempre que $r_{xy(k)} > 0$ para $k > 0$ (FERRARI & KARMANN, 2008). O tempo de defasagem no correlograma ($r_{xy(k)}$ versus *lag*) é obtido visualmente pelo maior valor positivo de $r_{xy(k)}$, conforme visto no exemplo da Figura 7.9.

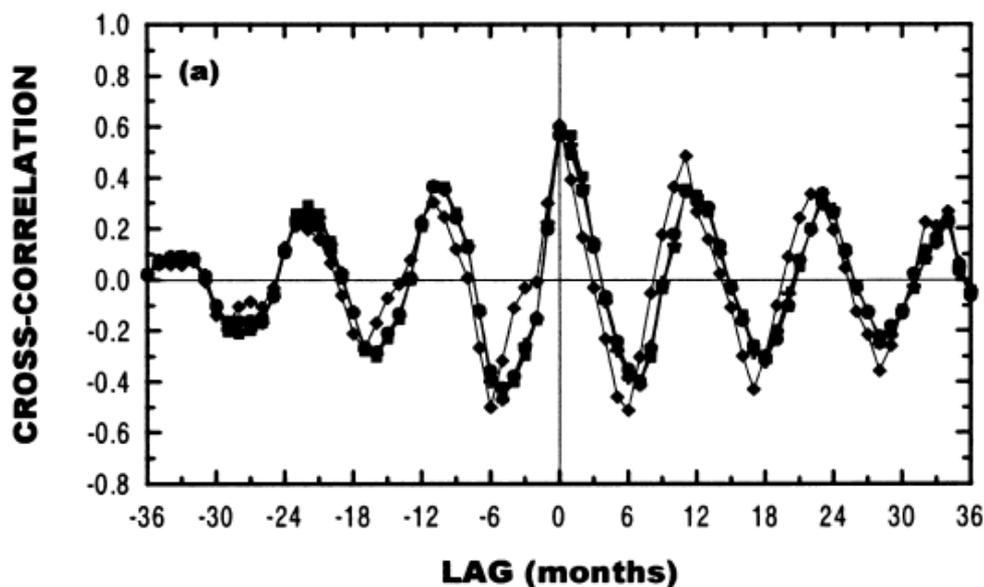


Figura 7.9. Exemplo de correlograma de correlação - cruzada. Lee & Lee (2000).

A Função de Correlação Cruzada (FCC) aplicada na determinação de duas defasagens de tempo, sendo: i) entre a precipitação e a resposta do nível d'água do aquífero granular e ii) entre os *inputs* de recarga do aquífero granular e a resposta do aquífero fissural, avaliando-se, assim, o tempo de percolação entre os dois aquíferos, assumindo-se que os dois aquíferos estão intimamente conectados.

7.7. CÁLCULO DA RECARGA

O cálculo da recarga foi feito pelo método da variação do nível estático nos piezômetros monitorados nas duas etapas do trabalho. Tal método tem a premissa de que todo aumento no nível potenciométrico é fruto da recarga e assume-se que toda água que chega à zona saturada já entra em armazenamento, considerando que o fluxo base, a evapotranspiração das águas subterrâneas e o fluxo líquido em subsuperfície são iguais a zero (WAHNFRIED & HIRATA, 2005).

O cálculo estimativo da recarga foi realizado somente para o aquífero granular, que, segundo Healy & Cook (2002) é:

$$R = S_y \frac{dh}{dt} = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (\text{Equação 7.7})$$

Em que, R é a recarga, S_y é a vazão específica, Δh ou o dh é a variação do nível de água estático e Δt ou o dt é a variação do tempo.

O valor de Δh num período hidrológico pode ser obtido de diversas formas, citando-se: a diferença entre o nível mínimo e máximo do nível d'água no período de um ano hidrológico, e pelo somatório de todas as elevações do nível d'água medidos.

Para a primeira etapa, como os dados foram medidos semanalmente, esta somatória representou a elevação existente entre uma medida e a medida da semana seguinte. Caso houvesse depleção entre uma medida e outra, este valor não era desconsiderado. Na segunda etapa os dados do Δh tiveram frequência de 15 em 15 min., resultando em valores mais detalhados que os determinados nas medições manuais, que foram feitas semanalmente.

A determinação do S_y adequado a se utilizar neste método deve ser feita de forma muito criteriosa, pois o método é muito sensível a esse parâmetro. Para a primeira etapa foi utilizado o valor de S_y determinados em testes de bombeamento, realizados por Carvalho Filho (1997), para a segunda etapa foi utilizado o valor de S_y determinado em teste de bombeamento com dados do P3, que esteve em operação em parte do monitoramento automatizado.

A recarga foi calculada em mm para cada poço e para cada ano hidrológico. Os valores foram apresentados em percentuais sobre a quantidade de precipitação dos respectivos anos hidrológicos.

Os dados de precipitação foram adquiridos na estação meteorológica do CDTN, portanto, bem junto à área de estudo.

7.8. MONITORAMENTO FÍSICO-QUÍMICO

O monitoramento físico-químico das águas do aquífero granular foi realizado *in loco*, juntamente com o monitoramento manual da segunda etapa do trabalho, tendo como objetivo a observação sazonal dos seguintes parâmetros físico-químicos: condutividade elétrica, pH, STD, ORP e temperatura.

As determinações foram realizadas por meio de um multi sensor de parâmetros físico-químicos do modelo Ultrameter II 6P, portátil. As coletas foram precedidas de purga com auxílio de um amostrador do tipo *bailer*. Entre um piezômetro e outro o *bailer* usado foi higienizado com água destilada.

Foram coletados dados dos seguintes poços: PM2, PM8, PM6, PM1 e P3. O P3 foi o único poço profundo que teve coleta de água, por ser o único que se encontrava em bombeamento.

8. RESULTADOS DA 1ª ETAPA

8.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO SOBRE A RECARGA

As Tabelas 8.1 e 8.2 apresentam os resultados do tratamento estatístico dos dados utilizados na primeira etapa do trabalho, para os piezômetros e poços profundos, respectivamente para os 3 anos hidrológicos 97/98, 98/99 e 99/00, indistintamente.

Tabela 8.1: Estatística descritiva dos dados de prof. de NA por piezômetro.

Dados referentes ao agrupamento dos anos hidrológicos – 97/98 ,98/99 e 99/00								
Piezômetro	Nº dados	Média	Desvio padrão	Mediana	Moda	Variância	Mínimo	Máximo
PM2	93	5,72	0,66	5,56	5,46	0,43	4,64	7,96
PM3	95	0,81	0,34	0,82	1,07	0,12	-0,05	1,51
PM4	95	5,83	0,46	5,97	5,97	0,21	4,19	6,52
PM6	95	4,56	1,19	4,68	4,07	1,43	2,24	7,36
PM7	78	3,02	1,15	2,93	2,77	1,31	0,04	5,43
PM8	95	4,53	0,50	4,38	4,90	0,25	3,69	6,62
PM9	29	2,80	0,49	2,84	2,58	0,24	1,64	4,47
Média Total:		3,90						

Tabela 8.2: Estatística descritiva dos dados de prof. de NA por poço profundo.

Dados referentes ao agrupamento dos anos hidrológicos – 97/98 ,98/99 e 99/00								
Poço	Nº dados	Média	Desvio padrão	Mediana	Moda	Variância	Mínimo	Máximo
P0	95	6,04	0,63	6,08	6,08	0,39	4,68	7,26
P1	95	1,16	0,37	1,16	1,16	0,14	0,31	1,86
P2	95	3,52	0,71	3,62	3,73	0,50	1,32	5,15
P8	90	6,11	0,49	6,21	6,60	0,24	5,05	7,46
P9	86	4,81	0,60	4,93	4,65	0,36	2,83	6,74
P10	89	5,86	0,54	5,89	5,80	0,29	4,73	7,31
P11	84	3,14	1,02	2,97	3,10	1,04	2,05	8,22
Média total:		4,38						

Os dados de nível de água foram agrupados de acordo com o ano hidrológico, e, a partir deste agrupamento, foi feita uma análise estatística determinando as principais medidas de tendência central (Tab. 8.3).

Apenas a precipitação foi considerada como fator diretamente influente na variação do nível estático, uma vez que o córrego Engenho Nogueira encontra-se praticamente todo canalizado dentro da área de estudo.

Tabela 8.3: Tratamento estatístico dos dados de NA da primeira etapa do trabalho.

Parâmetros estatísticos	Poço Profundo			Piezômetro		
	97/98	98/99	99/00	97/98	98/99	99/00
Nº dados	273	203	158	260	174	146
Média	4,22	4,41	4,56	3,72	4,28	4,32
Desvio padrão	1,80	1,81	2,00	1,75	1,92	2,03
Mediana	4,84	4,96	5,07	4,20	4,86	4,90
Med. Geométrica	3,62	3,89	3,93	2,96	3,58	3,56
Moda	3,95	6,50	6,50	5,15	6,09	1,07
Variância	3,26	3,27	4,01	3,06	3,67	4,12
Mínimo	0,31	0,74	0,67	0,02	0,49	-0,05*
Máximo	7,31	7,02	8,22	6,08	7,96	6,95
Assimetria	-0,56	-0,47	-0,46	-0,57	-0,66	-0,66

* Neste ano houve um evento de enxurrada, em função de drenos próximos ao poço PM3 o nível d'água no momento da medição estava acima do nível do terreno dentro da "boca do poço". Informação verbal dada por Carvalho Filho.

A precipitação do ano hidrológico de 98/99 (Tab. 8.4) é muito inferior aos outros dois anos e à média anual para a cidade de Belo Horizonte. Realizada a confirmação dessa informação em outras estações de Belo Horizonte, concluiu-se que se tratou de um ano atípico.

Tabela 8.4: Total de precipitação anual por ano hidrológico.

Ano Hidrológico	Total de precipitação anual (mm)
97/98	1322,80
98/99	934,20
99/00	1141,39

A comparação gráfica do acumulado de chuva mensal com a média dos níveis estáticos mensais permite uma aproximação do comportamento da resposta dos aquíferos às precipitações. De forma geral todos os poços e piezômetros apresentaram o mesmo comportamento, por isso selecionou-se um exemplo gráfico de um piezômetro PM3 (Figuras 8.1, 8.2 e 8.3) e de um poço profundo (Figuras 8.4, 8.5 e 8.6).

A recarga em ambos os aquíferos, ocorre majoritariamente nos meses chuvosos entre outubro e março, com máximos de elevação do nível d'água em dezembro, janeiro, fevereiro ou março.

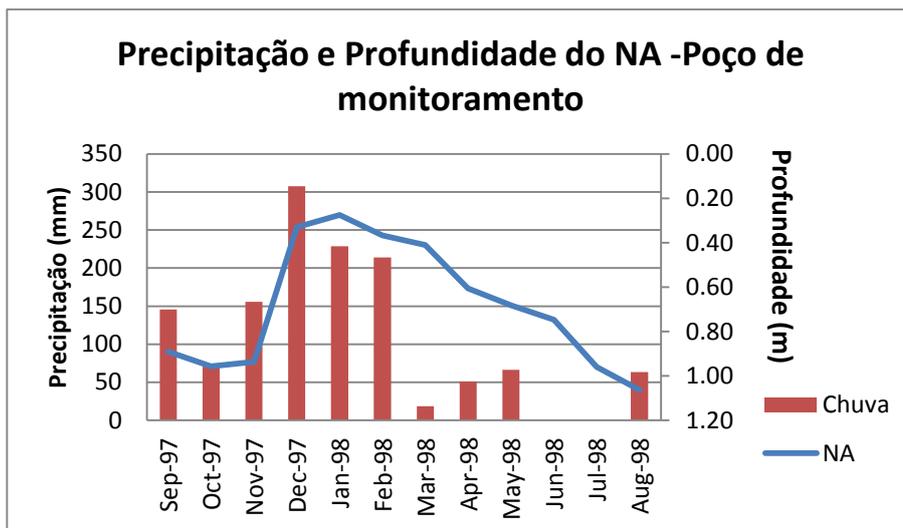


Figura 8.1: Exemplo de comportamento do NA e precipitação - PM3 1997/1998.

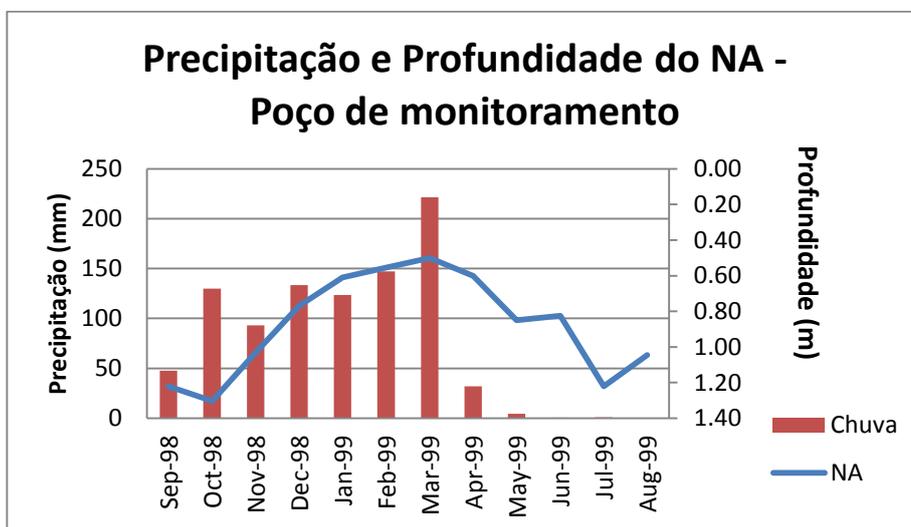


Figura 8.2: Exemplo de comportamento do NA e precipitação - PM3 - 1998/1999.

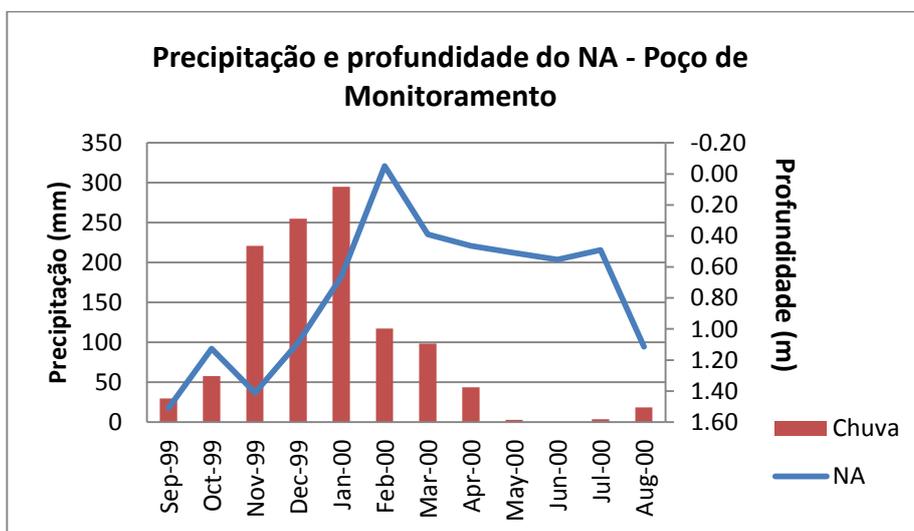


Figura 8.3: Exemplo de comportamento do NA e precipitação - PM3- 1999/2000.

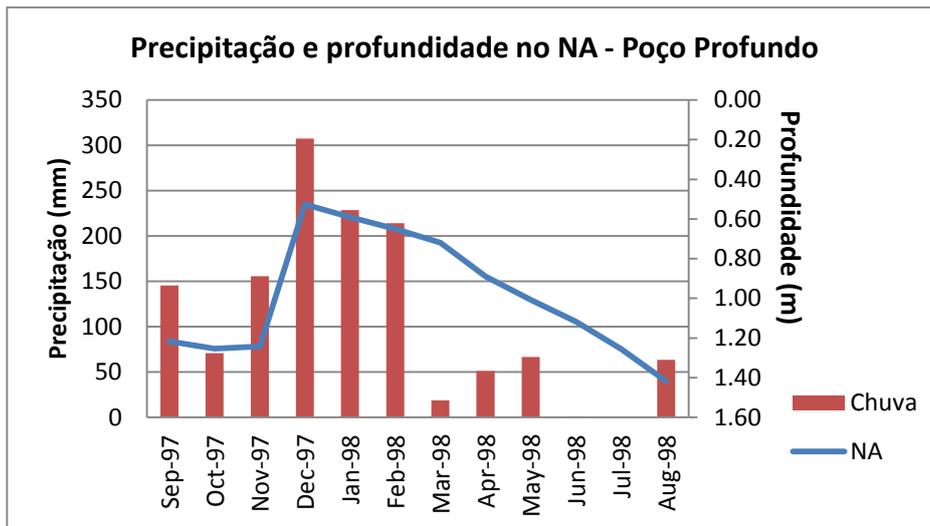


Figura 8.4: Exemplo de comportamento do NA e precipitação - P1 - 1998/1999.

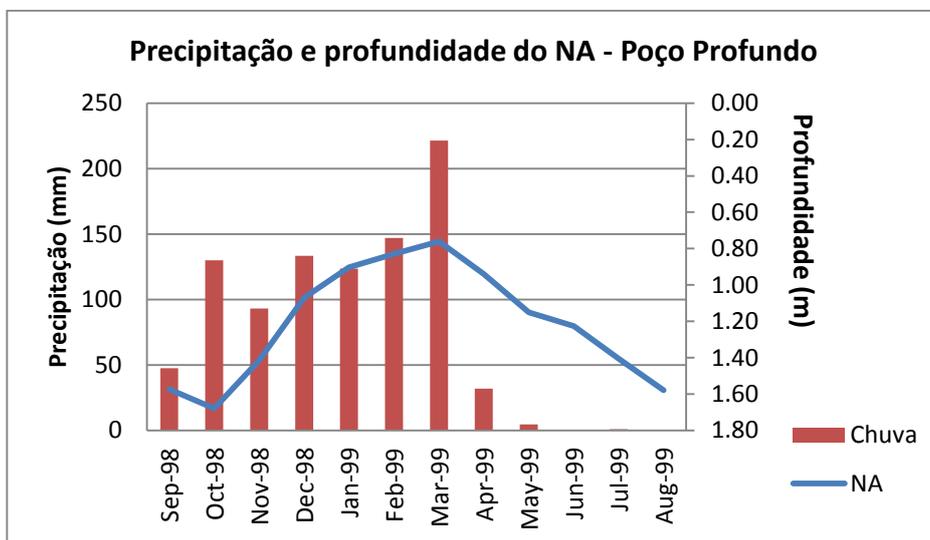


Figura 8.5: Exemplo de comportamento do NA e precipitação - P1 - 1998/1999.

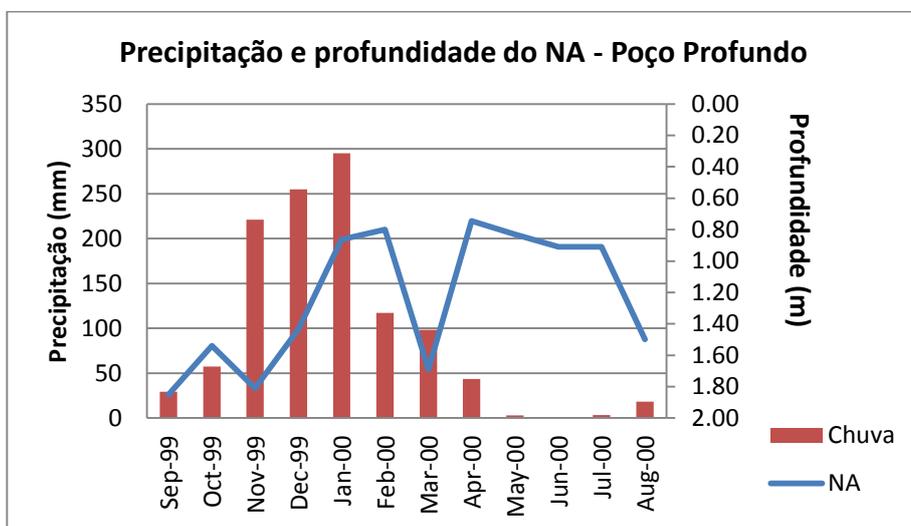


Figura 8.6: Exemplo de comportamento do NA e precipitação - 1999/2000.

Correlações estatísticas (Tab. 8.5 e 8.6) confirmaram a tendência de os níveis estáticos acompanharem as variações pluviométricas constatadas visualmente nas Figuras 8.1 a 8.6.

Tabela 8.5: Correlação de Spearman da média mensal do nível de água com a pluviosidade mensal nos Piezômetros.

Ano	PM2	PM3	PM4	PM6	PM7	PM8	PM9
97/98	-0,57	-0,52	-0,69	-0,34	-0,59	-0,43	-0,30
98/99	-0,79	-0,48	-0,64	0,01	-0,86	-0,70	--
99/00	-0,22	0,08	-0,32	-0,36	-0,68	-0,08	--
N	93	95	95	95	78	95	29

Tabela 8.6: Correlação de Spearman da média mensal do nível de água com a pluviosidade mensal nos Poços tubulares.

Ano	P0	P1	P2	P8	P9	P10	P11
97/98	-0,43	-0,52	-0,29	-0,48	-0,32	-0,29	-0,57
98/99	-0,73	-0,52	-0,49	-0,28	-0,25	0,00	-0,70
99/00	-0,20	0,11	-0,27	0,03	-0,18	0,01	-0,01
N	95	95	95	90	86	89	84

A análise das correlações das variações do nível de água com a precipitação permitiu as seguintes constatações:

- Nos piezômetros as correlações foram, no geral, mais elevadas do que nos poços profundos, o que já era esperado, visto que o aquífero freático é o primeiro a receber as frentes de infiltração;
- Nos piezômetros, os graus de correlações foram assim classificados (Fig. 8.7): forte (5%), moderado (45%), fraco (36%) e ínfimo (14%). As mais baixas correlações (ínfimas a baixas) foram observadas nos piezômetros PM6 e PM9, ambos localizados no domínio de solo residual jovem. E nos poços profundos (Fig. 8.8): moderado (22%), fracas (57%), ínfimo e nulo (12%). O ano com menor número de dados foi o que apresentou as correlações mais baixas em ambos os aquíferos.

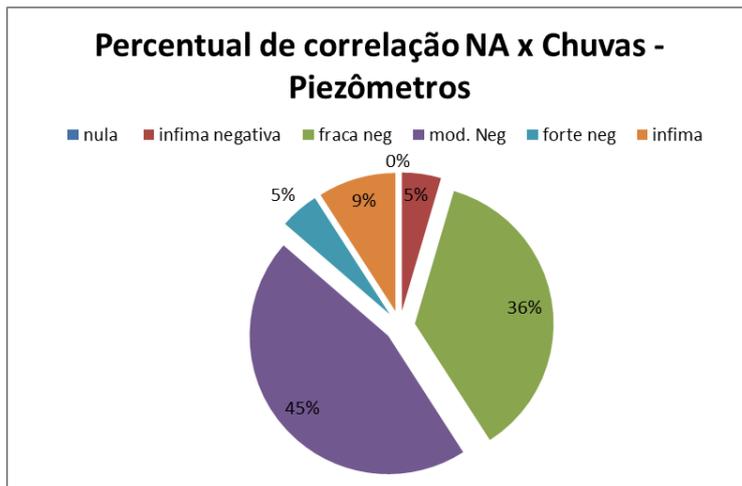


Figura 8.7: Percentual da correlação entre Nível estático e Precipitação – Piezômetros.

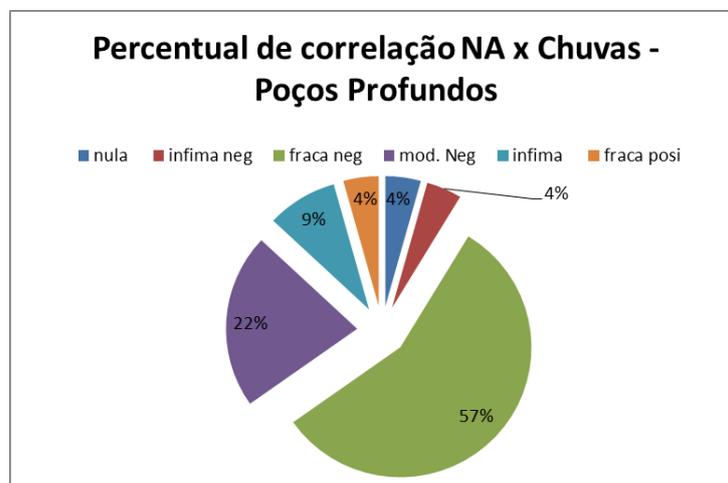


Figura 8.8: Percentual da correlação entre Nível estático e Precipitação – Poços Profundos.

Nesta primeira etapa do trabalho o tempo de resposta do nível de água às precipitações foi “tentativamente” avaliado por meio do método da função de correlação cruzada. Entretanto, os intervalos das medidas de nível de água disponíveis irregulares, a grande variação no número de medidas por mês e a concentração de medidas em determinados períodos do mês (feitas em sua maioria na primeira quinzena e depois feita somente no final do mês seguinte) fizeram com que fosse uma padronização das medidas para o intervalo de quinze dias, calculando-se a média das medidas feitas em cada período quinzenal.

Portanto, nesta etapa o tempo de defasagem analisado foi de quinze dias para as variáveis, nível de água e precipitação acumulada correspondente. Para esta análise, neste momento do trabalho, foram retiradas as informações de profundidade de NA do poço profundo P11 e do poço de monitoramento PM9, isso foi feito dada a falta de dados suficiente destes dos poços para a aplicação deste método.

Os valores de r_{xy} que mais se repetiram tanto nos poços profundos como dos piezômetros, foi para $K=7$, referente a sete quinzenas, ou aproximadamente três meses e meio (Fig. 8.9 e 8.10).

Seguramente esse elevado tempo de resposta reflete a escala intervalar de 15 dias, demasiadamente grande para essa análise, além de certa inconsistência dos dados, uma vez que os valores quinzenais representavam a média deste período. Porém a adoção deste método nesta etapa foi fundamental para a compreensão do mesmo e conferência com resultados do mesmo método aplicado posteriormente aos dados monitorados automaticamente.

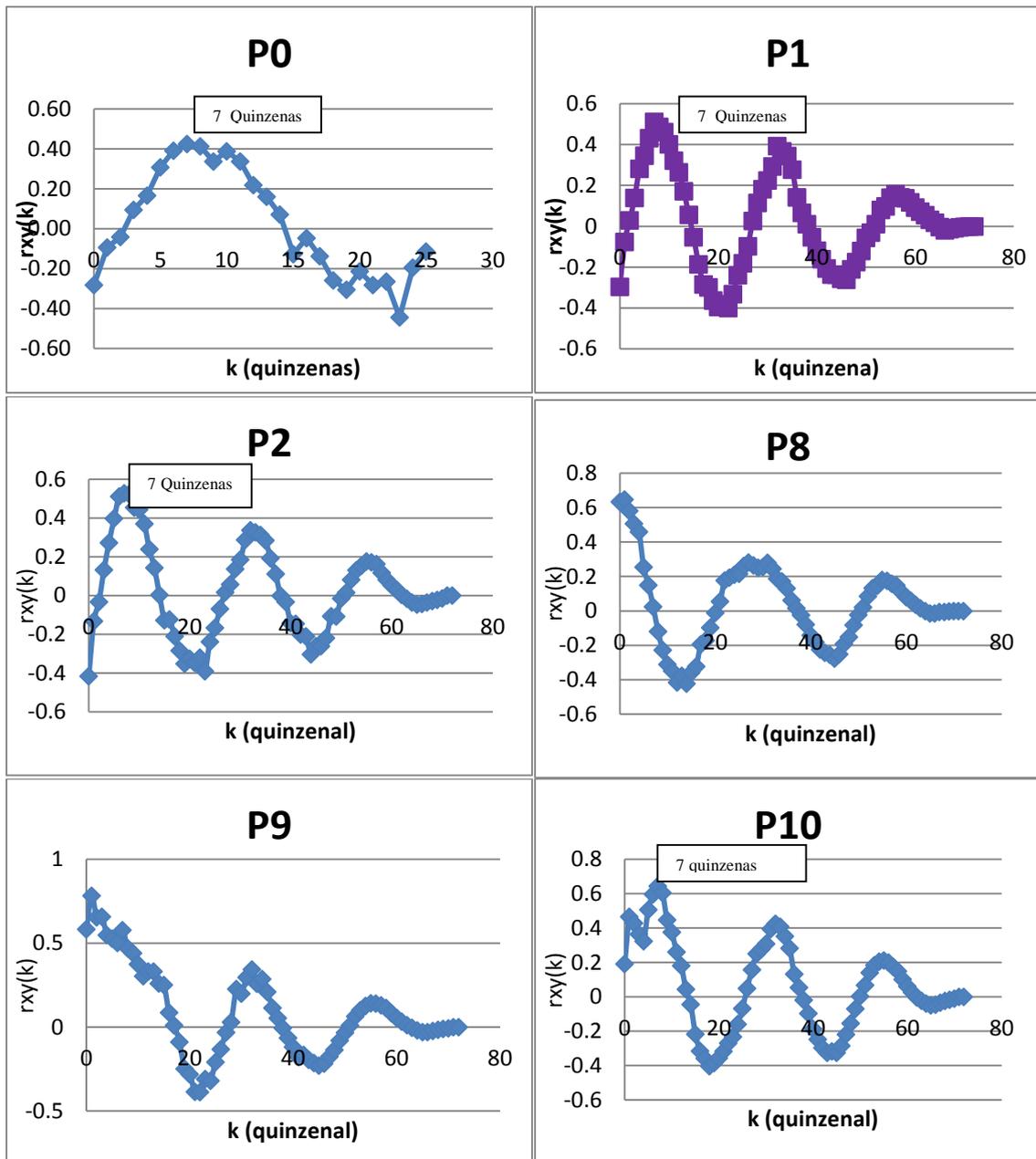


Figura 8.9: Correlogramas de FCC da 1ª etapa para os poços profundos, $\Gamma_{xy}(k=15 \text{ dias})$, destaque para os pontos $K=7$.

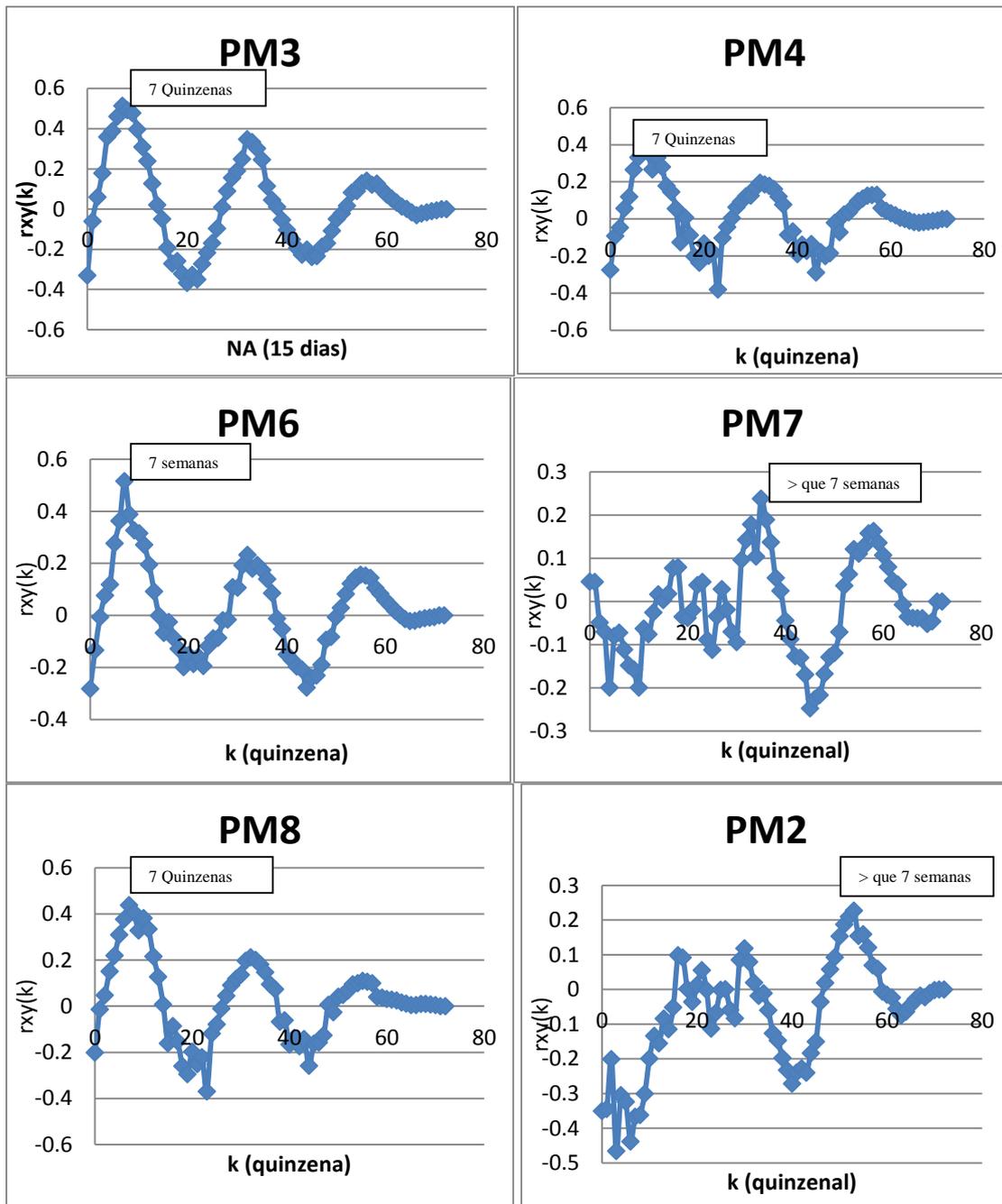


Figura 8.10: Correlograma de FCC para a 1ª etapa, $r_{xy}(k=15 \text{ dias})$, destaque para os pontos $K=7$.

8.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEXTURA DO SOLO SOBRE A RECARGA

A textura da zona não saturada foi analisada indiretamente quanto a seus aspectos de permeabilidade e capacidade de infiltração para os casos dos dados dos piezômetros. No caso dos poços profundos os atributos analisados foram o tipo de porosidade (misto ou fraturado) e de pressão da água (livre ou semi confinado) obtidos dos perfis construtivos destes poços.

Os resultados dos piezômetros foram organizados na Tabela 8.7, em que se agruparam os piezômetros em três classes: com “predominância de areia” (>50% de areia na descrição), com “predominância de argila” (>50% de argila na descrição) e “mistura areia e argila” (sem predominância de uma ou outra granulação), com a média do somatório de todas as elevações, isto é, das variações positivas de Δh .

Tabela 8.7: Elevação do nível d’água ($\Sigma\Delta h$) em relação à textura do subsolo nos piezômetros.

Poço / Material	Predominância de areia	Mistura (areia e argila)	Predominância de argila
Poço de monitoramento	PM6	PM2/ PM9 /PM8	PM3/ PM4 /PM7
Média dos 3 anos Δh (m)	6,33	3,79/ 3,65 / 1,86	1,68/ 1,93 /6,95

As menores variações de NA concentraram-se na classe “Predominância de argila” (PM3 e PM4), secundada pela classe “Mistura de areia/argila”, conforme esperado.

As maiores variações, porém, ocorreram tanto em um piezômetro da classe “Predominância de areia” (PM6) quanto na classe de “predominância de argila” (PM7). Ambos os casos são justificados pela forma em que essa classificação foi estabelecida, pois ela não levou em conta a distribuição vertical das zonas texturais. Ambos os poços encontram-se próximos sob o mesmo contexto geológico/pedológico/hidrogeológico. Porém em termos hidrogeológicos, trata-se de uma região onde ocorre uma camada inferior de argila orgânica, pura, de grande espessura, entretanto em quantidades diferentes nos dois piezômetros. No PM7 a argila pura é encontrada de 3,9 até 9,0m sob uma camada arenosa (NA médio = 3,02m), enquanto que no PM6, a argila só aparece nas camadas mais inferiores a partir dos 10 m, sob uma camada mais arenosa (NA médio =4,56m). Assim, essa argila no caso do PM7 funciona como uma barreira hidráulica, isolando o aquífero poroso do fraturado, e localmente criando um aquífero suspenso, atestado pela mais alta correlação com a precipitação encontrada que foi no PM7 ($r=0,86$) – Tabela 8.5.

O conjunto desses resultados mostra coerência entre os parâmetros analisados de acordo com as principais características texturais (argilas e areias) permitindo se inferir a importância desse fator sobre a recarga aquífera.

A partir da Tabela 8.7 pode se constatar que:

- As menores variações de nível incidiram sobre os poços cuja zona não saturada é de textura argilosa, como no PM3 e PM4, ou com intercalações de texturas contrastantes ao longo de perfis verticais (PM8), comum ao longo da calha do córrego Engenho Nogueira.
- As maiores variações incidiram sobre os solos residuais jovens (PM6 e PM9 e possivelmente o PM2), a dada sua proximidade com áreas associadas aos solos residuais jovens, destacando-se que, além da textura do solo ser arenosa a mista essas áreas são também extensamente cobertas pela vegetação natural, facilitadora da infiltração.

No grupo de poços profundos, associando-se as informações quanto ao tipo de porosidade no qual o poço se insere (Tab. 8.8) com a média dos 3 anos hidrológicos do acúmulo anual do nível de água, é possível extrair as seguintes constatações:

- A condição mais desfavorecida é a do P8 (livre/fraturado), reflexo do maior isolamento hidráulico local entre os meios granular e fraturado, resultando no menor escoamento do primeiro para o segundo;
- As maiores amplitudes exibidas pelos poços no semiconfinado/fraturado, bem como nos livres/mistos, pode ser reflexo da mais alta conectividade hidráulica local entre os meios granular e fraturado.

Tabela 8.8: Comparação entre a descrição litológica e a variação positiva anual do nível de água - poços profundos.

Porosidade/pressão da água	Livre	Semiconfinado
Misto	P4 (2,33m) / P9 (2,40m)	-
Fraturado	P8 (2,08m);	P10 (2,40); P11(3,71m)

8.3 LOCALIZAÇÃO DAS REGIÕES DE MAIOR RECARGA

Para a identificação das regiões onde ocorrem as principais infiltrações de água (zonas de recarga) e as regiões onde ocorrem as principais saídas de água (zonas de descarga), foram gerados os mapas potenciométricos representativos dos aquíferos granular (Fig.8.11) e fraturado (Fig. 8.12). Sendo assim, identificou-se a área de recarga e descarga para a área de estudo.

Constatou-se que fluxo subterrâneo tem a mesma direção e sentido tanto na estação seca quanto na estação chuvosa, do mesmo modo que não há alteração de direção e sentido do fluxo ao longo dos anos analisados.

Os fluxos de ambos os aquíferos granular e fissural possuem sentido SW para NE, tendo como uma importante zona de recarga geral a porção SW, nas instalações do CDTN, região com importante parcela disponível para infiltração direta. Na porção NE junto à entrada da UFMG pela Avenida Antônio Carlos, é a região de descarga da área de estudo.

Verificou-se, assim, que a superfície potenciométrica em ambos os aquíferos se conforma ao relevo e comportamento semelhante, atestado pelos valores dos gradientes hidráulicos (i) que para o aquífero poroso é 0,015 metros, e, para o aquífero fissural é de 0,013 metros. Entretanto, a topografia suave ao longo do vale do córrego Engenho Nogueira não pode ser ignorada do ponto de vista de infiltração direta nas porções não impermeabilizadas.

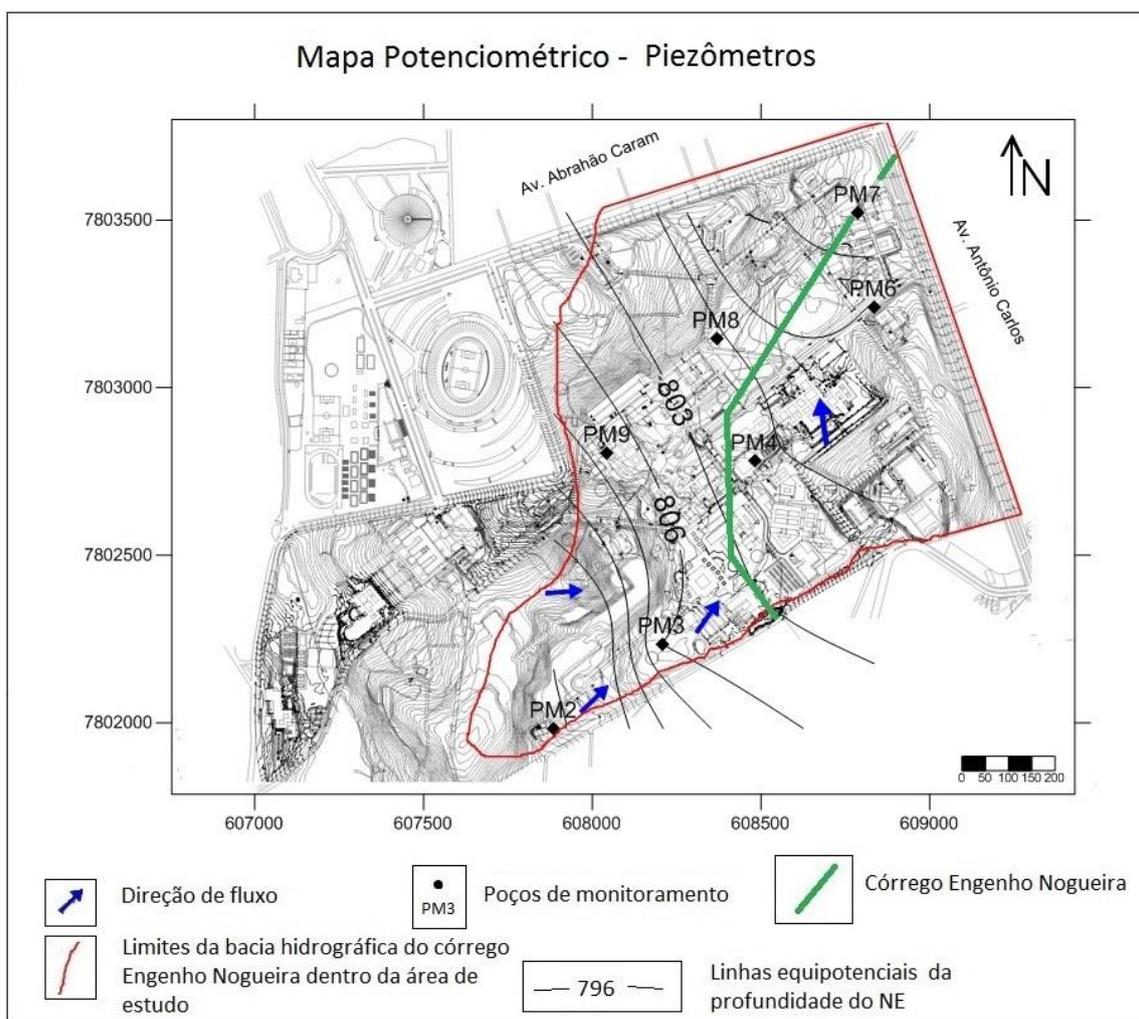


Figura 8.11: Mapa potenciométrico do Aquífero Poroso – mês de junho 2000.

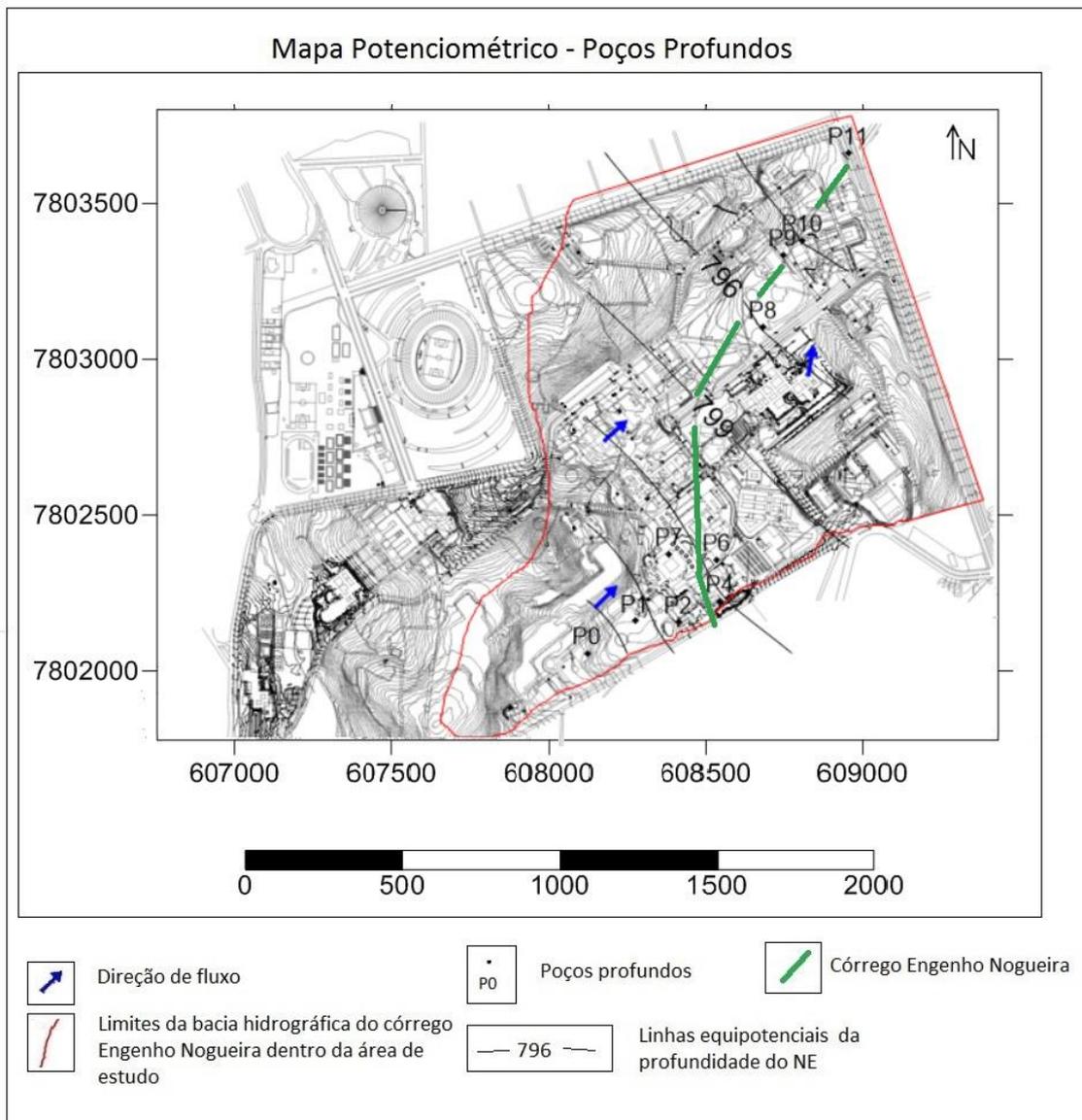


Figura 8.12: Mapa potenciométrico do Aquífero fissural/misto – mês de junho 2000.

8.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DO NÍVEL POTENCIOMÉTRICO SOBRE A INFILTRAÇÃO ANUAL ΔH

A profundidade do NA natural pode influenciar diretamente no tempo de resposta do aquífero aos eventos de chuva, o que significa que quanto maior for a espessura da zona não saturada, maior a possibilidade de dispersão da água infiltrada, atrasando a resposta potenciométrica e conseqüentemente a recarga.

Observou-se, entretanto, que a profundidade do nível de água influencia no comportamento da recarga de forma fraca a moderada na escala de análise (Tabelas 8.9 e 8.10). Os percentuais de correlação moderada e fraca nos piezômetros e nos poços profundos são semelhantes: 24% (moderada) e 76% (fraca) nos piezômetros, e 16% (moderada) e 84% (fraca) nos poços profundos.

Tabela 8.9: Coeficientes de correlação de ΔH com a profundidade do NA nos piezômetros.

	PM2	PM3	PM4	PM6	PM7	PM8	PM9	Média
97/98	-0,40	-0,32	-0,24	-0,20	-0,43	-0,31	-0,68	-0,38
98/99	-0,62	-0,23	-0,36	-0,60	-0,37	-0,49		-0,47
99/00	-0,43	-0,39	-0,34	-0,32	-0,51	-0,31		-0,41
N	93	95	95	95	78	95	29	

Tabela 8.10: Coeficientes de correlação de ΔH com a profundidade do NA nos poços profundos.

	P0	P1	P2	P8	P9	P10	P11	Média
97/98	-0,26	-0,31	-0,23	-0,37	-0,32	-0,19	-0,58	-0,35
98/99	-0,35	-0,18	-0,11	-0,38	-0,54	-0,38	-0,35	-0,35
99/00	-0,28	-0,48	-0,34	-0,32	-0,32	-0,53	-0,43	-0,39
N	95	95	95	90	86	89	84	

8.5 CÁLCULO DA RECARGA DO AQUIFERO POROSO - 1ª ETAPA

Para o cálculo da recarga foi usado um S_y de 0,09 encontrado em testes de bombeamento em um poço na área de estudo (P3) por Carvalho Filho (1997). A Tabela 8.11 mostra os valores calculados de recarga neste estudo para os piezômetros.

Os percentuais de recarga encontrados foram de 9,32% a 31,9% no ano hidrológico 97/98; de 11,75% a 40,70% no ano hidrológico 98/99 e de 17,39% a 33,52% no ano hidrológico de 99/00, sendo o ano 98/99 o que teve a maior média percentual de recarga (Tab.8.11). Carvalho Filho encontrou para o ano hidrológico de 1996/1997 valores de recarga variando de 22 a 42% do total de chuva, para a mesma área de estudo.

Uma possível explicação para o fato do ano hidrológico com menor índice de precipitação (98/99) ter o maior percentual de recarga está no fato de que pouca precipitação implica em poucas chuvas torrenciais. Sendo assim chuvas menos intensas geram menor escoamento superficial, que, por conseguinte gera maior infiltração.

Os valores de recarga que estão acima de 40% devem ser vistos com ressalva. A esta ressalva lembra-se de inconsistências nas medições de nível d'água ao longo dos três anos hidrológicos e pelo ano de 98/99 que teve um valor de precipitação muito abaixo do normal. No caso do PM7 existe uma lente de argila situada na região em que este poço se encontra o que configura um aquífero suspenso que causa interferências nas elevações de NA neste poço, que somadas às inconsistências dos dados geram valores discrepantes de recarga.

A mesma metodologia de cálculo de recarga não pode ser adotada para os poços profundos, uma vez que as premissas necessárias para adoção desta metodologia não são contempladas pelas características do aquífero fraturado.

Tabela 8.11: Valores da recarga nos piezômetros, valores expressos em *mm*.

	P. 97/98	P.98/99	P.99/00								
	1322,8	934,4	1221,7								
Piezômetro	Sy	Δh 97/98	Δh 98/99	Δh 99/00	R 97/98	R 98/99	R 99/00	% 97/98	% 98/99	% 99/00	
PM2	0,09	1660	5150	4550	149,4	463,5	409,5	11,29	49,60	33,52	
PM3	0,09	1470	1220	2360	132,3	109,8	212,4	10,00	11,75	17,39	
PM4	0,09	1370	1550	2870	123,3	139,5	258,3	9,32	14,93	21,14	
PM6	0,09	4100	8340	6560	369	750,6	590,4	27,90	80,33	48,33	
PM7	0,09	10820	4160	5870	973,8	374,4	528,3	73,62	40,07	43,24	
PM8	0,09	1480	1370	2740	133,2	123,3	246,6	10,07	13,20	20,18	
PM9	0,09	3650			328,5			24,83	0,00	0,00	

Valores discrepantes em negrito

8.6 ANÁLISE DA CONEXÃO HIDRÁULICA ENTRE OS AQUÍFEROS GRANULAR E FISSURAL

Para investigar a existência e o grau de conexão hidráulica entre os aquíferos granular e fissural, foram selecionados quatro pares de poços (profundos e de monitoramento) o mais próximo possível entre si, em condições naturais, ou seja, os poços profundos se encontravam desativados. Seguiu-se um teste de correlação entre o nível estático de todas as medidas dos poços profundos e dos poços de monitoramento, visando observar se as variações do nível de água ocorrem simultaneamente, permitindo, assim, inferir a existência de conectividade entre ambos os aquíferos.

Dos quatro pares de poços analisados, três exibiram correlação média, moderada a forte, confirmando uma nítida e significativa conexão hidráulica entre os meios poroso e fraturado (Tab. 8.12). Apenas o par P10 e PM7 apresentou uma correlação ínfima e de valor negativo, sem significado físico, o que é facilmente explicado, pois, como já mencionado, o PM7 atravessa uma camada de argila na profundidade de 3,90 m a 9,0 m, formando um aquífero suspenso com elevada correlação NA x P (0,86) nos três anos hidrológicos analisados (Tab. 8.5). Tal espessa lente argilosa se estende até o local do P10, conforme os perfis analisados, explicando os mais ínfimos valores ou mesmo ausência de correlação do nível de água com a precipitação no P10 (Tab. 8.6). Com efeito, os dados de nível de água desse par de poços não poderiam ser efetivos para se

mostrar a conectividade dos meios poroso e fraturado, porém foi importante para demonstrar a influência dos termos texturais no comportamento da recarga.

Tabela 8.12: Coeficiente de correlação entre as medidas de nível de água dos poços profundos e dos poços de monitoramento.

<i>PP</i>	<i>PM</i>	<i>97/98</i>	<i>98/99</i>	<i>99/00</i>	<i>Média</i>	<i>Característica</i>	<i>Textura Poços monitoram.</i>	<i>Distância (m)</i>
P10	PM7	-0,10	-0,22	-0,31	-0,21	FRAT /SEMI-CONF	63% argilas 37% areias	125
P8	PM8	0,77	0,42	0,77	0,66	FRAT /LIVRE	41% argilas 59% areias	231
P1	PM3	0,99	0,97	0,84	0,93	SEM DADOS	43% argilas 57% areias	45
P0	PM2	0,89	0,44	0,64	0,65	SEM DADOS	31% argilas 37% silte arenoso 32% solo residual jovem	250

Observou-se que a forte correlação (média de 0,93) ocorreu no par de poços mais próximos (45m) enquanto que as correlações moderadas nos outros dois pares (0,65/0,66), foram de pontos com distâncias poço-piezômetro de 231 e 250 m, respectivamente.

É importante salientar que a existência das correlações observadas nos três pares de poços acima apenas atesta a conectividade entre os aquíferos granular e fissural e não informa o tempo de defasagem entre ambos aquíferos, quanto à resposta ao *input* de precipitação. Por isso foi realizado o monitoramento automatizado combinado com o manual, constituindo a 2ª Etapa do estudo, cujos resultados estão apresentados a seguir.

9. RESULTADOS DA 2ª ETAPA

Como já descrito no capítulo 7.6, item 7.6.1, os dados deste trabalho possuem comportamento estatístico não paramétrico. Portanto as técnicas estatísticas empregadas são todas referentes à distribuição não paramétrica. As medidas de tendência central são apresentadas nas tabelas 9.1 e 9.2

Tabela 9.1: Tratamento estatístico dos dados de NA medidos automaticamente, com frequência de medição de 15 em 15 minutos de agosto/2012 a abril/2013.

Poço	Nº dados	Média	Moda	Mediana	Assimetria	Curtose	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	$\Sigma\Delta h$ semanal
PM1	38240	4,24	4,85	4,75	-1,51	1,40	130	0,68	9,63	(a)
PM6	23064	5,45	5,47	5,30	0,15	-1,18	80	4,00	6,86	3,9
PM8	24534	5,79	6,75	5,72	0,69	0,33	40	5,01	6,77	2,79
P3	9091	16,87	34,63	14,30	1,61	1,54	700	9,28	34,66	(b)
P8	24534	6,97	7,00	7,01	-0,04	-1,25	30	6,42	7,51	1,15
P10	23996	6,82	6,84	6,84	-0,05	-1,02	23	6,39	7,25	0,94

^(a) não calculado dada a influência do bombeamento do P3 (CDTN); ^(b) não calculado devido ao bombeamento.

Tabela 9.2: Tratamento estatístico dos dados de NA medidos manualmente na 2ª etapa, com frequência de medição semanal de agosto/2012 a abril/2013.

Poço	Nº dados	Média	Moda	Mediana	Assimetria	Curtose	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	$\Sigma\Delta h$ semanal
PM2	25	7,14	7,68	7,18	-0,58	0,05	52	6,00	7,90	2,64
P2	20	4,00	4,38	3,92	0,18	-1,51	33	3,52	4,48	1,55
P4	25	5,12	5,23	5,08	0,22	-0,76	55	4,21	6,21	5,71

9.1 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO NA RECARGA

Apresentam-se os gráficos ilustrando o comportamento do nível de água em resposta à precipitação para o período de agosto/2012 a abril/2013 em três piezômetros e quatro poços profundos. Os pares de piezômetro-poço profundo P10/PM6 e P8/PM8 tiveram monitoramento automatizado com leituras de 15/15 minutos enquanto nos demais o monitoramento foi manualmente a cada 7 dias.

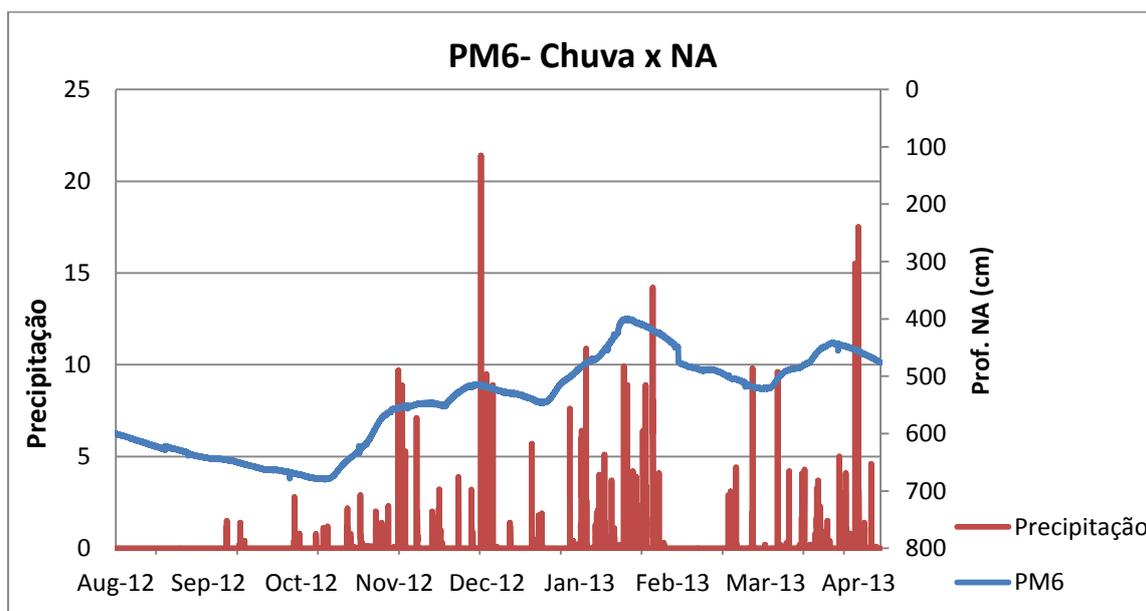


Figura 9.1: Precipitação e profundidade do nível de água com transdutor de pressão no piezômetro PM6.

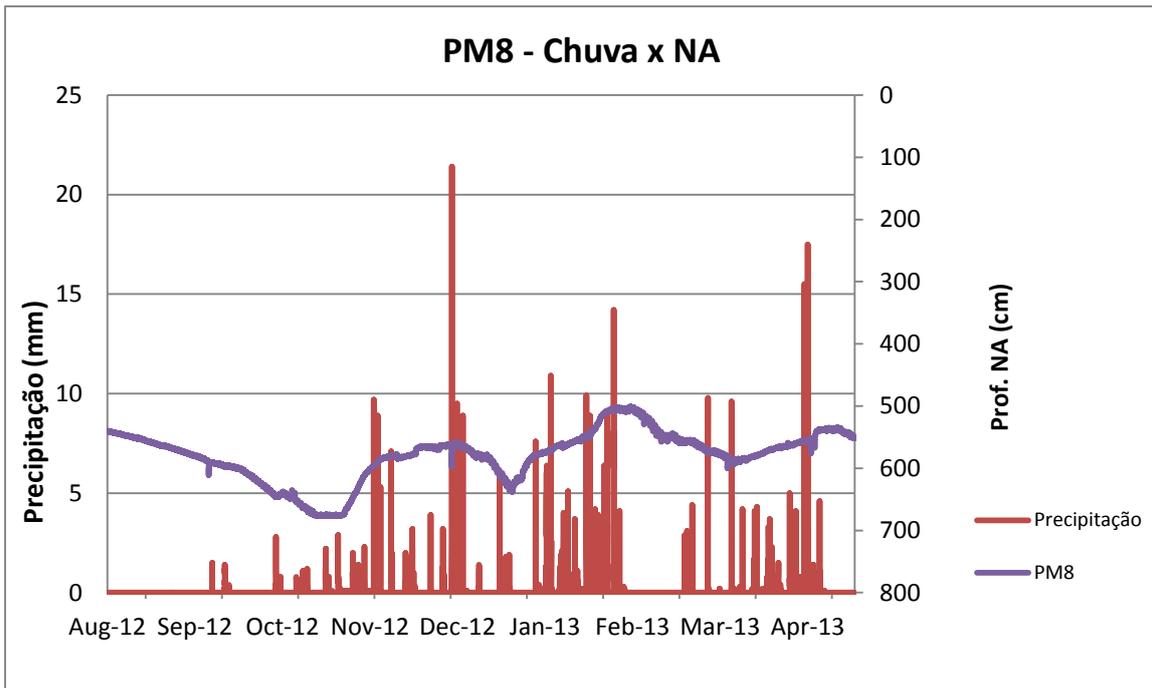


Figura 9.2: Precipitação e profundidade do nível de água com transdutor de pressão no piezômetro PM8.

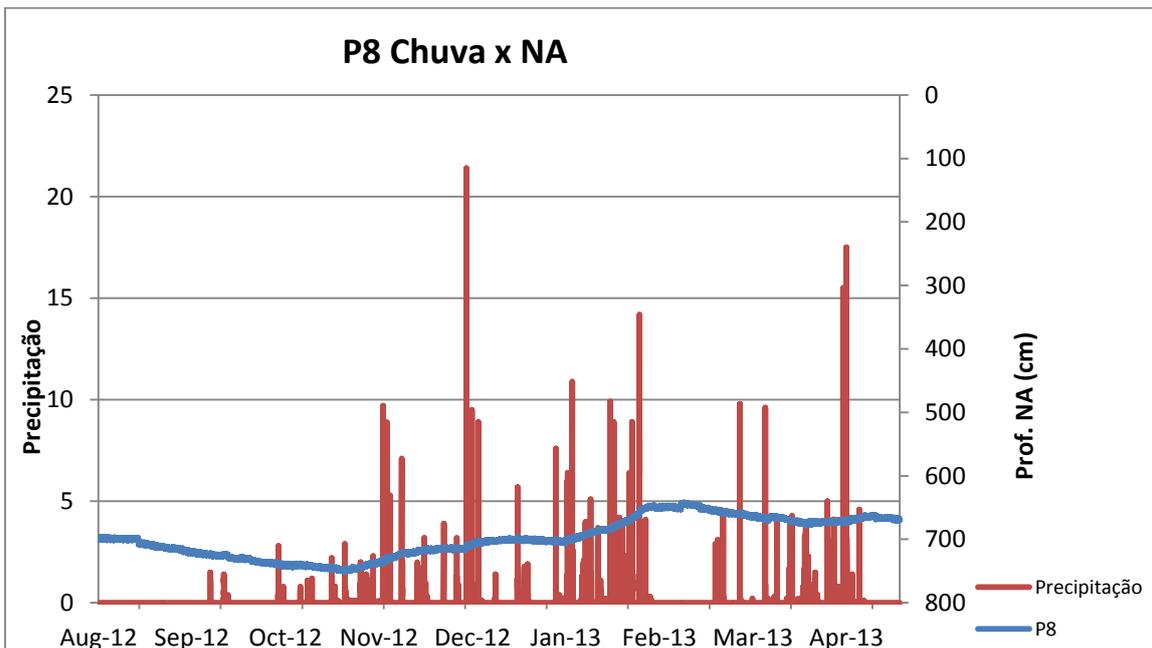


Figura 9.3: Precipitação e profundidade do nível de água com transdutor de pressão no poço profundo P8.

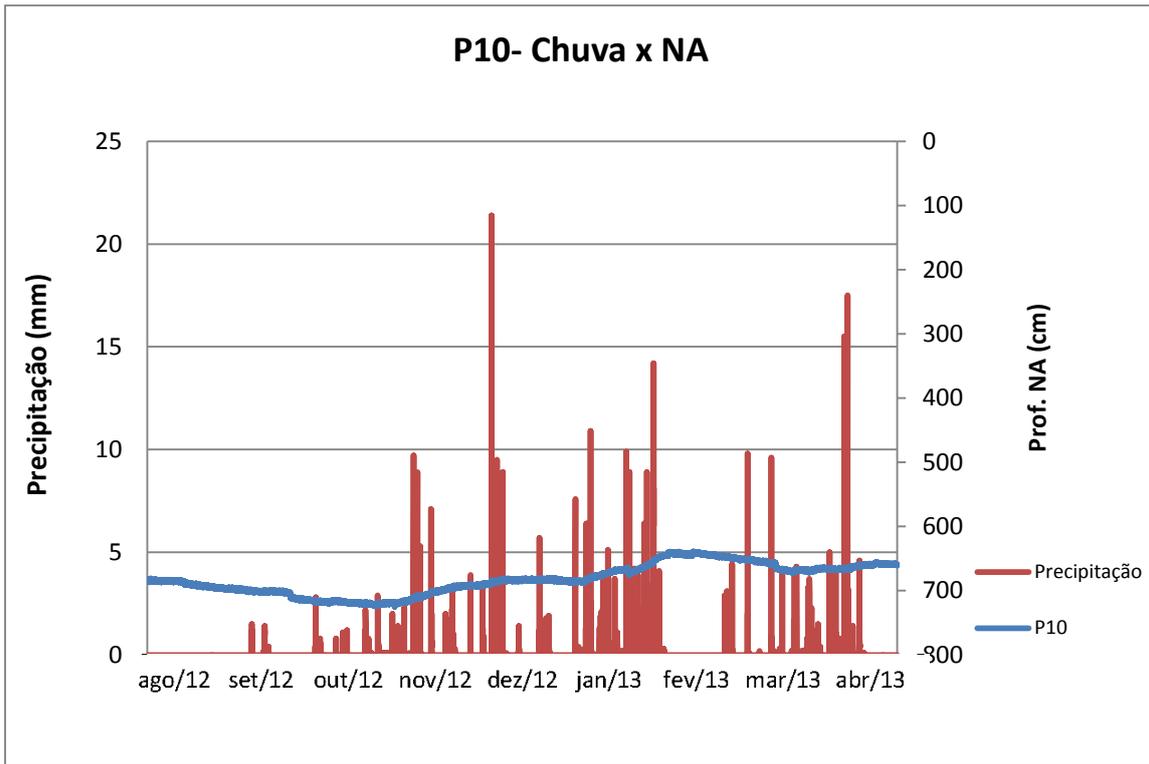


Figura 9.4: Precipitação e profundidade do nível de água com transdutor de pressão no poço profundo P10.

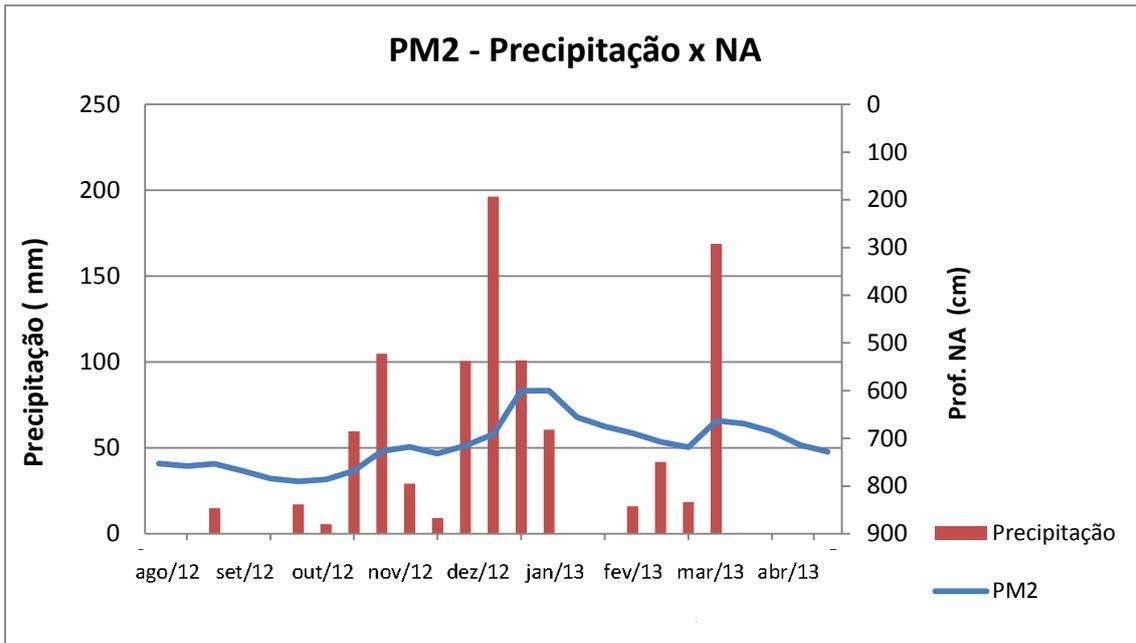


Figura 9.5: Precipitação e profundidade do nível de água monitorado manualmente a cada 7 dias no piezômetro PM2.

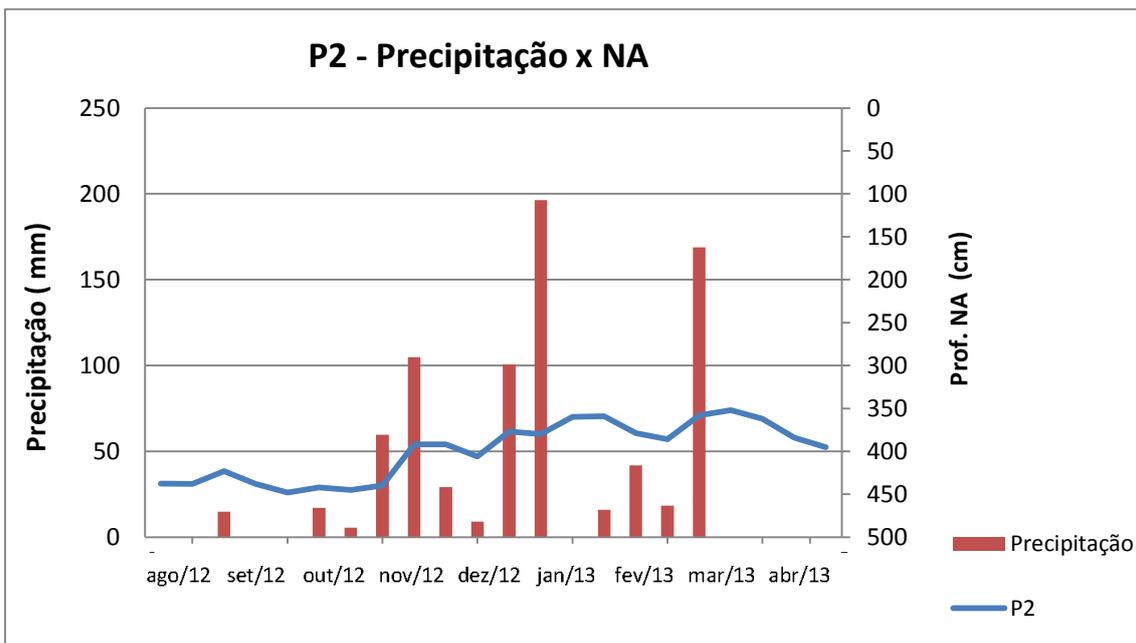


Figura 9.6: Precipitação e profundidade do nível de água monitorado manualmente a cada 7 dias no poço profundo P2.

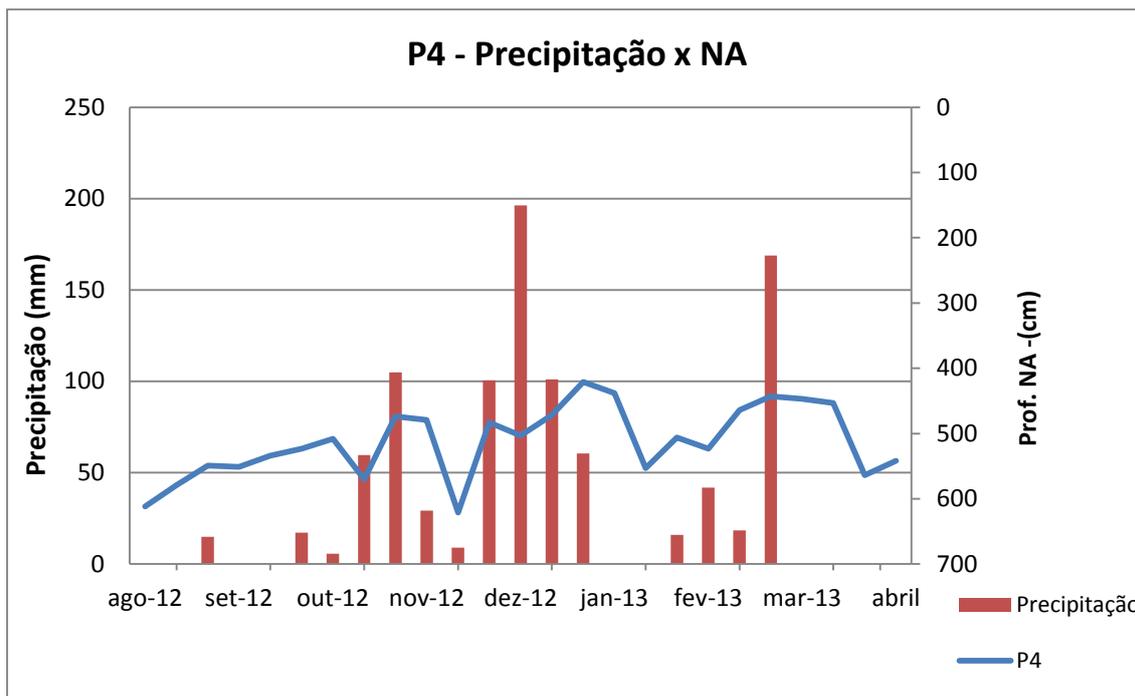


Figura 9.7: Precipitação e profundidade do nível de água monitorado manualmente a cada sete dias no poço profundo P4.

Faz-se notório que há uma defasagem de tempo entre os picos de elevação do nível d’água e os da precipitação tanto nos piezômetros quanto nos poços profundos, que será numericamente avaliada a posteriori.

Os valores de correlação dos dados de 15 em 15 min. do nível de água com a precipitação neste mesmo intervalo nos poços com monitoramento automatizado são ínfimos, ($r = -0,01$ a $-0,07$), enquanto são fracos nos poços manuais ($r = -0,36$) – Tabela 9.3.

Tabela 9.3: Coeficiente de Correlação de Spearman entre Precipitação e Nível d’água – poços com transdutor de pressão com leituras de 15 em 15 min. e leituras manuais semanais.

NA x precipitação			
Diver (frequência de 15 em 15 min)		Manual (frequência semanal)	
PM6	-0,07	P2	-0,36
PM8	-0,01	P4	-0,36
P8	-0,01	PM2	-0,36
P10	-0,02		

As ínfimas correlações dos dados automatizados são explicadas pela intensa variação da pressão atmosférica ao longo do dia, refletindo nas leituras de 15 em 15 min., ao passo que precipitação se altera mais lentamente. Além disso, essa correlação foi realizada com pares de dados correspondentes ao mesmo tempo, não levando em

consideração o período de defasagem entre a precipitação e a resposta do nível de água a esse *input*.

Na correlação do nível de água dos poços automatizados, a partir de medidas quinzenais e mensais, com o total de precipitação correspondente, os valores de correlação se elevaram nesta ordem (Tab. 9.4 e 9.5), ratificando com isso a eliminação da influência da intensa variação barométrica e a existência de um tempo de defasagem entre a precipitação e resposta do nível de água.

Os valores de correlação encontrados nesta etapa para os dados automatizados e manuais mensais (Tab. 9.5) se aproximam aos encontrados na primeira etapa do trabalho especialmente os poços PM8, P8 e PM2.

Tabela 9.4: Coeficiente de Correlação de Spearman Precipitação e N.A. com frequência quinzenal.

Poços com <i>Divers</i>		Poços manuais	
PM6	-0,32	P2	-0,36
PM8	-0,14	P4	-0,36
P10	-0,26	PM2	-0,36
P8	-0,16		

Tabela 9.5: Coeficiente de Correlação de Spearman Precipitação e N.A. com frequência mensal.

Poços com <i>Divers</i>		Poços manuais	
PM6	-0,79	P2	-0,77
PM8	-0,70	P4	-0,38
P8	-0,51	PM2	-0,80
P10	-0,55		

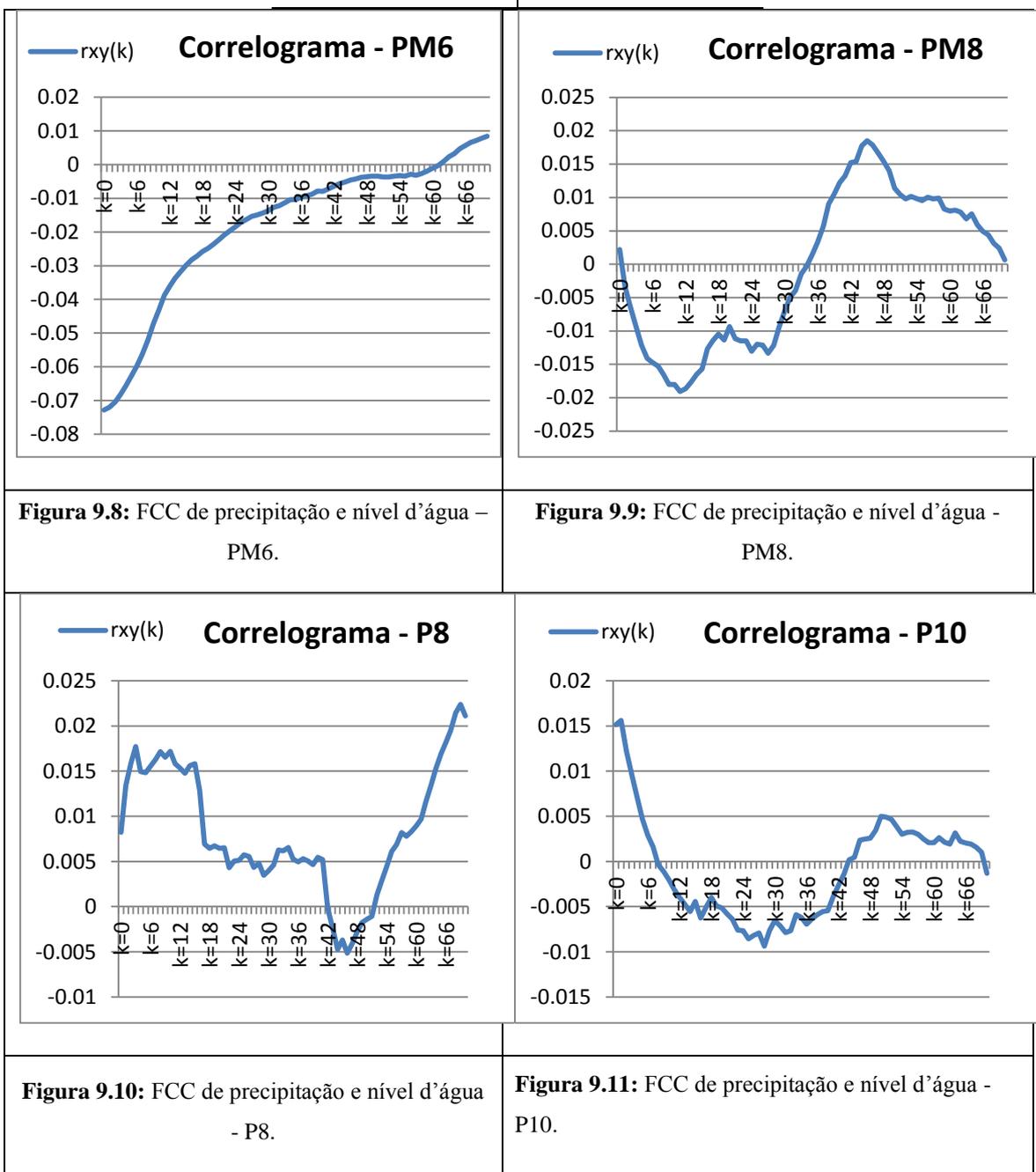
Notaram-se moderados valores de coeficiente de correlação de frequência mensal (Tab. 9.5) nos PM6, PM8, PM10 a forte no PM2, enquanto nos poços profundos, referentes ao aquífero fissural, os valores de correlação foram variáveis, entre fraco (P4) e moderado (P2 e P8). Esse resultado é perfeitamente compatível com a condição hidrogeológica apresentada, pois o aquífero freático está mais deliberadamente exposto à precipitação direta, e a fraca correlação em P4 deve-se a localização deste poço a cerca de 10 m do córrego Engenho Nogueira, no seu trecho a céu aberto, que pode estar promovendo uma possível recarga indireta.

Confirmada a influência da precipitação no nível d'água, foram feitos correlogramas de Função de Correlação Cruzada (FCC) com a finalidade de se identificar, em cada poço e piezômetro, qual o tempo gasto para que a chuva atingisse,

de forma significativa, o nível potenciométrico dos aquíferos. Foram usados dados diários e restritos aos poços com transdutores de pressão, de modo a se obter maior confiabilidade nos resultados. Obtiveram-se defasagens de tempo de 45 e 70 dias para os piezômetros (Tab.9.6; Figs 9.8 e 9.9) e de 50 a 69 dias para os poços profundos (Tab. 9.6; Figs 9.10 e 9.11).

Tabela 9.6: Defasagem de tempo (dias) entre a Precipitação e o NA, nos poços, por análise de FCC.

Piezômetro	Lag (dias)	Poço Profundo	Lag (dias)
PM6	70	P10	50
PM8	45	P8	69



Todos esses valores obtidos são um “desafio” ao entendimento do comportamento hidrodinâmico do sistema aquífero, conforme as considerações a seguir.

O nível d'água do aquífero granular é muito semelhante entre os pontos analisados, conforme a Tabela 9.1: Mediana = 5,72m e 5,30m para PM6 e PM8, respectivamente, e Média = 5,45m e 5,79m para os mesmos poços, respectivamente. Entretanto, o nível no PM8 responde completamente com 45 dias, aos *inputs* de infiltração, isto é, 25 dias antes do que o PM6 (70 dias), mesmo estando ambos com praticamente a mesma profundidade máxima na seca (6,8m e 6,9m). É razoável se pensar como causa dessa grande diferença os contextos hidrogeológicas e texturais da zona não saturada de ambos os locais: enquanto o PM6 atravessa em todo o seu perfil de 15 m de profundidade, um solo residual de gnaiss, o PM8 possui uma camada de até 3,9 metros de aterro, seguido de até 6,6m de argila plástica orgânica e solo residual até o fundo. Ou seja, a camada de argila de 2,5m de espessura diretamente sob o aterro, pode estar funcionando como uma barreira hidráulica e resultando numa condição local de aquífero suspenso, condição essa que pode estar provocando uma manutenção do nível de água em cotas mais elevadas por mais tempo, diminuindo, assim o tempo de resposta das frentes de infiltração. Além disso o tipo de aterro existente no local, tende a ser bastante poroso, facilitando a infiltração.

No local do PM6, sabe-se que o saprolito, embora se apresente com textura arenosa quando manuseado, as argilas presentes como produtos de alteração do gnaiss, diminui a permeabilidade do meio.

Quanto aos poços profundos, P10 e P8, ambos situados na planície aluvionar do córrego Engenho Nogueira, possuem médias de profundidade de NA muito próximas entre si, ao redor de 7m (Tab. 9.1). Os perfis texturais de ambos poços são também muito semelhantes, constituídos de uma espessa camada de argila orgânica plástica, contínua, nos primeiros 6m no P10 e nos primeiros 8 metros no P8. Abaixo dessa camada argilosa, ocorrem intercalações de argila e areia a até 22m (P8) e 24m (PM8), em proporções semelhantes em cada perfil. Isto posto, os 2m de argila encontrados a mais no topo do solo onde se situa o P8 pode ser responsável pela diferença de resposta da recarga direta entre os dois locais: 19 dias a mais na localidade do P8 (69 dias) em relação ao P10 (50 dias).

É importante ressaltar que esses tempos de resposta do NA às precipitações calculadas por FCC referem-se ao tempo final do processo de chegada de toda a frente de recarga.

Outro cálculo foi realizado, desta vez para se obter o tempo inicial de chegada da primeira frente de recarga, tomando-se como ponto de partida a defasagem inicial, por meio de correlação de *spearman*, adotando-se *lags* crescentes (a partir de 5 dias). O *lag* que apresentou o maior coeficiente de correlação em cada poço foi considerado como representativo do tempo de resposta do nível d'água à chuva (Tab. 9.7 e 9.8). As correlações foram moderadas (0,6 a 0,7), consideradas satisfatórias, se admitidas as variáveis físicas que não foram contempladas nesta análise, como a espessura da zona não saturada e textura do solo.

Assim, para os PM6 e PM8 os tempos de resposta foram de 10 e 20 dias (Tab. 9.7), respectivamente, enquanto que na FCC eles foram de 70 e 45 dias, respectivamente. Quanto aos poços profundos P8 e P10, os tempos de resposta iniciais obtidos foram de 20 e 28 dias (Tab. 9.8), respectivamente, enquanto que na FCC eles foram de 69 e 50 dias, respectivamente.

Tabela 9.7. Correlação *Spearman* entre NA e precipitação com *lag* em dias para os piezômetros.

PM6

r	Lag 6	Lag 7	Lag 8	Lag 9	Lag 10	Lag 11	Lag 15	Lag 20	Lag 25	Lag 30
-0,19	-0,45	-0,28	-0,30	-0,50	-0,61	-0,33	-0,38	-0,40	-0,37	-0,33

PM8

r	Lag 5	Lag 6	Lag 7	Lag 8	Lag 9	Lag 10	Lag 11	Lag 12	Lag 13	Lag 14	lag 15	lag 17	lag18	lag19	Lag 20	Lag 21	Lag 25	Lag 30
-0,04	0,19	0,01	-0,02	-0,04	-0,07	-0,34	-0,09	-0,09	-0,11	-0,15	-0,60	-0,60	-0,65	-0,70	-0,71	-0,23	-0,28	-0,57

Tabela 9.8. Correlação *Spearman* entre NA e precipitação com *lag* em dias para os poços profundos.

P8

r	Lag 5	Lag 6	Lag 7	Lag 8	Lag 9	Lag 10	Lag 11	Lag 12	Lag 13	Lag 14	Lag 15	Lag 16	Lag 18	Lag19	Lag 20	Lag 21	Lag 25	Lag 30
-0,09	-0,05	-0,11	-0,13	-0,14	-0,15	-0,15	-0,18	-0,19	-0,19	-0,19	-0,48	-0,48	-0,50	-0,50	-0,52	-0,30	-0,30	-0,47

P10

r	Lag 5	Lag 6	Lag 7	Lag 8	Lag 9	Lag 10	Lag 11	Lag 12	Lag 13	Lag 14	Lag 15	Lag 20	Lag 25	Lag 26	Lag 27	Lag 28	Lag 30	Lag 35	Lag 40
-0,09	-0,05	-0,11	-0,13	-0,14	-0,16	-0,18	-0,19	-0,20	-0,21	-0,22	-0,30	-0,30	-0,33	-0,33	-0,40	-0,59	-0,48	-0,48	-0,48

Comparando-se os resultados por FCC por aquífero, ou seja, 45-70 dias no aquífero granular e 50-69 dias no aquífero fissural, bem como por *Spearman*, isto é, 10-20 dias no aquífero granular e 20-28 dias no aquífero fissural, constata-se que não há diferenças discrepantes de tempo de resposta de cada aquífero poroso e fissural à precipitação, apontando para uma forte conexão hidráulica entre os dois meios.

Alguns autores como Ferrari & Karmann (2007) e Lee & Lee (2000) identificam a Função de Autocorrelação como determinante da “memória” do aquífero, avaliando, por exemplo, o tempo em que o aquífero leva para se “esquecer” de um evento que o influencie, neste caso, a entrada de água, por meio de infiltração efetiva. Assim a FAC auxilia na compreensão dos valores da correlação cruzada, já que os valores da FAC representam o tempo em que o aquífero “esquece-se” de um *in put* enquanto os valores de correlação cruzada mostram o tempo que leva para esse *in put* atingir de fato o aquífero. Os valores calculados da FAC para o aquífero granular foram de 45 e 25 dias, nos poços PM6 e PM8, respectivamente, e para o aquífero fissural, de 60 dias nos dois poços profundos P8 e P10 (Tab.9.9 e Fig. 9.12 a 9.15). O maior tempo gasto para se desfazer da memória do PM6 em relação ao PM8 deve-se à maior quantidade de água infiltrada que esse aquífero recebe.

A menor FAC observada nos aquíferos granulares se deve à sua maior condutividade hidráulica, fazendo com que as saídas de água neste aquífero sejam mais rápidas. Em razão dos aquíferos fissurais serem fortemente anisotrópicos e terem mais baixa condutividade hidráulica, requerem maior tempo para que o aquífero “se desfaça” de um evento de recarga, resultando num maior tempo de memória do aquífero.

Tabela 9.9. Valores da Função de Autocorrelação (FAC) para piezômetros (PM) e poços profundos (PP), em dias.

PP/PM	FAC
PM6	45
PM8	25
P10	60
P8	60

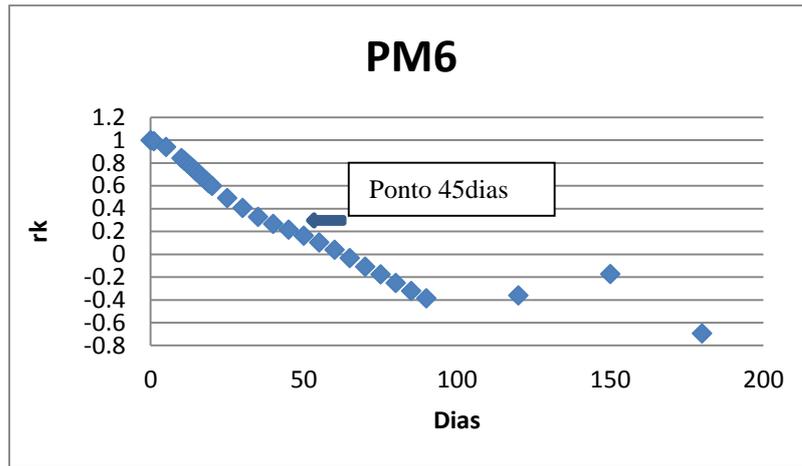


Figura. 9.12: Correlograma da FAC para o PM6.

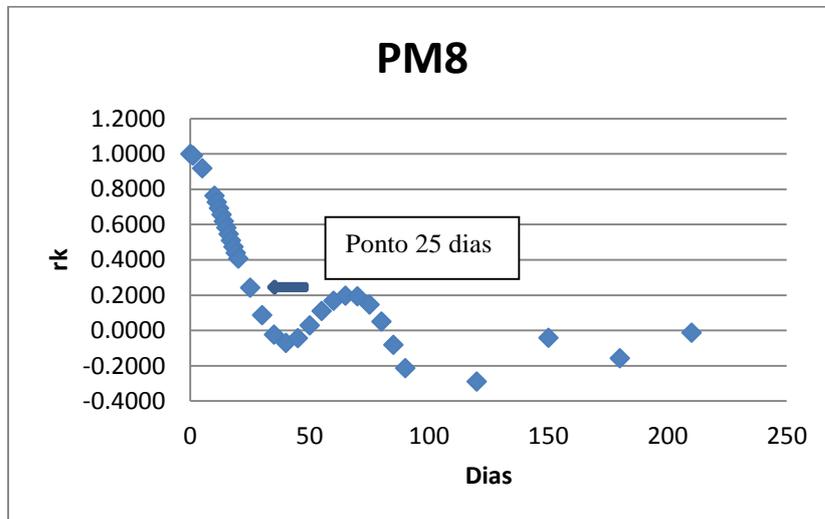


Figura 9.13: Correlograma da FAC para o PM8.

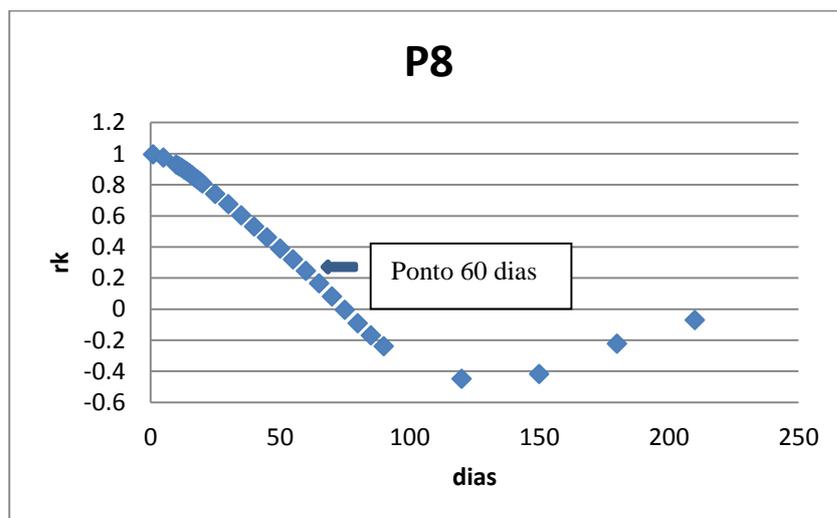


Figura 9.14: Correlograma da FAC para o P8.

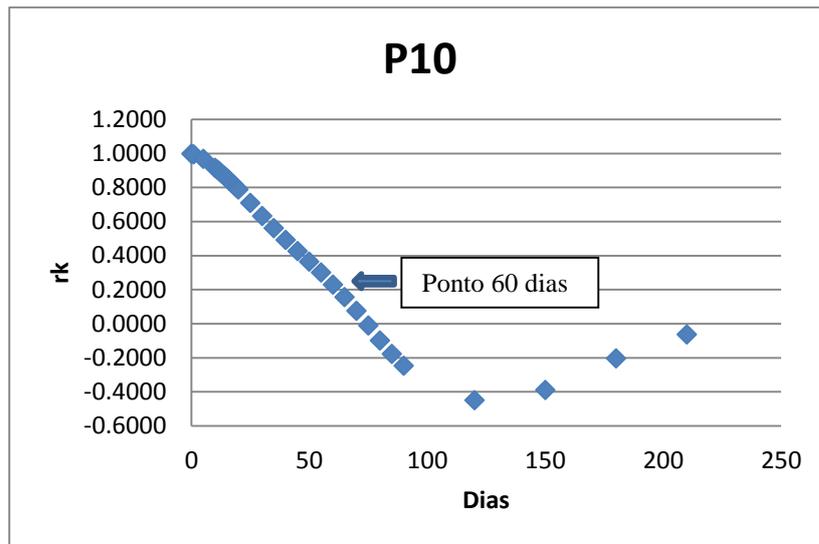


Figura 9.15: Correlograma da FAC para o P10.

Segue um resumo das correlações realizadas FCC, Spearman e FAC (Tab. 9.10), de onde se extrai as seguintes constatações e hipóteses sobre as características hidrogeológicas observadas pontualmente, para explicar os valores encontrados:

- Quanto ao aquífero granular, a resposta inicial à infiltração se dá mais rapidamente no PM6 (solo residual arenoso e siltoso), 10 dias, em relação ao PM8 (aquífero suspenso de aterro argilo arenoso), entretanto a sua resposta final é bastante demorada, 70 dias, refletindo o elevado volume de água infiltrado (maior Δh obtido, 3,9m); o maior tempo obtido na FAC (45 dias) corrobora essa informação, pois levará mais tempo para que o aquífero se desfaça dos eventos de grande recarga observada. No PM8, apesar da resposta inicial ser mais demorada (20 dias), a resposta final à recarga é mais rápida, assim como o tempo para se desfazer dos eventos de infiltração, uma vez que a barreira impermeável sotoposta argilosa, deve provocar fluxos horizontais, além de um menor volume infiltrado nesse local.
- As condições hidrogeológicas do aquífero fissural, como esperado, são muito semelhantes conforme pode ser atestado pelo mesmo e elevado tempo obtido na FAC (60 dias). Porém o tempo inicial de resposta à infiltração no P8 é 8 dias mais cedo do que em P10, mesmo possuindo 2 metros a mais da uma camada argilosa orgânica no topo da zona não saturada. Apesar de próximos, o Δh do P8 (1,15m) é 18% maior do que do P10 (0,94m), mostrando uma maior facilidade de entrada de água nessa localidade do que em P10, possivelmente devido à presença de lentes arenosas observadas nesse pacote argiloso (ANEXO 13), conforme descrição obtida.

Isso pode explicar também o maior tempo que leva o P8 para responder completamente à frente de recarga, 69 dias na FCC, em relação ao P10, que é de 50 dias.

Tabela 9.10. Valores encontrados de *lag* (em dias) por meio da Função de Correlação Cruzada (FCC), Spearman e Função de Auto correlação (FAC).

	FCC	Spearman	FAC
PM6	70	10	45
PM8	45	20	25
P8	69	20	60
P10	50	28	60

9.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEXTURA DO SOLO NA RECARGA

Para esta análise foi utilizado o mesmo método empregado na primeira etapa do trabalho, comparando o percentual da textura com a infiltração do período.

A infiltração (efetiva) foi calculada pelo somatório das variações de acréscimo da carga hidráulica diária de NA observados no período dos 8,5 meses de monitoramento e expresso em metros de coluna d'água. Entre os piezômetros, o que apresentou maior (Δh) foi o PM6 (3,9 m), seguido pelo PM8 (2,79 m) e PM2 (2,64 m) (Tab. 9.11).

O PM6 é classificado como “predominância de areia” e o PM2 e PM8 são classificados como “Mistura de areias e argilas”.

Tabela 9.11. $\Delta \Sigma h$ de frequência diária com a textura dos solos nos piezômetros por 8,5 meses .

Textura	Predominância de areia	Mistura (areia e argila)	Média
Poço de monitoramento	PM6	PM2/PM8	-
$\Sigma \Delta h$ (m)	3,90	2,64/2,79	3,11

Quanto aos poços profundos, observou-se, que o P2, P8 e P10 tiveram valores de infiltração semelhantes entre si, com o P2 apresentando o maior valor, 1,37 m, seguido pelo P8, 1,15 m e o P10 com 0,95 m (Tab. 9.12). O poço com maior Δh foi o P4, com 5,5 m. de coluna d'água, explicado não por suas características de textura de solo, mas por sua posição a menos de 10 m da porção não canalizada do CEN, que certamente o influencia, indicando a conexão do aquífero com o córrego.

Tabela 9.12. $\Delta\Sigma h$ de frequência diária com a textura dos solos nos piezômetros por 8,5 meses para os poços profundos.

Poço profundo	P2	P4	P8	P10	Média (excluso P4)
$\Sigma\Delta h$ (m)	1,37	5,5	1,15	0,94	1,15

É notório que a elevação do nível d'água no meio granular seja 2,7 vezes maior do que no meio fissural. Ao menos duas possibilidades podem ser atribuídas para esta discrepância: i) o fluxo lateral dentro do aquífero poroso não permite que toda a água nele recarregada escoe verticalmente para o aquífero fissural; ii) provável existência de um tempo mais prolongado para a elevação completa do nível d'água no meio fraturado.

9.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DO NÍVEL POTENCIOMÉTRICO NA RECARGA

Antes da análise da importância da profundidade no nível d'água na recarga, foi feita a comparação entre a média da profundidade de NA entre as medições feitas pelo PROHBEN, entre 1997 e 2000, e as medições feitas para este trabalho. Constatou-se que, invariavelmente houve um rebaixamento anual do NA neste período (Tab. 9.13 e 9.14). Este rebaixamento é sutil, da ordem de centímetros nos poços e piezômetros, e pode ser atribuído às variações de precipitação anual.

Entretanto, o rebaixamento do NA no presente trabalho é mais expressivo do que nos anos anteriores. Nesta comparação a diferença de NA chega a mais de um metro em todos os poços de monitoramento (Tab. 9.13). Nos poços profundos a diferença entre as médias de nível d'água entre 97/98 e os dados do presente trabalho ficam próximos a um metro (Tab.9.14). Entre todos os poços (profundos e de monitoramento) o único que apresentou valor positivo de diferença de NA com o ano hidrológico de 97/98 foi o P4, porém, deve-se avaliar que o mesmo está localizado próximo à seção aberta do CEN, como anteriormente informado.

Tal rebaixamento pode ser reflexo do aumento considerável do número de prédios e estacionamentos dentro da área do campus desde o ano 2000, em detrimento das áreas passíveis de infiltração de água. A canalização do córrego Engenho Nogueira e outras obras, como a instalação de drenos, executadas com o intuito de evitar enchentes, também podem interferir na conexão entre aquífero e córrego, o que auxilia

neste rebaixamento. Poços em constante operação, como o caso do P3 (CDTN) também influenciam igualmente no rebaixamento do NA.

Tabela 9.13. Valores das médias anuais de profundidade do nível estático para os dois momentos de monitoramento - piezômetros. Em metros.

Piez.	97/98	98/99	99/00	12/13	Diferença 97/98 a 12/13
PM2	5,32	5,90	6,15	7,14	-1,82
PM6	4,08	4,95	4,84	5,45	-1,37
PM8	4,28	4,62	4,81	5,78	-1,5

Tabela 9.14. Valores das médias anuais de profundidade do nível estático para os dois momentos de monitoramento – poços profundos. Em metros.

Poço	97/98	98/99	99/00	12/13	Diferença 97/98 a 12/13
P2	3,37	3,48	3,77	4,03	-0,66
P4	6,5	6,97		5,12	1,38
P8	6,09	6,12	6,15	6,97	-0,88
P10	5,77	5,92	5,97	6,90	-1,13

A influência da profundidade do nível potenciométrico na recarga foi testada por meio de correlações entre o nível estático e o Δh observado. As ínfimas correlações observadas na maioria dos poços demonstraram que a profundidade do nível d'água não tem influência significativa na recarga (Tab. 9.15).

Somente o poço P4 apresentou valor de correlação moderada, o qual se encontra muito próximo à porção não canalizada do córrego Engenho Nogueira, indicando estar sofrendo influência recarga localizada do córrego.

Verificou-se ainda que a correlação entre NA e Δh do P2 é positiva, ou seja, quanto maior a profundidade do nível d'água maior Δh , ou seja, um comportamento “aparentemente” incoerente. Ocorre que o local do P2 é um pântano em que foi instalado um sistema de dreno para escoamento das águas sub-superficiais, alterando substancialmente a dinâmica natural dessas águas no terreno. Assim quando há excedente hídrico na época de chuva, o que em condições naturais provocaria maior infiltração (elevação do Δh), o excesso é drenado, limitando a infiltração e refletindo na análise de correlação.

Tabela 9.15: Coeficientes de correlação de Spearman (r) entre profundidade Nível d'água e Δh , com frequência de 15 minutos.

Poço	(r)
P2	0,26
P4	-0,55
PM2	-0,27
PM6	-0,01
PM8	-0,01
P8	-0,01
P10	-0,01

9.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA RECARGA

Junto a cada piezômetro monitorado com *diver* (PM6 e PM8) e manualmente (PM2) foi criada uma circunferência centrada no poço, com raio de 30 metros, e calculou-se a área ocupada por prédio, asfalto, grama e paralelepípedo circunscritos totalizando 2.885 m² (Fig. 9.16, 9.17e 9.18). Os pesos atribuídos a cada um desses usos foram relacionados com o potencial de infiltração, do menor para o maior, na seguinte ordem (Tab. 9.16), tendo com o referência os estudos de MAUS *et al*, 2007:

- 0 para asfalto e prédios – menor potencial
- 0,5 para paralelepípedos (pé-de-moleque) – baixo potencial
- 1 para árvores (copa) – potencial intermediário
- 1,25 para grama – máximo potencial

O índice de influência foi calculado pela média ponderada de cada classe de uso do solo associado ao peso da influência sobre a infiltração das respectivas classes. Quanto maior esse índice, teoricamente, maior seria a infiltração. Entretanto, o PM2, apesar de possuir o maior índice teve um menor $\Sigma\Delta h$. Porém, levando-se em conta que a maior parte da zona vegetada desse polígono é de árvores e não de gramínea, é possível que essas árvores desempenhem uma barreira à infiltração, por conta de processos de interceptação e escoamentos superficiais preferenciais, indicando necessidade de reavaliação do peso desse fator. O PM6 apresenta o maior $\Sigma\Delta h$ e a maior área de grama, ou seja, tem a maior área propícia à infiltração, sem que as copas das árvores interceptem a chuva e sem paralelepípedos e asfalto que impedem a infiltração. Por fim o PM8, assim como o PM2 tem grande área coberta pelas copas de árvores que interceptam a infiltração, mas diferente do PM2, a área de paralelepípedo é maior, o que pode interferir de forma mais positiva na infiltração.

Tabela 9.16. Valores de área e peso dos usos e ocupações do solo para cada piezômetro.

Piezômetro	Asfalto m ²	Paralelepípedo m ²	Gramma m ²	Árvores (m ²)	Índice de influência sobre	ΣΔh m
PM2	324,16	0	256,08	2304,76	0,91	2,64
PM6	662,13	885,37	1203,75	133,75	0,72	3,90
PM8	921,81	119,05	92,20	1751,93	0,67	2,79
Peso	0	0,5	1,25	1	1,25 (max)	
Área Total:	2885 m²					



Figura 9.16. Imagem do PM2, com buffer de 30m. Usos e ocupações do solo.



Figura 9.17. Imagem do PM6, com buffer de 30m. Usos e ocupações do solo.



Figura 9.18. Imagem do PM8, com buffer de 30m. Usos e ocupações do solo.

9.5 CONEXÃO HIDRÁULICA ENTRE OS AQUÍFEROS POROSO E FISSURAL

Utilizaram-se os dois pares de poços monitorados (Piezômetro-Poço Profundo) com *divers* e que se encontravam sob condições naturais de variação do NA para a investigação da conexão hidráulica entre os aquíferos, poroso e fissural: PM6/P10, distantes 170 metros um do outro e PM8/P8, distantes 240 metros um do outro, usando valores de 15 em 15 min durante todo o período monitorado. O par PM1/P3 não pode ser usado devido à operação do P3, que influencia diretamente o PM1.

Os resultados dos dois pares de poços confirmam os resultados obtidos na primeira etapa, mostrando uma forte conexão hidráulica entre os aquíferos (Tab. 9.17). Mesmo na porção ao norte da área de estudo, onde ocorre uma lente de argila selante, que dificultaria esta conexão, os resultados mostraram boa correlação.

Tabela 9.17. Correlação entre os pares de piezômetros e poços de monitoramento.

PM6/P10	PM8/P8
0,783	0,772

Para se caracterizar a conexão entre os aquíferos, foram aplicadas correlações cruzadas do nível d'água entre os dois aquíferos, de modo a se obter o tempo que a água do aquífero granular leva para iniciar o processo de recarga (indireta) ao meio fissural. A FCC aplicada aos pares de poços PM6/P10 e PM8/P8 resultou em um período de um dia para a recarga começar a ocorrer (Tab. 9.18; Fig. 9.9 e 9.20).

Tabela 9.18. Tempo de início de resposta de escoamento da água do aquífero poroso para o fissural, calculado por FCC em dias.

Par de poços	Lag (dia)
PM8/P8	1
PM6/P10	1

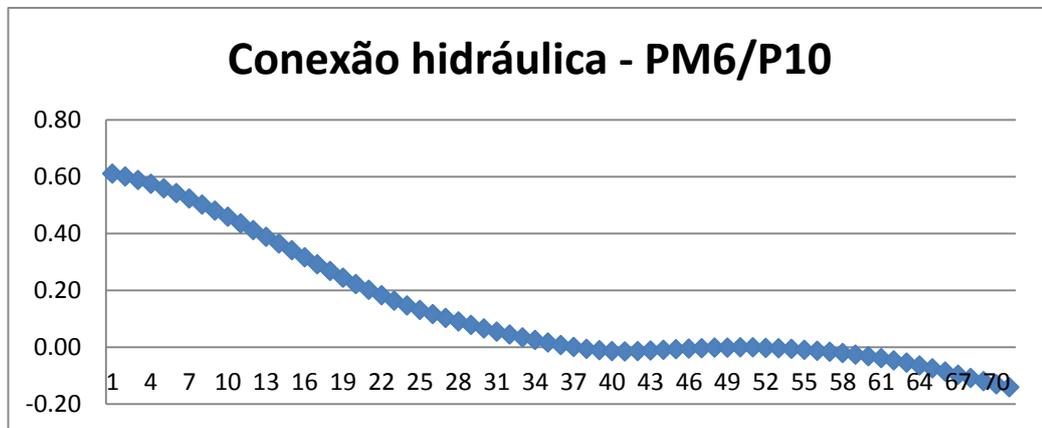


Figura 9.19. Correlograma FCC entre NA de poço e piezômetro – PM6 e P10 (r_{xy} ($k=1$ dia)).

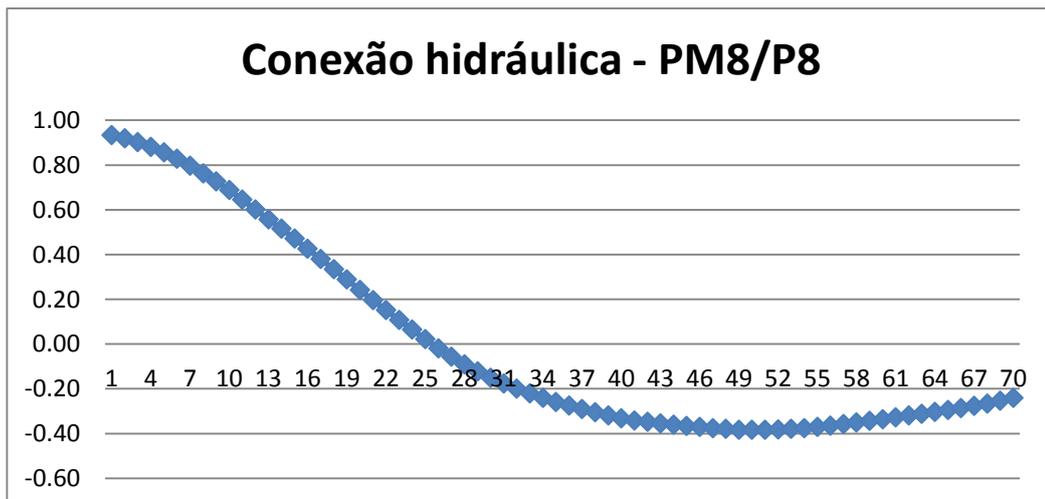


Figura 9.20: Correlograma FCC entre NA de poço e piezômetro – PM8 e P8 (r_{xy} ($k=1$ dia)).

9.6 PARÂMETROS FÍSICOS DOS AQUÍFEROS – CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (K), TRANSMISSIVIDADE (T) E ARMAZENAMENTO ESPECÍFICO (SY)

Foram realizados dois ensaios de condutividade hidráulica (K) do aquífero poroso intergranular por *slug tests* em 4 piezômetros, um no final da estiagem (outubro/novembro), e outro no período de chuvoso (fevereiro).

Os resultados mostraram uma boa homogeneidade de valores de K, com média geral das duas campanhas de 3,9E-05 cm/s. O único valor discrepante ocorreu PM1 (CDTN) com duas ordens de grandeza abaixo do que os demais locais – 1,9E-07 a 2,9E-07 cm/s. Desse modo, a condutividade hidráulica média dos demais pontos é de 5,2E-05 cm/s, representativo de materiais argilosos a silto-argilosos (FETTER, 2011).

Tabela 9.19. Valores de K obtidos em slug test.

1° - Out. e Nov. 2012			2° Fev. /2013		
Poço	m/seg	cm/seg	Poço	m/seg	cm/seg
PM1	2,89E-09	2,89E-07	PM1	1,87E-09	1,8718E-07
PM2	1,05E-07	1,05E-05	PM2	3,7E-07	3,70E-05
PM6	3,98E-07	3,97E-05	PM6	7,69E-07	7,69E-05
PM8	4,46E-07	4,46E-05	PM8	7,14E-07	7,137E-05

Os parâmetros K, T, S do aquífero fissural foram determinados em testes de bombeamento realizados a partir dos dados de variação do NA obtidos no *diver* instalado no poço ativo P3 do CDTN. Os dados foram analisados no software *Aquifer Test*, no qual optou-se pelas soluções de Neuman e sua simplificação proposta por Cooper-Jacob e de Theis (Tab. 9.20), sendo todas estas soluções para aquífero livre.

Também foi feito um teste de bombeamento pela empresa Hidropoços neste mesmo poço, no mesmo período, sob demanda do CDTN.

Tabela 9.20. Média dos resultados do teste de bombeamento pela solução de Neuman, com dados do *diver* e os resultados da empresa Hidropoços.

	Neuman	Teste Hidropoços
T (cm ² /s)	0,05	1,3
S	5,12E-3	
Sy	0,1	

9.7 RECARGA 2º ETAPA

Para o cálculo da recarga anual direta (equação 9.1) utilizou-se o valor de $S_y = 0,1$, determinado em testes de bombeamento com dados do P3 que esteve em operação ao longo do monitoramento (Tab. 9.21).

Os resultados dos testes de bombeamento apontam para variações nos valores da transmissividade (T) e de S, porém os valores de rendimento específico (S_y) foram absolutamente iguais em todos os testes.

Tabela 9.21. Valores de teste de bombeamento com dados retirados do *diver* instalado no P3.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
T	0,06	0,02	0,06	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04	0,08	0,07	0,05
S	1,42E-03	5,94E-03	4,86E-03	1,02E-02	2,45E-03	4,01E-03	6,90E-03	3,47E-03	6,90E-06	5,94E-03	5,12E-03
S_y	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Os valores de $\Sigma\Delta h$ foram os obtidos na escala de tempo semanal, somando-se todas as elevações do NA.

Apesar de o período monitorado ter sido de oito meses e meio meses salienta-se que a recarga calculada é representativa do ano hidrológico 2012/2013, uma vez que no período não monitorado (maio, junho, julho e agosto) a precipitação é ínfima e o Δh é predominantemente negativo entre uma medição e outra. A chuva que ocorreu no intervalo não monitorado (02/05/2013 a 16/08/2013) foi de apenas 59 mm e não teria trazido elevações significativas de Δh , tendo por isso sido descartada tal precipitação.

Os valores pontuais de recarga (Tab. 9.22) foram bastante semelhantes no PM2 e PM8, de 264 mm (28% de P) e 279 mm (29% de P), ambos localizados sob vegetação arbórea, enquanto o maior valor ocorreu no PM6 com 390 mm (41% de P), localizado em área com ocupação predominantemente gramínea e de textura de solos residuais.

Tabela 9.22. Valores de Recarga expressos em mm, calculados pelo método VNA para 8,5 meses de monitoramento

Piez.	$S_y^{(a)}$	$\Sigma\Delta h$	Recarga	% P	Precipitação no período monitorado 2012/2013
		(mm)	(mm/ano)		(mm)
PM2	0,1	2.640	264	28	956
PM6	0,1	3.900	390	41	956
PM8	0,1	2.790	279	29	956

(a) obtido por dados do *diver* do P3(CDTN) em operação durante monitoramento ago/2012 a mai/2013.

Trabalhos na área de estudo efetuados por Carvalho Filho (1997) apresentaram valores de recarga variando pontualmente de 20% a 42% da precipitação anual.

Foi determinado o volume de água que entrou por meio de recarga no aquífero granular a partir da média de $\Sigma\Delta h$ dos poços e da área do campus (Equação 9.1).

$$(\text{Valor médio de } \Delta h \times S_y) \times A \text{ - Equação 9.1}$$

Para se calcular o volume de água que atingiu o aquífero fissural foi utilizado um valor de S_y teórico médio, Maréchal *et al.* (2009) e Healy & Cook (2002), que calculam valores de S_y para aquíferos fissurais de 0,003, 0,09 e 0,015. Como o aquífero fissural estudado é formado por granitos e gnaisses do Complexo Belo Horizonte, localizado em uma região de pluviosidade semelhante ao da área estudada por Maréchal *et al.* (2009), optou-se por utilizar a média desses valores, S_y de 0,032.

O volume da recarga direta da chuva ao aquífero granular em 2012/2013 foi de 775.000 m³ (Tabela 9.23), enquanto no fissural foi de 109.200 m³. Considerando que a recarga do aquífero fissural é oriunda do aquífero granular, o volume líquido de água adicionado ao aquífero granular é na verdade de 685.000m³/ano. Sendo assim, cerca de 14% da água de recarga do aquífero granular recarregaria o aquífero fissural.

Tabela 9.23. Cálculo do volume de água recarregado em cada aquífero anualmente.

Poço	$\Sigma\Delta h$ (m)	S_y	$\Delta h \times S_y$	Média $\Sigma\Delta h \times S_y$ (m)	Área (m ²)	Volume total de recarga m ³	Volume líquido de recarga m ³
PM2	2,64	0,1	0,26				
PM6	3,90	0,1	0,39	0,31	2.500.000	775.000	665.800
PM8	2,79	0,1	0,28				
P2	1,55	0,036	0,0558				
P4*	0,70	-	-				
P8	1,15	0,036	0,0414	0,04368	2.500.000	109.200	109.200
P10	0,94	0,036	0,0338				

P4 não contabilizado por conta da sua natureza locacional restrita na área, junto ao córrego aberto.*

O restante excedente do aquífero poroso que não recarrega o aquífero fissural percola lateralmente em direção à Av. Antônio Carlos, conforme mostra o mapa potenciométrico (Fig.8.11 e 8.12), contribuindo para o escoamento básico da bacia.

Não existe na literatura específica um consenso de valor do volume seguro a ser explotado dos aquíferos. Porém a obtenção desses resultados consiste de uma

importante fonte de referência a partir da qual o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos do campus Pampulha pode se embasar.

9.8 MONITORAMENTO FÍSICO-QUIMICO

O monitoramento físico-químico foi realizado mensalmente em todos os piezômetros, para os seguintes parâmetros: pH, STD, ORP, T e CE, no período de setembro de 2012 a abril de 2013.

O pH das águas do aquífero granular são ácidas variando de 5,48 a 6,76 (Tab.9.25, Fig. 9.21). Verifica-se uma ligeira tendência de aumento do pH na época chuvosa, provavelmente em razão da diluição de ácidos orgânicos contidos nas águas meteóricas.

Tabela 9.25: Valores de pH para os piezômetros no período de monitoramento 2012/2013

Poço	pH							
	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.
PM1	6,73	6,53	6,50	5,87	6,76	6,68	6,63	6,63
PM2	5,84	5,84	5,59	5,60	5,48	5,67	5,56	5,62
PM6	6,62	6,29	6,30	5,80	5,58	6,60	6,31	5,60
PM8	6,50	seco	6,20	6,20	6,08	6,15	6,25	6,11

Máximo e mínimo em negrito

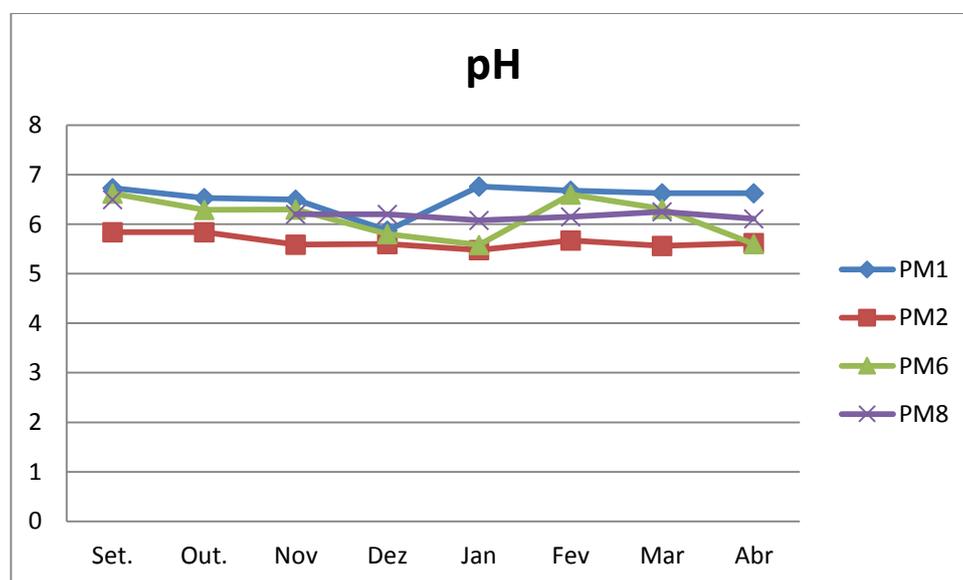


Figura 9.21: Variação do pH no aquífero poroso no período de monitoramento 2012/2013.

Os valores de ORP variaram de -115 a 257 mV, com tendência a um ambiente oxidante com tendência a aumento nos períodos chuvosos (Tab. 9.26, Fig. 9.22).

Tabela 9.26. Valores de ORP para os piezômetros ao longo do período de monitoramento.

ORP - mV								
Poço	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.
PM1	257	100	-	-15	68	-97	-105	-60
PM2	142	100	108	86	84	70	71	82
PM6	59	59	-8	81	111	-115	-55	76
PM8	30	-	23	39	65	13	-23	27

Máximo e mínimo em negrito.

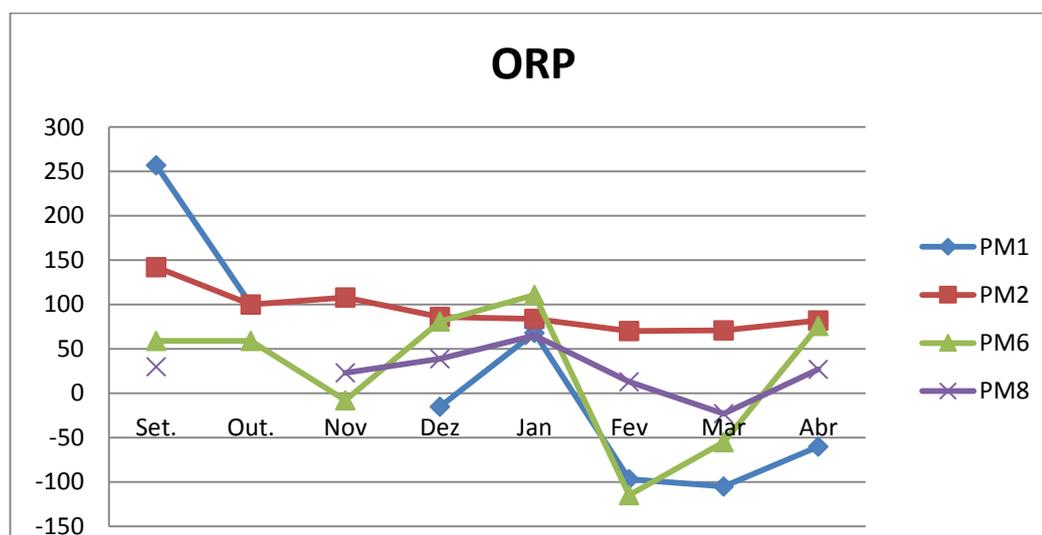


Figura 9.22: Comportamento do ORP ao longo do tempo de monitoramento.

O STD refletem diretamente o conteúdo de constituintes iônicos da água, sendo por isso, diretamente proporcional à condutividade elétrica. A temperatura também influencia na condutividade elétrica, mas no caso das águas subterrâneas, que tem pouca amplitude térmica, a temperatura tem pouca influência. Os valores encontrados para o STD variaram de 48,34 a 106,64 mg/L (Tab. 9.27, Fig. 9.23), enquanto a condutividade elétrica variou de 48,91 a 203,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tab. 9.28, Fig. 9.24), portanto, são águas pouco salinizadas, o que é esperado em clima úmido. Ambos os parâmetros tendem a se elevar no período chuvoso, uma vez que o processo de percolação da água infiltrada promove a dissolução de minerais na zona não saturada antes de atingir o aquífero.

Tabela 9.27. Valores de STD para os piezômetros.

STD - mg/L								
Poço	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.
PM1	124,40	111,10	95,90	59,70	128,70	126,6	100,10	-
PM2	52,47	53,20	64,40	55,40	33,11	41,30	41,20	45,62
PM6	131,30	149,00	61,47	44,49	32,14	116,30	85,75	30,52
PM8	132,60	-	78,70	85,70	57,80	68,11	100,90	54,43

Máximo e mínimo em negrito.

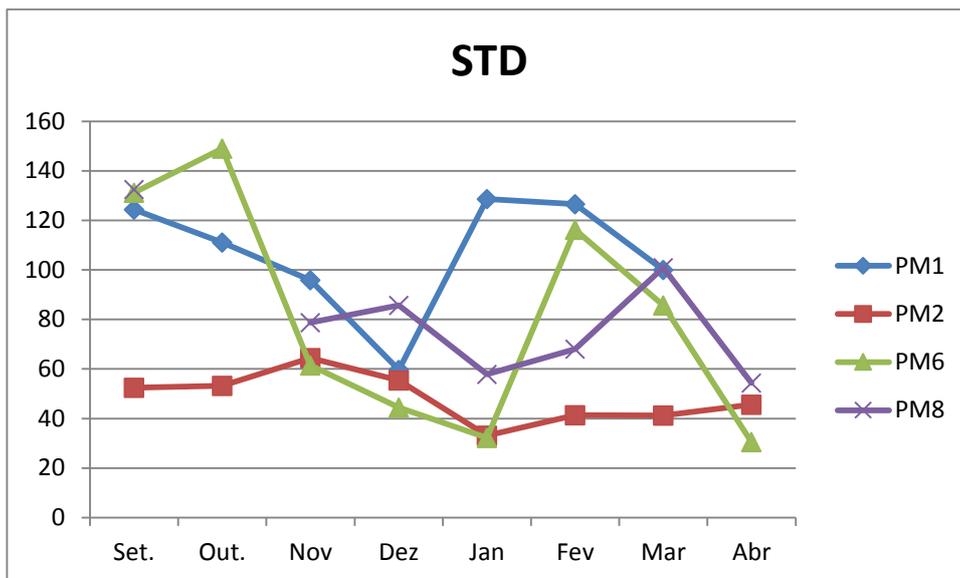


Figura 9.23: Comportamento do STD ao longo do período de monitoramento.

Tabela 9.28. Valores de Condutividade Elétrica nos piezômetros.

Condutividade elétrica - $\mu\text{S}/\text{cm}$								
Poço	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.
PM1	190,1	172,60	153,3	94,80	203,00	200,9	162,9	
PM2	80,91	83,90	100,6	88,62	52,76	66,08	65,77	72,91
PM6	198,8	203,60	94,50	70,84	51,49	185,20	137,80	48,91
PM8	201,70		121,30	137,40	92,49	109,20	162,00	87,32

Máximo e mínimo em negrito.

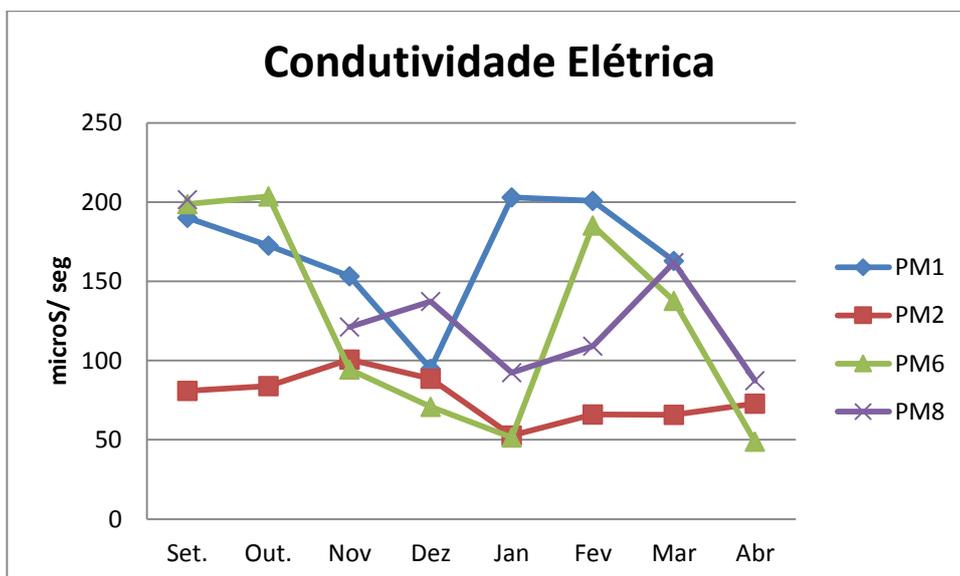


Figura 9.24. Gráfico do comportamento da Condutividade Elétrica ao longo do período de monitoramento.

Temperaturas mais elevadas aceleram reações químicas e nas águas subterrâneas a temperatura tem baixa amplitude. No monitoramento a variação foi de 23°C a 25°C (Tab. 9.29, Fig. 9.25).

Tabela 9.29: Valores da Temperatura para os piezômetros.

Temperatura – °C								
Poço	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.
PM1	24,6	23,7	24,0	24,7	23,7	23,5	23,1	-
PM2	24,1	23,5	23,8	23,9	23,5	23,0	23,1	23,1
PM6	25,1	24,6	24,5	24,7	25,0	24,7	24,6	24,8
PM8	24,1	-	24,2	24,7	24,6	24,0	23,7	23,9

Máximo e mínimo em negrito.

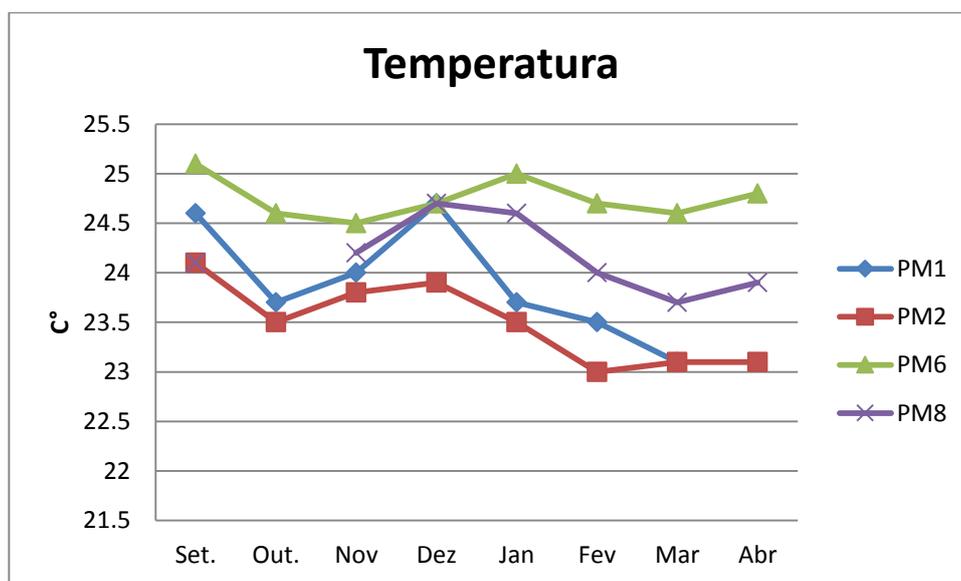


Figura 9.25: Comportamento da temperatura da água no período monitorado.

10. CONCLUSÕES

O tempo de chegada de toda a massa de água meteórica até o aquífero granular variou, espacialmente, de 45 a 70 dias e no aquífero fissural de 50 a 69 dias, enquanto que para a chegada das primeiras frentes de recarga, variou de 10 a 20 dias no aquífero granular e de 20 a 28 dias no aquífero fissural.

Existe uma forte conexão hidráulica entre ambos os aquíferos, com resposta quase imediata (menos de um dia), do aquífero fissural à chegada da recarga proveniente do meio granular.

Um possível efeito da impermeabilização ao longo do tempo pode ser observado a partir da constatação de um abaixamento dos aquíferos (1,37 a 1,82 metros no aquífero fissural e 0,66 a 1,13 metros no granular), quando comparados aos anos de 1997 a 2000 entre si, que foi da ordem de poucos centímetros.

A precipitação mostrou ser o principal fator de influência na recarga, enquanto a profundidade do NA não exibiu qualquer correlação.

A análise dos usos e ocupações do solo mostrou que elementos em superfície influenciam na recarga de forma conjunta com os tipos de solo. Áreas com muita incidência de argilas apresentaram menores variações no nível potenciométrico, áreas de solos residuais jovens apresentaram as maiores variações de nível potenciométrico, indicando o quanto cada material permite da entrada de água no solo.

As recargas foram medidas para o meio granular e variaram espacial e temporalmente de 10 a 41% da Precipitação dos respectivos anos hidrológicos de 1997 a 2000 e de 28-41% da Precipitação do ano hidrológico 2012/2013. Os menores pontuais de recarga para 2012/2013 - 264 mm (28% de P) e 279 mm (29% de P), foram calculados para piezômetros localizados sob vegetação arbórea, enquanto o maior valor (41% de P) ocorreu em piezômetro em área com ocupação predominantemente gramínea. Isso aponta fortemente para a influência do tipo de ocupação sobre a recarga

O aquífero granular teve variação de NA mais acentuada do que o aquífero fissural: 2,64 a 3,9 metros e 0,95 a 1,37 metros, respectivamente. Isso se dá, primeiramente, pela diferença de porosidade entre os dois aquíferos, que no aquífero granular permite que maior volume de água infiltre que o no aquífero fissural. A posição dos aquíferos também ajuda a compreender, o granular é sobrejacente ao fissural, localizado assim, mais próximo a superfície e, com isso, recebe sempre primeiro qualquer *in put* de infiltração o que resulta na variação mais acentuada do NA.

As variações do NA dentro do aquífero fissural permitiram uma avaliação preliminar de que, da água de recarga do aquífero granular (775.000 m³), cerca de 14% chegaria ao aquífero fissural (109.200 m³).

A caracterização hidroquímica das águas do aquífero granular resultaram em pH ácido variando de 5,48 a 6,76. Verifica-se uma ligeira tendência de aumento do pH na época chuvosa, devido à diluição de ácidos orgânicos contidos nas águas meteóricas. Os valores de ORP variaram de -115 a 257 mV, com tendência a um ambiente oxidante e elevação nos períodos chuvosos. Os valores de STD variaram de 48,34 a 106,64 mg/L, enquanto a condutividade elétrica variou de 48,91 a 203,6 µS/cm, portanto, são águas pouco salinizadas, o que é esperado em clima úmido. Ambos os parâmetros tendem a se elevar no período chuvoso, uma vez que o processo de percolação da água infiltrada promove a dissolução de minerais na zona não saturada antes de atingir o aquífero. No monitoramento a variação da temperatura das águas foi de 23°C a 25°C.

11. RECOMENDAÇÕES

Após o período de monitoramento ficou constatado que existe a necessidade de uma melhor manutenção nos poços (profundos e de monitoramento) dentro do campus. Em alguns casos de piezômetros as tampas de proteção estavam com dobradiças completamente quebradas, outros casos, poços profundos estavam tomados por cupinzeiros. Os poços de monitoramento necessitam de mais cuidado e melhor conservação para que haja proteção do aquífero à possíveis contaminações acidentais e que possam ser usados em futuros estudos.

A proposta que se faz, é que se instale uma cerca no entorno de cada poço (profundos e de monitoramento) e que se mantenha um monitoramento (periódico) manual em todos os poços. Com isso garante-se conhecimento dos aquíferos e possíveis rebaixamentos e a proteção dos poços.

O uso de sinalização visível identificando os poços e placas explicativas sobre hidrogeologia serviriam como ação de educação ambiental que se mostra pertinente, por que ao longo do período de monitoramento, em diversos momentos houve questionamentos e interesse sobre o trabalho por parte de alunos, funcionários e outros que passavam perto dos poços.

Após este estudo sugere-se, para a UFMG o uso secundário das águas subterrâneas para o abastecimento do campus em momentos de estresse hídrico, ou então em longos períodos de estiagem, também intercalando com o abastecimento feito pela Copasa, com isso será possível aproveitar um recurso de boa qualidade sem causar grandes impactos ao aquífero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Disponibilidade e demanda de recursos hídricos no Brasil. Cadernos de Recursos Hídricos, Brasília, 2007.

ANDRADE PINTO, E. J. de. ; SANTO LIMA, J. E. ; DAVIS, E. G.; SILVA, A. J. ; OLIVEIRA DANTAS, C. E. ; CANDIDO, M. O. ; PALMIER, L. R. & MONTE-MOR, R. C. Estimativa Da Recarga Natural Do Aquífero Livre De Uma Sub-Bacia Da Bacia Representativa De Juatuba (Mg) Aplicando O Método Da Variação Dos Níveis D'água (Vna). *In.: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços*, São Luís, MA, 2010.

BEATO, D. A. C.; MEDEIROS; M. J. ; DREWS, M. G. P. & DUTRA, G M. Impactos Urbanos em Águas Subterrâneas: Bacia da Lagoa da Pampulha, Belo Horizonte - MG. Belo Horizonte. Revista água subterrânea, nº 17, 2003.

BERTOL, G. A. Avaliação da Recarga Anual no Aquífero Bauru no Município de Araguari, Minas Gerais. Dissertação de mestrado, Pós-graduação em Geologia. Instituto de Geociências. UFMG. Belo Horizonte, 2007.

CARNIER NETO, D. & KIANG, C. H. Aplicação do Método de Flutuação de Nível da Água para a Estimativa de Recarga – Exemplo do Aquífero Rio Claro. *Rev. Águas Subterrâneas*, Vol. 22, n.01,2008.

CARVALHO FILHO, C. A. Caracterização Hidrodinâmica de Parte do Sistema Aquífero da Bacia do Campus – UFMG/ Belo Horizonte, Minas Gerais. 1997. 162 p. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1997.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINEIRAS - CPRM. Projeto Pampulha: Estudo hidrogeológico da bacia da Pampulha. Belo Horizonte. BEATO, D. A. C. (org), CPRM/PHB/P, 2001.

COSTA, W. D. Caracterização das condições de uso e preservação das águas subterrâneas do município de Belo Horizonte - MG. Tese de doutoramento, Programa de pós-graduação em Hidrogeologia. Instituto de Geociências. USP. São Paulo, 2002.

DAVIS, E. G; PINTO, E J. A. & BEATO, D. A. C. Projeto APA Sul RMBH: Estudos do meio físico, uso e disponibilidade dos recursos hídricos. Belo Horizonte, SEMAD/CPRM, 2005.

FEITOSA, F. A. C. & MANOEL FILHO, J. (org). Hidrogeologia Conceitos e Aplicações. 3ª ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID, UFPE, p391, 2008.

FERRARI, J. A. & KARMANN, I. Comportamento Hidrodinâmico de Sistemas Cársticos na Bacia do Rio Betari Município de Iporanga, SP. *Geol. USP Sér. Cient.*, São Paulo, v. 8, n. 1, p. 1-13, abril 2008.

FETTER, C. Applied hydrogeology. Prentice Hall, Londres, UK. 598 pp. 2001

HEALY, R. W. & COOK, P. G. Using Groundwater Levels To Estimate Recharge. *Hydrogeology Journal*, Vol. 10. p 91-109, 2002.

HIRATA, R. C. A. Slug e Bail Test. Curso de Hidrogeologia LAMO, USP, São Paulo, 2011.

LANDIM, P.M. B, MONTEIRO, R.C & CORSI, A.C. Introdução à confecção de mapas pelo software Surfer. *Geomatemática. Texto Didático 8*, DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, 2002. Disponível em:<www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>. Acesso em 15/ 5/2012

LEE, J. Y. & LEE, K. K. Use hydrologic time series data for identification os recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 229.2000. p190 -201.

LERNER, D. N. Groundwater Recharge In Urban Áreas. IAHS, Proceedings of the Duisberg Symposium, Birmingham, UK, 1990.

MARÉCHAL, J. C.; VARMA, M.R.R.; RIOTTE, J.; VOUILLAMOZ, J.M.; KUMAR,M.S.; RUIZ,L.; SEKHAR,M. & BRAUN,J.J. Indirect and direct recharges in a tropical forested watershed: Mule Hole, India. *Journal of Hydrology*, Vol. 364, 2009, p. 272 – 284.

MARRA, A. J. L. B. Caracterização das Águas Subterrâneas na Bacia do Córrego Engenho Nogueira – UFMG, Campus da Pampulha. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Escola de Engenharia, UFMG. Belo Horizonte, 2000.

MAUS, V. W.; RIGHES, A. A. & BURIOL, G. A. Pavimentos Permeáveis e Escoamento Superficial da Água em Áreas Urbanas. ANAIS. I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro-Oeste. Cuiabá, 2007.

MAZIERO, T. A. & WENDLAND, E. Variabilidade Espacial da Recarga em Área Urbana. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 13. n.3, São Paulo,2008,p. 35-46

NAGHETTINI, M & PINTO, E.J. Hidrologia Estatística. CPRM – Serviço Geológico Brasileiro, Belo Horizonte, 2007.

PINTO, E. J, A.; LIMA, J. E. S.; DAVIS, E. G.; SILVA, A. J.; DANTAS, C. E. O.; CANDIDO, M. O.; PALMIER, L. R. & MONTE-MOR, R. C. Estimativa Da Recarga Natural Do Aquífero Livre De Uma Sub-Bacia Da Bacia Representativa De Juatuba (Mg) Aplicando O Método Da Variação Dos Níveis D'água (Vna).ANAI. XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços – São Luís, Maranhão, 2010.

Prefeitura de Belo Horizonte. Programa DRENURBS - 2010. Disponível em: <<http://portalpbh.pbh.gov.br/>> Acesso entre janeiro e fevereiro de 2013.

PROJETO MANUELZÃO. UFMG. Belo Horizonte. Disponível em:
<http://www.manuelzao.ufmg.br/assets/files/Textos%20mobilizacao/1096_mapa_engenho_nogueira.JPG> Acesso entre julho e agosto de 2012.

REBOUÇAS, A. C. Águas subterrâneas. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. (Orgs.) Águas Doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. São Paulo: Escrituras, 2002. p.433-460. 2º Ed. São Paulo, Escrituras Editora, 2002.

SAMOHYL, R. W. Introdução à Estatística e Métodos de Previsão em Séries Temporais: Teoria Aprofundada e Prática Simplificada. Universidade Federal de Santa Catarina (NNQ), 2005.

SILVA, A.B.; CARVALHO, E.T.; FANTINELI, L.M.; ROMANO, A.W.; VIANA, C.S. Estudos geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos e geoambientais integrados no Município de Belo Horizonte. Relatório Final. Belo Horizonte. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. UFMG/IGC/FUNDEP, 1995. 150p.

SOUSA, A. Coeficiente de Correlação Linear de Pearson. Depto. Matemática. Disponível em:
<http://www.aurea.uac.pt/pdf_MBA/coef_correl_Pearson.pdf>. Acesso em 12/04/2012

VACCARO, A.; CALDERA, G. R ; GRANATO, M. F.; SOUZA, R. R. C. & NASCIMENTO, T. S. Relatório Parcial da Proposta de Diagnóstico Ambiental da Bacia do Córrego Engenho Nogueira. Trabalho Temático 1. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Departamento de engenharia Sanitária e ambiental, 2009.

VASCONCELOS, S. M. S.. Avaliação da Recarga Subterrânea Através da Variação do Nível Potenciométrico no Aquífero Dunas/Paleodunas em Fortaleza, Ceará. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol.10. n. 2, São Paulo, 2005.

WAHNFRIED, I. & HIRATA, R. C. A. Comparação de Métodos de Estimativa de Recarga de Aquíferos em Uma Planície Aluvionar na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo). RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 10. n. 2, São Paulo, 2005.

ANEXOS

Anexo 1. Piezômetro - PM1 – CDTN



ANEXOS

Anexo 2. Piezômetro - PM2 – Centro de Microscopia.



ANEXOS

Anexo 3. Piezômetro - PM6 – Creche.



ANEXOS

Anexo 4. Piezômetro - PM8 – Reitoria; leitura de diver sendo feita.



ANEXOS

Anexo 5. Poço Profundo - P2 – Bambuzal.



ANEXOS

Anexo 6. Poço Profundo - P4 – COLTEC.



ANEXOS

Anexo 7. Poço Profundo - P10 – DPFO – Belas Artes.



ANEXOS

Anexo 8. Diver.



ANEXOS

Anexo 9. Tarugo para execução de slug test.



ANEXOS

Anexo 10. Pluviômetro da estação meteorológica do CDTN.



ANEXOS

Anexo 11. Dados do teste de vazão feito no P3 pela empresa Hidropocos.

	TESTE DE BOMBEAMENTO
---	-----------------------------

Cliente: Comissão Nacional de Energia Nuclear	Autorização: Contrato 10.2885
Cidade: Belo Horizonte	Estado: MG
Local do Teste: Campus UFMG - Pampulha	Nossa Referência: Serviço N.º 742-12

EQUIPAMENTO DE TESTE			
Tipo:	Compressor Elétrico 60 PCM		
Tubo de Água - Profundidade:	78,00 (m)	Diâmetro:	2"
Tubo de Ar - Profundidade:	78,00 (m)	Diâmetro:	3/4"

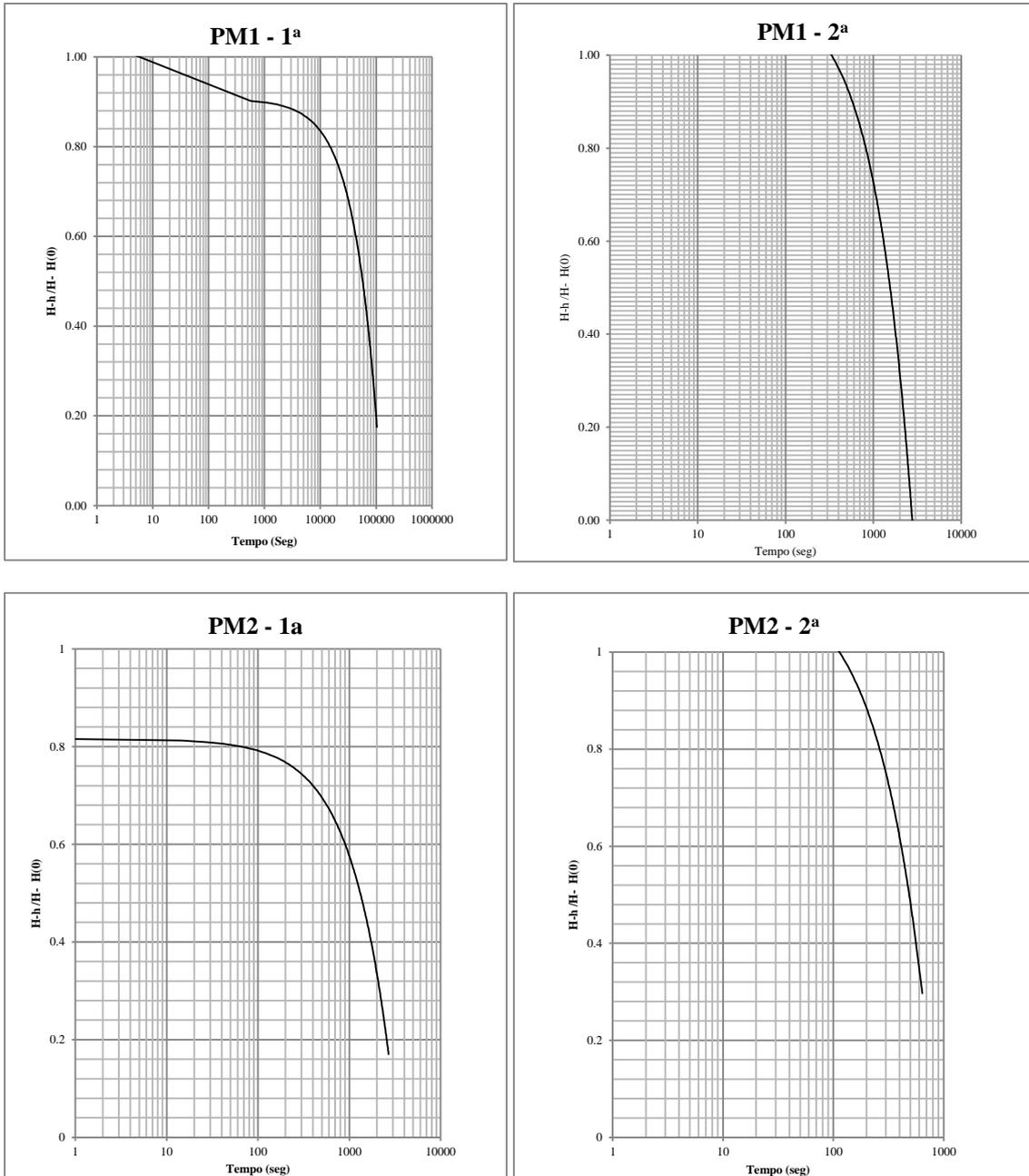
DADOS DO TESTE			
Referência - Poço:	01	Diâmetro (pol):	6 "
Profundidade (P):	80,00 (m)	s med:	13,73 (m) Início do Teste
Nível Estático (NE):	9,84 (m)	Q/s:	0,678587 (m³/h/m) 7/12/2012 09:00
Nível Dinâmico (ND):	23,57 (m)	s/Q:	1,47365 (m/m³/h) Término do Teste
Vazão (Q):	9,317 (l/h)	Transmissividade:	12,68064 (m²/dia) 8/2/2012 09:00

REBAIXAMENTO DO NÍVEL DA ÁGUA				RECUPERAÇÃO					
t (m)	Hora	N.D. (m)	Q (l/h)	TEMPO	HORA	N.D.	VAZAO	TEMPO	N.A.
1	09:01	14,08	14,666	510	17:30	23,48	9,317	1	20,87
1,5	09:01:21	14,17	14,666	540	18:00	23,57	9,317	1,5	20,21
2	09:02	15,28	14,666	570	18:30	23,57	9,317	2	19,80
3	09:03	15,73	14,666	600	19:00	23,57	9,317	3	18,91
4	09:03	16,04	14,666	630	19:30	23,57	9,317	4	19,13
5	09:05	16,35	14,666	660	20:00	23,57	9,317	5	17,68
6	09:06	16,84	14,666	690	20:30	23,57	9,317	6	17,25
8	09:08	17,01	14,666	720	21:00	23,57	9,317	8	16,60
10	09:10	17,13	14,666	750	21:30	23,57	9,317	10	16,02
12	09:11	17,20	14,666	780	22:00	23,57	9,317	12	15,79
14	09:14	17,24	14,666	810	22:30	23,57	9,317	14	15,23
16	09:16	17,29	14,666	840	23:00	23,57	9,317	16	15,02
18	09:18	17,36	14,666	870	23:30	23,57	9,317	18	14,65
20	09:20	17,37	11,820	900	00:00	23,57	9,317	20	14,42
25	09:25	17,41	11,742	930	00:30	23,57	9,317	25	12,27
30	09:30	17,44	11,314	960	01:00	23,57	9,317	30	10,92
40	09:40	19,45	11,213	990	01:30	23,57	9,317	40	9,84
60	10:00	20,54	11,154	1020	02:00	23,57	9,317	60	9,84
90	10:30	21,08	11,154	1050	02:30	23,57	9,317	90	9,84
120	11:00	21,43	10,849	1080	03:00	23,57	9,317	120	9,84
150	11:30	21,60	10,849	1110	03:30	23,57	9,317	150	9,84
180	12:00	21,77	10,285	1140	03:59	23,57	9,317	180	
210	12:30	21,80	10,153	1170	04:29	23,57	9,317	210	
240	13:00	21,93	10,025	1200	04:59	23,57	9,317	240	
270	13:30	22,09	10,025	1230	05:29	23,57	9,317	270	
300	14:00	22,23	9,542	1260	05:59	23,57	9,317	300	
330	14:30	22,97	9,542	1290	06:29	23,57	9,317	330	
360	15:00	23,18	9,428	1320	06:59	23,57	9,317	360	
390	15:30	23,27	9,428	1350	07:29	23,57	9,317	390	
420	16:00	23,34	9,428	1380	07:59	23,57	9,317	420	
450	16:30	23,40	9,428	1410	08:29	23,57	9,317	450	
480	17:00	23,43	9,428	1440	08:59	23,57	9,317	480	

Rua Agenério Araujo, 395 - Camargos
 Cep: 30520.220 - Belo Horizonte - MG
 Tel.: (31)2122.1800 - Fax.: (31)3363.2594
 www.hidropocos.com.br

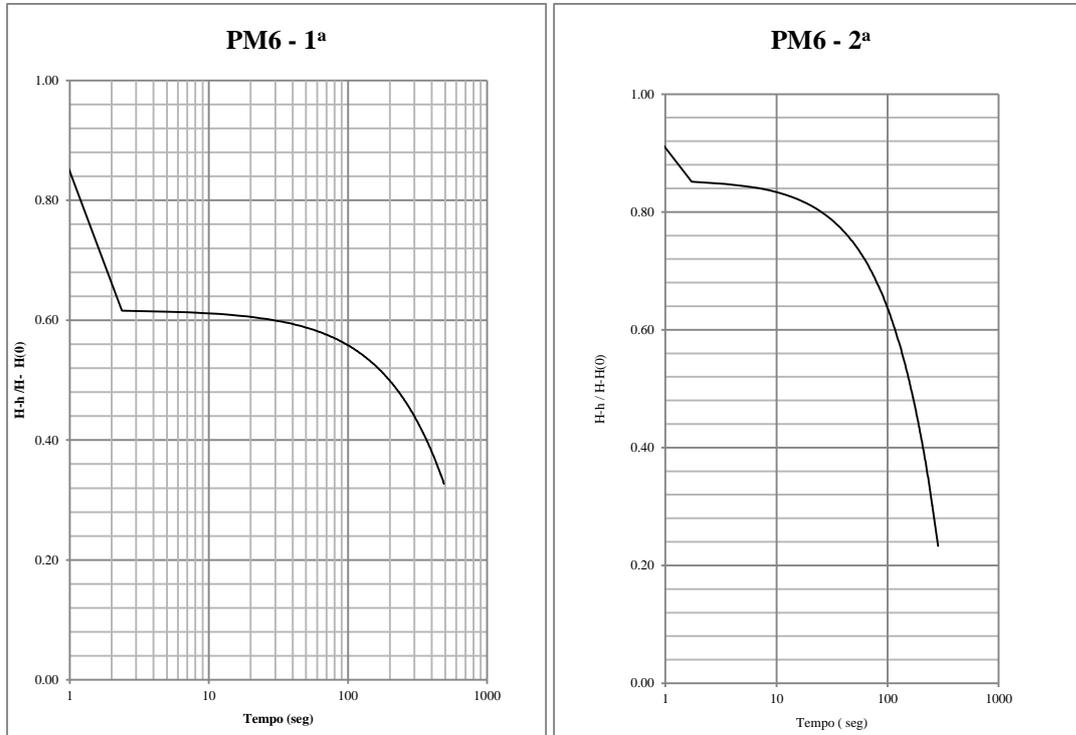
ANEXOS

Anexo 12. Gráficos dos Slug test realizados na 1ª campanha (out. e nov. 2012) e na 2ª campanha (fevereiro 2013).



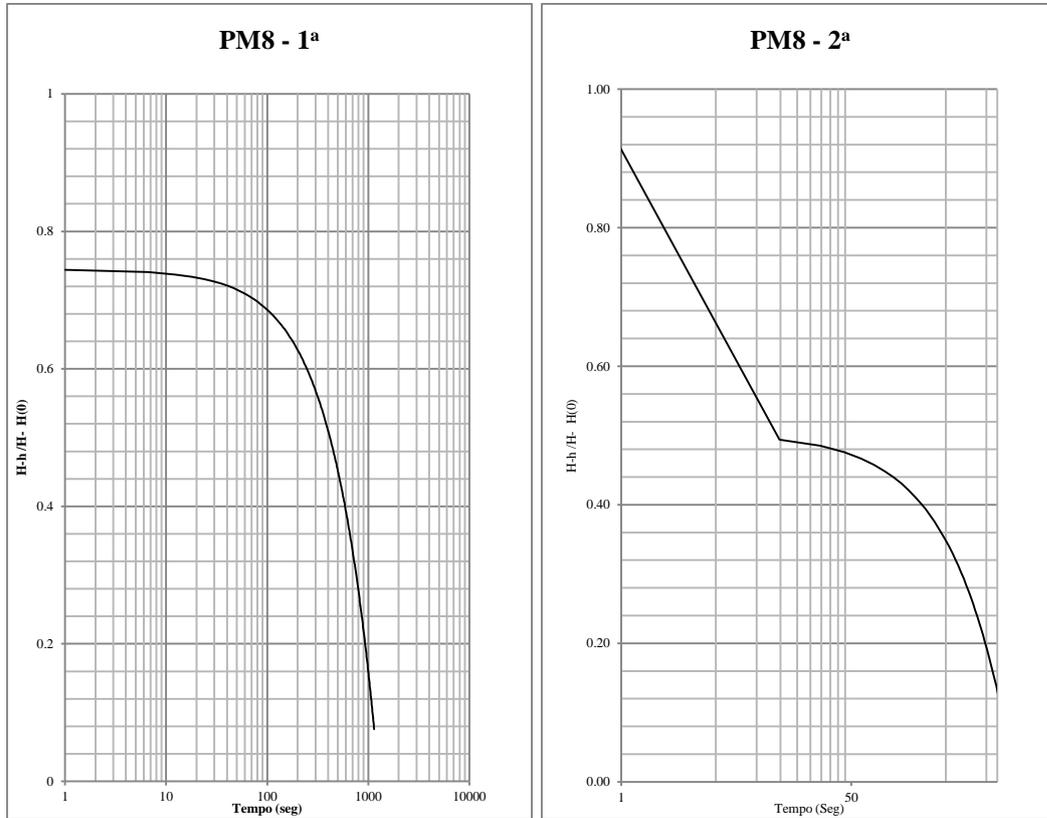
ANEXOS

Anexo 12. Continuação. Gráficos dos Slug test realizados na 1ª campanha (out. e nov. 2012) e na 2ª campanha (fevereiro 2013).



ANEXOS

Anexo 12.Continuação. Gráficos dos Slug test realizados na 1ª campanha (out. e nov. 2012) e na 2ª campanha (fevereiro 2013).



ANEXOS

Anexo 13. Descrições detalhadas dos Piezômetros e Poços Profundos.

Poço	Local	Prof. sondagem (m)	Prof. do poço (m)	Boca do poço (m)	Descrição litológica
PM1	CDTN	16	12	0,5	Entre 5,0 m e 10,0 m - Solo residual jovem: silte arenoso a areia. Granulometria: areia média a grossa. Entre 10,0 m e 15,0 m - Solo residual jovem: rosa cinza a variegado, com estruturas da rocha de origem
PM2	CETEC	14,45	10,5	0,5	Até 4,60 m - Colúvio: argila siltosa, pouco arenosa, rosa a vermelha. De 4,60 m até 10,0 m - Solo residual jovem: silte arenoso a areia. Granulometria : areia média a grossa. Entre 10,0 m e 14,45 m - Solo residual jovem: rosa cinza a variegado, com estruturas da rocha de origem.
PM3	REATOR	9	7,5	0,5	Até 1,0 m - Aluvião: argila siltosa, cinza a marrom. De 1,0 m a 5,0 m - Aluvião: areia argilosa, média, cinza, com passagens de argila orgânica, cinza a cinza escura. De 5,0 m a 9,0m - Aluvião: areia argilosa, cinza a preta, com traços de matéria orgânica.
PM4	IGC	10,3	10,2	0,5	Até 3,90 m - Atérro: argila siltosa, pouco arenosa, cinza a creme. De 3,90 m a 5,0 m - Aluvião: argila siltosa, cinza a marrom. De 5,0 m a 6,70 m - Aluvião: argila pouco arenosa com areia fina. De 6,70m a 10,0 m - Solo residual jovem: silte arenoso, rosa a cinza, com estruturas da rocha de origem.
PM5	RAMPA DO C. PEDAGÓGICO	10	7,8	0,5	Até 5,0m Solo residual jovem. De 5,0m a 10,0m silte arenoso. Granulometria: areia fina a média, rosa a creme, com estruturas da rocha de origem.
PM6	CENTRO PEDAGÓGICO	17	14,8	0,5	Até 5,0m Solo residual jovem De 5,0 m a 10,0 m - Silte arenoso a areia. Granulometria: areia média a grossa. De 10,0 m a 15,0 m -Solo residual jovem: silte rosa a cinza a variegado, com estruturas da rocha de origem.
PM7	RESTAU. Da ASSUFEMG	9	6	0,5	Até 3,90 m - Aterro: silte argiloso, rosa, pouco arenoso. De 3,90 m até 9,0 m - Aluvião: argila siltosa, cinza a marrom, pouco arenosa com areia fina.
PM8	REITORIA	10	8	0,5	Até 3,90 m - Aterro: silte argiloso, rosa a pouco vermelho. De 3,90 m a 5,0m - Aluvião: argila orgânica, cinza a preta, plástica. De 5,0 m a 6,60 m - Aluvião: argila preta, plástica. De 6,60 m a 10,0 m - Solo residual jovem: silte arenoso, rosa a cinza, com estruturas da rocha de origem.
PM9	ICB	11	9,2	0,5	Até 1,20 m - Colúvio: argila siltosa, cinza. De 1,20m a 5,0 m - Solo residual jovem: silte arenoso. Granulometria: areia fina a média, rosa a variegado. De 5,0 m a 11,0 m - Solo residual jovem : silte com estruturas da rocha de origem .

Poço	Local	Profundidade (M)	Boca do poço (m)	Vazão de teste (L/seg)	Tipo (porosidade)	Tipo (pressão)	Tipos e profundidades das entradas de água	Descrição litológica
P4	Coltec	80	1,00	6,67	misto	livre	Fraturas à: 48,50m - 53,00m - 66,50m - 76,00m e 78,50m Filtros: 16,0 m até 19,0m - 31,0 m até 37,0 m - 46,0 m até 49,0 m.	00,00-06,00 - argila arenosa de coloração rosada 06,00-12,00 - argila de coloração bege contendo areia variando de fina a grossa em proporção média 12,00-18,00 - argila arenosa de coloração rosada 18,00-30,00 - argila arenosa esbranquiçada, contendo raros grânulos de quartzo. 30,00-34,00 - material constituído principalmente por grânulos e seixos sub-arredondados de quartzo, mal selecionado, contendo areia em menor proporção. Observa-se ainda fragmentos de filito em proporção significativa 34,00-36,00 - material constituído principalmente por grânulos e micro-seixos sub-arredondados de quartzo, bem selecionados, contendo raros fragmentos de filito. 36,00-40,00 - diabásio são de coloração cinza esverdeada, com fragmentação predominante do tamanho de areia. 40,00-40,80 - granitóide alterado marrom, com fragmentação predominante do tamanho de grânulos. 40,80-46,00 - granitóide leucocrático são com fragmentação predominante do tamanho de areia fina 46,00-49,00 - granitóide alterado de coloração amarelada, com fragmentação do tamanho de areia fina 49,00-50,00 - granitóide leucocrático são com fragmentação predominante do tamanho de areia fina 50,00-52,00 - neste intervalo a abundância de quartzo e feldspato indica uma possível presença de veios de pegmatito 52,00-64,00 - granitóide leucocrático são com fragmentação predominante do tamanho de areia fina 64,00-66,00 - neste intervalo a abundância de quartzo e feldspato indica uma possível presença de veios de pegmatito 66,00-80,00 - granitóide leucocrático são com fragmentação predominante do tamanho de areia fina

Poço	Local	Profundidade (M)	Boca do poço (m)	Vazão de teste (L/seg)	Tipo (porosidade)	Tipo (pressão)	Tipos e profundidades das entradas de água	Descrição litológica
P5	Setor 1- Coltec	80	0,50	1,2	misto	livre	Filtros: 18,00 a 27m; 18,00 a 27m; 42,00 a 45,00m; 54,00 a 57,00m.	<p>00,00-02,00 - argila arenosa rosada</p> <p>02,00-08,00 - areia quartzosa variando de grossa a muito grossa, bem selecionada, coloração branca.</p> <p>08,00-12,00 - material constituído principalmente por quartzo e feldspato, com granulometria variando de areia muito grossa a micro-seixos. (menor proporção).</p> <p>12,00-24,00 - areia quartzosa de coloração bege, bem selecionada, com granulometria predominante do tamanho de areia muito grossa.</p> <p>24,00-30,00 - material constituído principalmente por quartzo e feldspato contendo palhetas de moscovita em abundância. A coloração é branca, correspondendo a descrição à de um pegmatito alterado.</p> <p>30,00-50,00 - granitóide alterado de coloração marrom, com fragmentação predominante do tamanho de areia.</p> <p>50,00-54,00 - granitóide leucocrático são, de coloração cinza clara, com fragmentação predominante do tamanho de areia fina.</p> <p>54,00-70,00 - granitóide mesocrático de coloração cinza média, com fragmentação predominante do tamanho de areia grossa. Observa-se palhetas de clorita</p> <p>70,00-72,00 - granitóide leucocrático são, de coloração cinza clara, com fragmentação predominante do tamanho de areia fina.</p> <p>72,00-80,00 - granitóide mesocrático de coloração cinza média, com fragmentação predominante do tamanho de areia grossa. Observa-se palhetas de clorita.</p>

Poço	Local	Profundidade (M)	Boca do poço (m)	Vazão de teste (L/seg)	Tipo (porosidade)	Tipo (pressão)	Tipos e profundidades das entradas de água	Descrição litológica
P8	Belas Artes	80	-0,40	6,11	fraturado	livre	Fraturas : 57,0 m Filtros: 24,00 m a 30,00 m - 36,0 m a 39,0 m - 42,00 m a 45,00m.	00,00-06,00 - argila plástica rosada contendo areia grossa em proporção reduzida 06,00-08,00 - argila plástica de coloração cinza clara. 08,00-10,00 - areia quartzosa variando de grossa a muito grossa, contendo argila rosada em proporção reduzida. 10,00-12,00 - argila plástica marrom. 12,00-14,00 - areia quartzosa variando de fina a grossa, contendo argila marrom em proporção reduzida. 14,00-24,00 - areia quartzosa variando de grossa a muito grossa, contendo argila rosada em proporção reduzida, além de raros seixos de quartzo. 24,00-44,00 - granitóide alterado marrom, com fragmentação do tamanho de areia fina. 44,00-46,00 - granitóide alterado marrom, com fragmentação de areia grossa e grânulos. 46,00-50,00 - granitóide leucocrático são de coloração cinza clara, com fragmentação do tamanho de areia grossa. 50,00-54,00 - granitóide leucocrático são de coloração cinza clara, com fragmentação do tamanho de areia grossa, estando a rocha levemente alterada. 54,00-74,00 - granitóide leucocrático são de coloração cinza clara, com fragmentação do tamanho de areia grossa. 74,00-80,00 - granitóide leucocrático são de coloração esbranquiçada, com fragmentação do tamanho de areia fina.

Poço	Local	Profundidade (M)	Boca do poço (m)	Vazão de teste (L/seg)	Tipo (porosidade)	Tipo (pressão)	Tipos e profundidades das entradas de água	Descrição litológica
P9	Belas Artes	80	-0,70	2,53	misto	livre	Fratura: 71,50m; 78,00m. Filtros: 14,00 a 20,00m; 26,00 a 29,00m; 35,00 a 38,00m; 44,00 a 47,00m.	00,00-06,00 - Argila plástica avermelhada, contendo areia em proporção reduzida. 06,00-10,00 - argila arenosa marrom escura. 10,00-14,00 - argila plástica negra, rica em matéria orgânica. 14,00-20,00 - areia de coloração amarelada, granulometria variando de grossa a muito grossa, constituída principalmente por quartzo e feldspato. 20,00-26,00 - argila plástica marrom, contendo raros seixos de quartzo. 26,00-28,00 - areia variando de fina a grossa, constituída principalmente por quartzo e feldspato, contendo argila marrom em menor proporção. 28,00-30,00 - areia quartzosa variando de fina a grossa, contendo argila amarelada, em proporção reduzida. 30,00-34,00 - argila plástica marrom, contendo areia em menor proporção. 34,00-46,00 - granitóide alterado de coloração amarelada, com fragmentação do tamanho de areia fina. 46,00-48,00 - granitóide alterado de coloração amarelada, com fragmentação predominante do tamanho de grânulos. 48,00-60,00 - granitóide leucocrático são, de coloração cinza clara, com fragmentação variando de areia grossa a micro-seixos. 60,00-80,00 - granitóide leucocrático são, de coloração cinza clara, com fragmentação predominante do tamanho de areia fina.

Poço	Local	Profundidade (M)	Boca do poço (m)	Vazão de teste (L/seg)	Tipo (porosidade)	Tipo (pressão)	Tipos e profundidades das entradas de água	Descrição litológica
P10	Setor 1B Artes	100	0,00	2,78	fraturado	confinado	Fraturas: 47,80 m ; 58,00m - 73,00m - 78,50 -96,00m. Filtro: 31,00-34,00 m; 46,00-49,00 m.	00,00-0,600 - argila plástica avermelhada. 06,00-08,00 - argila marrom. 08,00-10,00 - areia quartzosa amarela. 10,00-14,00 - argila arenosa cinza escura, rica em matéria orgânica. 14,00-16,00 - argila plástica marrom. 16,00-22,00 - areia quartzosa amarela, variando de fina a grossa contendo raros seixos de quartzo. 22,00-40,00 - Granitóide alterado de coloração marrom clara, com fragmentação predominante do tamanho de areia média. 40,00-44,00 - granitóide leucocrático são, de coloração cinza clara com fragmentação predominante do tamanho de areia grossa. 44,00-50,00 - Diabásio de coloração cinza média, com fragmentação variando de areia grossa a grânulos. Observa-se ripas de plágio-cálcio de até 2 mm. 50,00-52,00 - granitóide leucocrático são, de coloração cinza clara com fragmentação predominante do tamanho de areia grossa. 52,00-54,00 - Diabásio de coloração cinza média, com fragmentação variando de areia grossa a grânulos. Observa-se ripas de plágio-cálcio de até 2 mm. 54,00-64,00 - granitóide leucocrático são, de coloração cinza clara com fragmentação predominante do tamanho de areia grossa. 64,00-100,00 - Diabásio de coloração cinza média, com fragmentação variando de areia grossa. Observa-se ripas de plágio-cálcio de até 2 mm.

Poço	Local	Profundidade (M)	Boca do poço (m)	Vazão de teste (L/seg)	Tipo (porosidade)	Tipo (pressão)	Tipos e profundidades das entradas de água	Descrição litológica
P11	Setor 1B Artes	60	-0,41	2,2	misto	confinado	Fraturas: 34,00; 37,00m. Filtro: 25,00 a 28,00m; 34,00 a 37,00m .	00,00-02,00 - Argila arenosa rosada. 02,00-04,00 - argila plástica marrom. 04,00-20,00 - Argila plástica cinzenta contendo areia grossa em proporção reduzida. 20,00-26,00 - argila arenosa marrom clara. 26,00-30,00 - Areia quartzosa variando de grossa a muito grossa, contendo argila marrom em menor proporção, além de raros seixos de quartzo. 30,00-44,00 - Granitóide alterado marrom, com fragmentação predominante do tamanho de areia grossa. 44,00-50,00 - Granitóide leucocrático são, de coloração cinza clara, com fragmentação predominante do tamanho de areia grossa. 50,00-52,00 - Granitóide leucocrático são, de coloração cinza clara, com fragmentação predominante do tamanho de areia grossa, estando a rocha levemente alterada. 52,00-56,00 - Granitóide leucocrático são, de coloração cinza clara, com fragmentação predominante do tamanho de areia grossa e ripas de plagiocácio de até 2 mm. 56,00-60,00 - Granitóide leucocrático são, coloração esbranquiçada, com fragmentação do tamanho de areia fina.

Poço	Local	Profundidade (M)	Boca do poço (m)	Vazão de teste (L/seg)	Tipo (porosidade)	Tipo (pressão)	Tipos e profundidades das entradas de água	Descrição litológica
P1	Casa de comando de bombas	80	0,30					00-0,3 - Argila branca 3,0 -7,0 - argila turfosa negra 7,0 - 8,0- pigmatita branca, rica em quartzos 8,0-16,0 - pigmatita cinza clara misturado com granito 16,00-28,00- granito pardo claro amarelado 28,0-31,0 - granito roxo claro, bastante fraturado (aquifero) 31,0-36,0 - granito roxo claro, bastante fraturado (aquifero) 36,0-48,0 - granito branco duro 48,0- 49,0 - granito branco pouco ferruginoso 49,0 - 51,0 - granito ferruginoso castanho, duro 51,0 - 72,0 - granito branco conzento duro 72,0 - 80,0 - granito cinza escuro esverdeado, duro

Poço	Local	Profundidade (M)	Boca do poço (m)	Vazão de teste (L/seg)	Tipo (porosidade)	Tipo (pressão)	Tipos e profundidades das entradas de água	Descrição litológica
P3	CDTN	80	-0,25		fraturado	confinado	Filtros 6": de 18,00 a 37,00	0,00 - 10,00 - argila arenosa de cor vermelha - solo 10,0 - 16,0 - argila arenosa branca, constituída de feldspato alternado em caulim e quartzo. 16,0 - 35,0 - rocha granito -gnáissco, cor amarelada, alterado, constituído de feldspato alterado e quartzo 35,0 - 80,0 - rocha granito-gnáissica, fresca, constituída de quartzo e feldspato de cor branca. Rocha ferdilhada aos 66 metros.