

ANÁLISE DA RECARGA NO SISTEMA AQUIFERO GRANULAR E FISSURAL NA ÁREA DO CAMPUS PAMPULHA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

João Pedro Marques Ribeiro¹, Leila Nunes Menegasse Velásquez²,
Carlos Alberto de Carvalho Filho³, Peter Marshall Fleming⁴

1 e 2 - Departamento de Geologia / Instituto de Geociências – IGC/UFMG. Av. Antônio Carlos, 6.627. CEP: 31.270–901.
marquesribeiroster@gmail.com; menegasse@yahoo.com.br

3 e 4 - Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN. Av. Antônio Carlos, 6.627. CEP: 31.270–901. cacf@cdtn.br

Recebido em 13 de julho de 2013; aceito em 24 de novembro de 2014

Resumo: No presente estudo analisou-se a recarga no sistema aquífero existente na área do campus Pampulha da UFMG, em Belo Horizonte, Minas Gerais. Este Sistema Aquífero é composto por dois aquíferos em um ambiente geológico com duas identidades litoestratigráficas distintas. Sendo, um aquífero granular, sobrejacente, caracterizado pelo manto de intemperismo, e um aquífero fraturado, subjacente, caracterizado por rochas do Complexo Belo Horizonte, principalmente gnaisses e granitos. A área de estudo possui uma rede de poços tubulares profundos e poços de monitoramento, formada por doze poços tubulares profundos e sete poços de monitoramento. Neste estudo a recarga foi qualificada a partir de premissas das principais variáveis que a influenciam, entre elas a precipitação, a litologia, a profundidade do nível potenciométrico e o relevo. O trabalho se baseou em dados pré-existentes advindos do monitoramento do nível d'água, realizado entre 1997 e 2000, em poços e piezômetros existentes na área de estudo. A análise estatística apontou a precipitação e a textura dos solos como os fatores que mais influenciam na recarga local. Foi constatado que há uma conexão hidráulica entre os dois aquíferos e, por conseguinte uma recarga indireta do aquífero superior para o basal.

Palavras-chave: Recarga direta; monitoramento de nível d'água; conexão hidráulica; aquíferos poroso e fraturado.

Abstract: ANALYSIS ON RECHARGE OF AQUIFER SYSTEM GRANULAR AND FISSURE ON UFMG CAMPUS AREA, BELO HORIZONTE, MG. In the present paper we analyzed the existing aquifer recharge system in the campus area UFMG, in Belo Horizonte, Minas Gerais. This aquifer system consists of two aquifers in a geological environment with two distinct lithostratigraphic identities. Being a granular aquifer, overlying, characterized by weathering mantle, and a fractured aquifer, underlying, characterized by rocks of the Complex Belo Horizonte, mainly gneisses and granites. The study area has a network of deep wells and monitoring wells, formed by twelve deep wells and seven monitoring wells. In this study the clearance was qualified from the premises of the main variables that influence it, including precipitation, lithology, depth of potentiometric level and relief. The work was based on pre-existing data obtained from the monitoring of the water level, conducted between 1997 and 2000 in existing wells and piezometers in the study area. The statistical analysis showed precipitation and soil texture as the factors that most influence in local recharge. It has been found that there is a hydraulic connection between the two aquifers and therefore an indirect upper aquifer recharge to baseline.

Keywords: Recharge; water level monitoring; hydraulic connection; fractured and granular aquifer.

1. INTRODUÇÃO

Os aquíferos fraturados são os tipos predominantes no Brasil, com maior expressão nas regiões Nordeste, Sudeste e Norte, representados por diversos litotipos pré-cambrianos, entre eles, gnaisses, xistos, filitos, granitos, metacalcários e quartzitos, assim como os basaltos (formação Serra Geral) presentes também na região Sul. (Rebouças, 2002).

No campo das funções intrínsecas do sistema aquífero fraturado, a produtividade dos poços depende principalmente da intensidade, abertura e conectividade das fraturas. Em geral os aquíferos fraturados têm produtividade inferior à média dos aquíferos porosos, mas ainda assim, quando localizados em regiões carentes de recursos hídricos, como no semiárido brasileiro, têm uma função estratégica muito importante para o abastecimento público (ANA, 2007).

Nos aquíferos fraturados localizados em regiões de clima úmido a recarga é facilitada pelo excedente hídrico e pela presença do manto de intemperismo sobrejacente constituído de solos residuais ou transportados. Esses depósitos granulares facilitam

o armazenamento da água pluvial infiltrada, que é percolada até o aquífero fraturado. Segundo Feitosa & Manoel Filho (2008) a infiltração pode ser dividida em três partes: a primeira fica parcialmente retida na zona não saturada (uma parte se perde por evapotranspiração), a segunda se aloca nas franjas capilares, logo abaixo destas franjas constitui-se o fluxo subsuperficial, e por fim, a terceira parte, que resta das etapas anteriores e consegue percolar até o aquífero, constituindo a recarga.

Sob o clima tropical, as principais fontes naturais de recarga são a precipitação (recarga direta) e os corpos hídricos superficiais (recarga indireta). Ainda existe a recarga artificial, que resulta de ações antrópicas como irrigação, perdas nas redes pluviais, de abastecimento, esgoto e sistemas de tratamento de água (Rebouças, 2002).

As áreas disponíveis para ocorrência da recarga direta e indireta são denominadas zonas de recarga, as quais são dotadas de características geológicas, hidrogeológicas, pedológicas, geomorfológicas e do uso do solo propícias à infiltração. A intensidade das chuvas também interfere na recarga. As chuvas muito intensas em solos de pouca permeabilidade resultam em maior escoamento superficial ao

contrário das menos intensas que possuem maior tendência a se infiltrar lentamente no solo, favorecendo a recarga (Rebouças, 2002).

A recarga pode ser estimada por métodos diretos (medidas de variação do nível de água) e indiretos (balanço hídrico, análise de curva de recessão, estimativa Darcyniana, traçadores, dentre outros). O conhecimento das características do aquífero e das formas de recarga possíveis, a disponibilidade e possibilidades de obtenção de dados e a contextualização da área (rural ou urbana) constituem os critérios para a escolha do(s) método(s) mais adequado(s) a ser (em) aplicado(s).

A compreensão do funcionamento e a quantificação da recarga aquífera são relevantes para o planejamento de uso dos recursos hídricos. O monitoramento permanente do nível estático de poços permite identificar o rebaixamento temporal como reflexo da exploração e ou impermeabilização do solo, permitindo adoção de medidas de controle e ou corretivas.

A área de estudo compreende o campus da UFMG, localizado na região da Pampulha, com abrangência do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN. O abastecimento local de água de origem subterrânea ocorre no CDTN, por meio de um (1) poço tubular. E as seguintes dependências da UFMG: Colégio Técnico (Coltec) e o Restaurante Setorial (I e II) são abastecidas por outro poço tubular, instalado nas dependências do Coltec. Em ambos os casos o abastecimento é complementar ao sistema público de abastecimento de água.

Entende-se que o recurso subterrâneo é estratégico e pode, futuramente, ser aproveitado por outras unidades instaladas no campus da UFMG. Assim, o estudo proposto visou contribuir com o aumento do conhecimento da hidrogeologia no campus da UFMG, avaliando-se quantitativa e qualitativamente a recarga aquífera. O estudo foi idealizado em duas etapas executivas, sendo aqui apresentada apenas a primeira, cujos resultados embasarão as ações da segunda etapa.

A primeira etapa, a qual compõe este artigo todo, consistiu de uma análise, prévia, quantitativa e qualitativa de dados referentes ao nível estático da água subterrânea dos aquíferos poroso e fissural, sistematicamente monitorados manualmente de 1997 a 2000. Os dados de nível estático referem-se a carga hidráulica dos aquíferos e são numericamente referentes à profundidade estática do nível d'água subtraído a boca do poço (quando acima do solo). Dado o relevo pouco ondulado optou-se por utilizar numericamente a profundidade em relação ao solo.

Dada à existência de dois aquíferos distintos tomou-se o cuidado de coletar informações que fossem referentes exclusivamente de cada aquífero. Assim os dados dos poços de monitoramento são referentes exclusivamente ao aquífero poroso, e os dados referente aos poços profundos são referentes somente a dados exclusivos do aquíferos fissural, por meio de suas fissuras.

A segunda etapa, que se encontra em execução, compreende o monitoramento automatizado do nível d'água, com maior frequência de leituras (minutos), resultando em uma série de dados expressivamente mais extensa e de maior confiabilidade para efetuação da análise temporal.

A análise quantitativa compreendeu a determinação da recarga no aquífero granular por meio do método de oscilação do nível estático. A análise qualitativa compreendeu a análise dos principais fatores potenciais que podem influenciar na recarga aquífera local. Para esse fim foram aplicadas técnicas estatísticas e de geoprocessamento, visando estabelecer correlações entre fatores exógenos e a oscilação da carga hidráulica nos poços profundos e piezômetros. As variáveis destacadas na análise qualitativa da recarga foram: precipitação, relevo, localização (em relação a áreas de recarga e descarga), a profundidade do nível estático e a textura do solo. A partir da análise do comportamento temporal da carga hidráulica medida nos dois aquíferos, foi possível obter informações preliminares sobre a conexão hidráulica entre ambos.

Com base no monitoramento do nível d'água (NA) foi elaborado um mapa potenciométrico, assim como indicação dos locais onde ocorrem as maiores oscilações do mesmo.

2. OBJETIVOS

O objetivo do estudo foi realizar uma análise quantitativa e qualitativa da recarga natural dos aquíferos granular e fissural e do comportamento temporal da mesma, visando identificar os fatores de recarga mais influentes, avaliar a relação hidráulica entre ambos os aquíferos e os lapsos de resposta de cada aquífero à precipitação na bacia do Córrego Engenho Nogueira (CEN) na área do campus Pampulha da UFMG, Belo Horizonte.

3. LOCALIZAÇÃO

A área de estudo está localizada na região da Pampulha, noroeste de Belo Horizonte, Minas Gerais (Fig. 1). Perfaz 3,34km² e compreende parte do Campus da UFMG e do CDTN. Os terrenos do campus da UFMG e do CDTN inseridos na Bacia do CEN, pertencente à Bacia da Pampulha (Fig. 2). A área insere-se dentro das coordenadas UTM 607.200 e 609.600 Oeste, e 7.800.800 e 7.804.000 Sul (WGS 84).

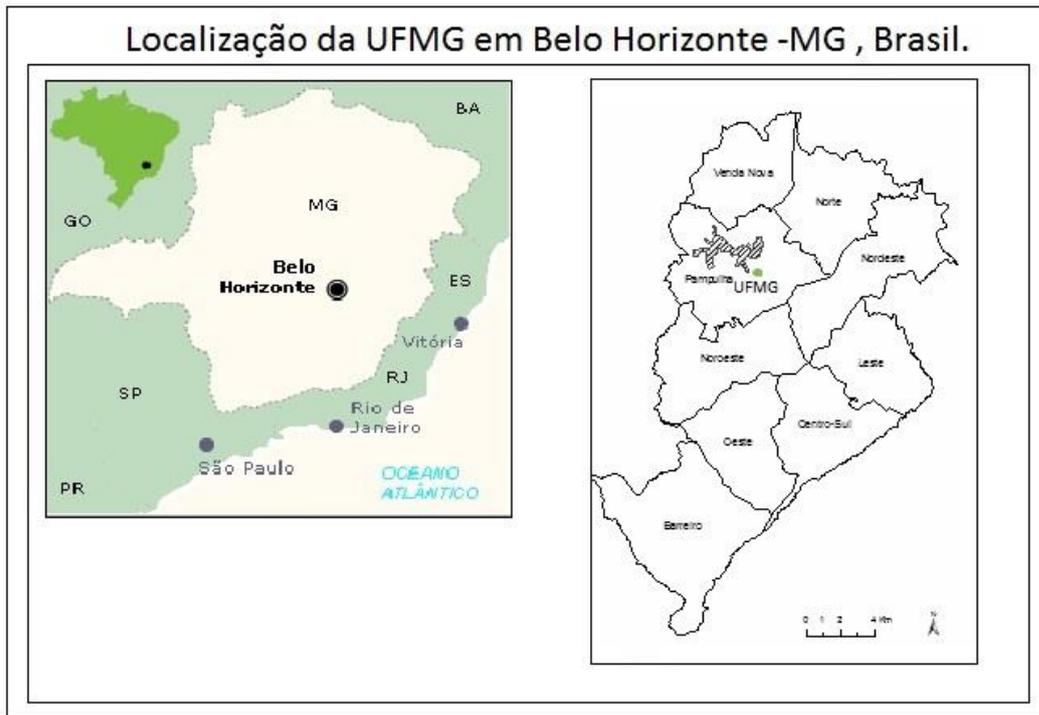


Figura 1. Localização do campus da UFMG na cidade de Belo Horizonte.

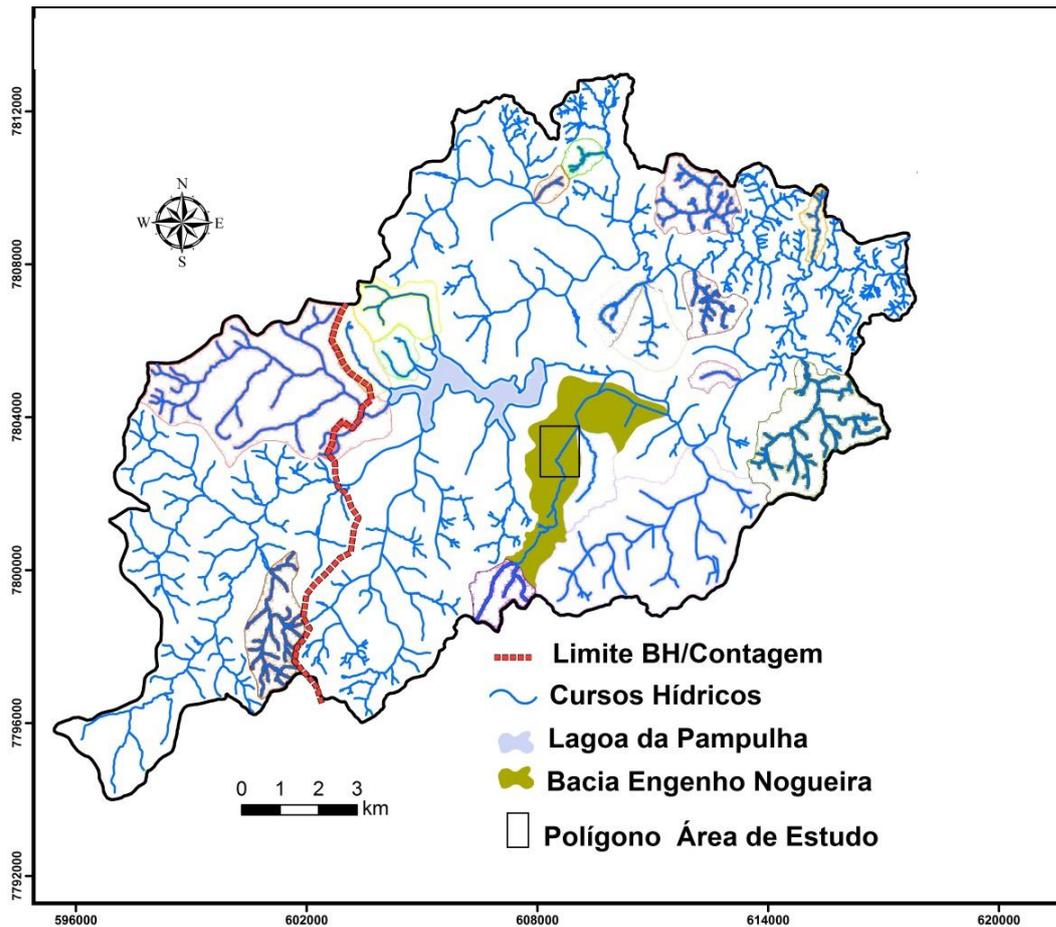


Figura 2. Bacia da Pampulha com indicação do polígono de localização da área de estudo. Fonte: Projeto Manuelzão, 2004.

cisalhamento transcorrentes pré-existentes ao Brasileiro (Beato, 2001).

Carvalho Filho (1997) e Silva *et. al.* (1995), identificam por meio de fotointerpretação na área do campus da UFMG, a existência de três expressivas direções de fotolineamentos: NW-SE, N-S e NE-SW.

Hidrogeologicamente, a área de estudo, assim como a maior parte da cidade de Belo Horizonte, assenta-se sobre o chamado Aquífero Fraturado, constituído de rocha sã (granitos, gnaisses, migmatitos e milonitos), sotoposto ao manto de intemperismo, que constitui um aquífero granular. Esse manto possui espessuras muito variáveis, desde poucos metros, alcançando, excepcionalmente 100 metros na bacia da Pampulha (Silva *et al.*, 1995).

Enquanto o aquífero granular superior é sempre livre, o aquífero fraturado, heterogêneo e anisotrópico, pode se apresentar livre a semiconfinado. Independentemente da rocha que o constitui 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, isto é, através dos aquíferos granulares.

De acordo com Beato *et al.* (2003) as fraturas com direção NE são mais favoráveis à circulação das águas subterrâneas se comparadas com as de direção NW. O aquífero fraturado na área do campus da UFMG é formado por rochas granitoides e diabásios, do tipo livre a semiconfinado (Carvalho Filho, 1997).

Estudos de Silva *et al.* (1995) mostraram a média da capacidade específica para poços na região da Pampulha, de 0,288m³/h/m. Beato (2001) encontrou valores de até 0,400m³/h/m em 70% de 41 poços na mesma região. No campus da UFMG Carvalho Filho (1997) encontrou capacidade específica de 0,108 a 1,008 m³/h/m, vazão de 2,52m³/h a 24,02m³/h (média: 11,41m³/h) e transmissividade (T) entre 5,4 e 28,0m²/dia.

Na área de estudo o sistema aquífero granular é livre, com espessura média de 45m, assim constituído (Carvalho Filho, 1997): por solo residual jovem resultante do intemperismo dos granitoides do Complexo Belo Horizonte; por depósito aluvionar; e por depósito coluvionar. Existem sete poços (7) de monitoramento instalados neste sistema aquífero, cuja profundidade de revestimento varia de 6,0m a 14,8m e nível estático de 1,3m a 13,45m a partir da cota do terreno. Na bacia da Pampulha o aquífero granular possui capacidade específica média de 0,23m³/h/m,

Transmissividade de 0,74 a 35,74m²/dia e mediana de 7,62m²/dia (Beato, 2003).

5. MATERIAL E MÉTODOS

O cálculo da variação anual foi determinado pela somatória de todas as elevações ocorridas entre cada medida do NA e a leitura seguinte, representando, assim, toda a elevação, ou seja, a infiltração total de água que atingiu o aquífero. Já o cálculo da variação mensal do NA foi determinado pela diferença entre o valor do início e do final do mês. Este passo foi dado a partir da premissa do cálculo de recarga pela variação do nível d'água (VNA) que identifica que toda água infiltrada constitui a recarga.

O termo piezômetro foi aqui informalmente utilizado para designar, *lato sensu*, os poços de monitoramento no aquífero poroso. Os dados de perfis litológicos e construtivos dos piezômetros e dos poços tubulares, bem como os dados do monitoramento do nível estático e de pluviosidade, foram obtidos junto ao CDTN, no âmbito do projeto de sua autoria intitulado: Projeto hidrológico da bacia do Engenho Nogueira (PROHBEN). Nesse projeto realizaram-se até quatro medidas do NA ao mês entre 1995 e 2000. Em função de descontinuidades nas medições, foram selecionados três anos hidrológicos para o desenvolvimento do estudo: set/1997-ago/1998 set/1998-ago/1999 e set/1999-ago/2000.

As variações sazonais observadas ao longo das diferentes estações do ano do nível de água são reconhecidas como indicadoras de recarga (elevação) e de abaixamento do aquífero. Os valores dessas oscilações constituem a base para análise da influência dos fatores externos e internos ao aquífero que influenciam a magnitude da recarga. Os fatores (variáveis) analisados foram: Precipitação, Textura da zona não saturada, Relevo e Localização em relação a áreas de recarga/descarga dentro da área de estudo e, Profundidade do NA. Não foram considerados os poços em operação e os piezômetros localizados a menos de 100 metros de distância destes, pois estariam sob influência do bombeamento dos primeiros.

Foram realizados os seguintes tratamentos estatísticos iniciais dos dados de NA por ano hidrológico e por fonte (poço e piezômetro): teste de normalidade por meio de testes de tendência central (média, mediana e moda), coeficiente de assimetria, testes de normalidade como Shapiro-Wilk (W) e de Kolgomorov-Smirnov. Invariavelmente, todos os resultados mostraram uma distribuição assimétrica negativa dos dados (não normal). Portanto, todas as análises de coeficiente de correlação estatística foram de

Spearman indicado para dados não-paramétricos. A significância considerada foi $p < 0,05$ e o grau de correlação conforme a Tabela 1. As correlações também serviram de base para a análise dos principais fatores que influenciam na recarga.

Tabela 1. Graus de correlação de acordo com os valores dos testes, segundo o método de Pearson e Spearman. Fonte: Souza (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

O cálculo estimativo da recarga (Equação 1) foi realizado para o sistema aquífero granular pelo método da medida direta da variação do nível de água, segundo Healy & Cook (2002):

$$R = S_y \Delta h / \Delta t \quad (\text{Equação 1})$$

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

Tal método tem a premissa de que todo aumento no nível potenciométrico é fruto da recarga. Neste método assume-se que toda água que chega à zona saturada já entra em armazenamento, considerando que o fluxo de base, evapotranspiração das águas subterrâneas e o fluxo líquido em subsuperfície são iguais à zero.

A variação do nível d'água anual é a variação da quantidade de chuva que conseguiu percolar até o aquífero no período de um ano. A partir dessa variação pode-se definir o acumulado de água no período.

Os mapas potenciométricos relativos aos aquíferos poroso e fissural foram gerados utilizando dados de nível de água do mês de junho/2000, portanto, na estação de estiagem na área de estudo. A interpolação usada foi pelo método de Krigagem conforme sugerida por Landim et. al. (2002). Os outros dois anos analisados (1997 e 1998) não foram apresentados, já que possuem as mesmas características de direção de fluxo e áreas de recarga/descarga que o ano de 2000.

A determinação do percentual da constituição litológica (areias, argilas e rocha consolidada) foi feita por meio de análise dos perfis construtivos dos piezômetros. O percentual foi determinado em relação à profundidade final do poço. Para realizar as correlações entre a precipitação mensal e a variação do NA mensal, ambas as variáveis foram sistematizadas mensalmente. O valor de precipitação se refere ao total de chuva ocorrido no

respectivo mês e o valor da variação do NA foi determinada pela diferença entre a primeira e a última medida do mês.

6. INVENTÁRIO DOS PONTOS D'ÁGUA

Existem na área de estudo 12 poços profundos e 9 piezômetros. Dentre os poços tubulares foram utilizados dados referentes a 7 poços, P0, P1, P2, P4, P8, P9, P10 e P11 (Figura 4). Os poços não foram utilizados pelas seguintes razões: P3, P5 e P6 estavam em bombeamento; o P4 estava sob influência do P5; P7 não possuía dados.

Dentre os piezômetros foram utilizados dados dos seguintes: PM2, PM3, PM4, PM6, PM7, PM8 e PM9. Os dados do PM1 e PM5 não foram utilizados respectivamente por estar sob influência de bombeamento e por falta de dados.

Os poços profundos possuem revestimento e filtros em aço ou Nold galvanizado com diâmetro de 6' e abertura de 0,75mm. Os piezômetros possuem revestimento em tubos de PVC com diâmetro de 2". A profundidade média destes piezômetros é de 9,5 metros.

A partir da observação dos perfis construtivos dos poços eles foram classificados de acordo com a origem da entrada de água em: "poço fraturado" (exclusivamente de fraturas) e "poço misto" (entradas de água por fraturas e do aquífero granular) Tab. 2. O poço que possui entradas de água de ambos os aquíferos, mas cujo nível dinâmico se posiciona abaixo do filtro no aquífero granular também foi classificado como "poço fraturado".

Como a condição de carga hidráulica nos aquíferos anisotrópicos pode ser de caráter pontual, os poços profundos fraturados foram classificados em livre e semiconfinado, neste último caso quando o nível estático se encontrava significativamente acima da base do aquífero granular, o que indica características semelhantes ao semi confinamento (Tab. 2). Todos os poços mistos foram considerados livres devido à suposta conexão hidráulica entre ambos os aquíferos.

Tabela 2. Características dos poços profundos.

Poço	Entrada d'água	Carga Hidráulica
P0	Sem dados	
P1	Sem dados	
P2	Sem dados	
P8	Fraturado	Livre
P9	Misto	Livre
P10	Fraturado	Semi confinado
P11	Fraturado	Semi confinado

Tabela 5. Tratamento estatístico das profundidades do nível estático dos três anos hidrológicos por poço e por piezômetro.

Dados referentes aos três anos hidrológicos; valores em metros.								
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						

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						

Seguem os resultados da análise dos principais fatores que se conhece ter potencial para influenciar na infiltração efetiva da água, provocando a variação do nível estático, quais são: Precipitação, Textura da zona não saturada, Relevo e Profundidade do nível estático dos poços.

7.1. Precipitação pluviométrica

Apenas a precipitação foi considerada como fator diretamente influente na variação do nível estático. É sabido que a recarga aquífera de aquíferos freáticos têm como principais fontes, as precipitações e a interação com cursos hídricos (rios e lagos).

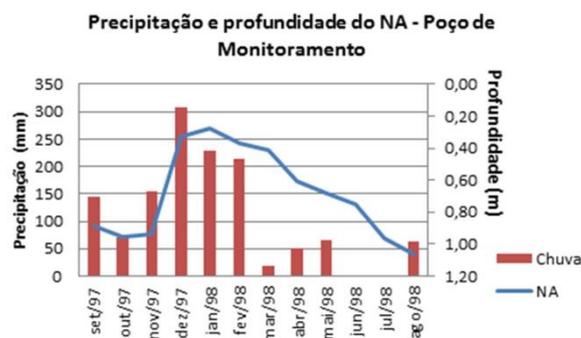
A comparação gráfica do acumulado de chuva mensal com a média dos níveis estáticos mensais permite uma aproximação do comportamento da resposta dos aquíferos às precipitações. De forma geral todos os poços e piezômetros apresentaram o mesmo comportamento, por isso selecionou-se um exemplo gráfico de um piezômetro PM3 (Fig. 5 a 7) e de um poço profundo P1 (Fig. 8 a 10).

A precipitação do ano hidrológico de 98/99 (Tab. 6) 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 6. 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 recarga em ambos os aquíferos ocorre majoritariamente nos meses chuvosos entre outubro e março. Nota-se que existe uma defasagem de tempo entre os eventos pluviométricos (mensais) e a elevação do nível estático que para a área de estudo, revela-se para um intervalo de aproximadamente um mês.

**Figura 5.** Variação do NA no piezômetro PM3 e Pluviosidade do ano hidrológico de 1997/1998.**Figura 6.** Variação do NA no piezômetro PM3 e Pluviosidade do ano hidrológico 1998/1999.

Correlações estatísticas (Tab. 7 e 8) confirmaram a tendência de os níveis estáticos acompanharem as variações pluviométricas constatadas visualmente nas Figuras 5 a 10.

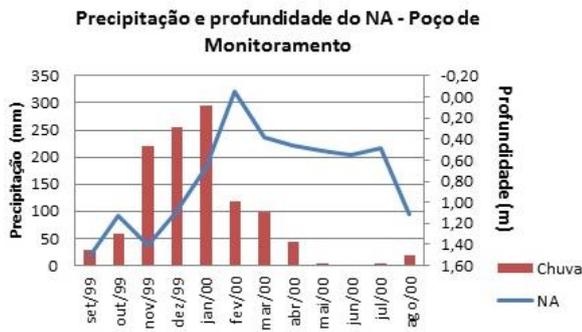


Figura 7. Variação do NA no piezômetro PM3 e Pluviosidade para o ano hidrológico de 1999/2000.

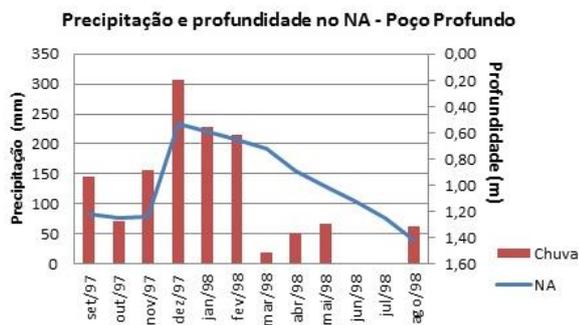


Figura 8. Variação de NA do poço P1 e Pluviosidade no ano hidrológico 1997/1998.



Figura 9. Variação de NA do poço P1 e Pluviosidade no ano hidrológico 1998/1999.



Figura 10. Variação de NA do poço P1 e Pluviosidade no ano hidrológico 1999/2000.

Tabela 7. Teste de correlação de Spearman (r) entre a média mensal do nível de água e 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. Teste de correlação de Spearman (r) entre a média mensal do nível de água e 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 da correlação das variações do nível de água com a precipitação permitiu que as seguintes constatações de forma preliminar e especulativa à segunda etapa do trabalho, já comentada anteriormente:

- 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 as correlações foram assim distribuídas (Fig. 10): moderadas (45%), fracas (36%), ínfimas (9%) e fortes (5%). As mais baixas correlações (ínfimas a baixas) foram observadas

nos piezômetros PM6 e PM9, ambos pertencentes ao domínio de solo residual jovem. E nos poços profundos (Fig. 11): fracas (57%), ínfimas (22%) moderadas (9%);

- O ano com menor número de dados foi o que apresentou as correlações mais baixas em ambos os aquíferos, 1998/1999.

O tempo de resposta do nível de água às precipitações foi "tentativamente" avaliado por meio do método da função de correlação cruzada, a qual incorpora as séries temporais constituídas de medidas tomadas em intervalo regular de tempo. Entretanto, intervalos das medidas de nível de água disponíveis são irregulares, variando de uma a

quatro medidas por mês, além de meses em que as medidas foram feitas em sua maioria na primeira quinzena e depois feita somente no final do mês seguinte. Dessa forma, foi feita uma padronização das medidas para o intervalo de quinze dias, calculando-se a média das medidas feitas em cada período quinzenal. Assim, o tempo de defasagem analisado foi de quinze dias para as variáveis, nível de água e precipitação acumulada correspondente.

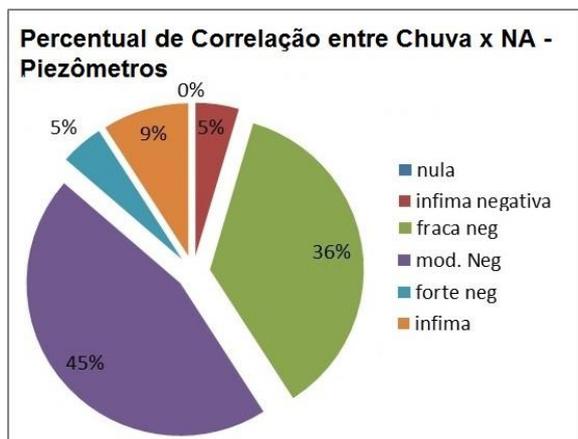


Figura 11. Percentual da correlação entre Nível estático e Precipitação – Piezômetros.

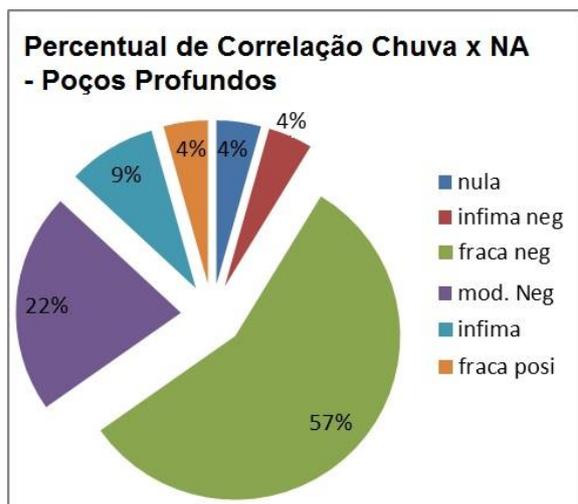


Figura 12. Percentual da correlação entre Nível estático e Precipitação – Poços Profundos.

Os melhores tempos de defasagem, ou o K que apresentou as melhores correlações (maiores valores), tanto dos poços profundos como dos piezômetros, foi o de K = 7, referente a sete quinzenas, ou aproximadamente três meses e meio (Figura 13). Evidentemente que esse resultado não deve ser representativo considerando as condições hidrogeológicas locais. Seguramente a escala intervalar de 15 dias é demasiadamente grande para essa análise, mas estes resultados servirão para nortear e serem comparados quando aplicados na segunda etapa do trabalho.

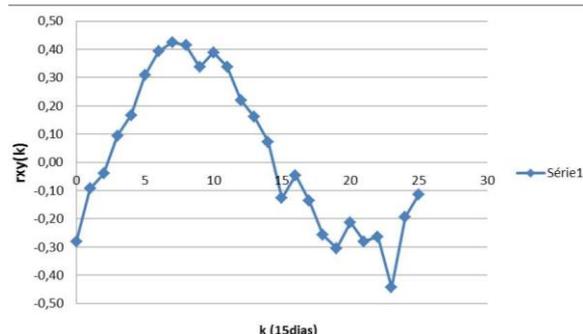


Figura 13. Correlograma, $r_{xy}(k)$ em função do $k=15$ dias, o pico encontra-se no sétimo ponto, com valor de 0,41.

7.2. Textura da zona não saturada e tipo de aquífero

A textura da zona não saturada foi analisada indiretamente quanto à seus aspectos de permeabilidade e capacidade de infiltração, para os casos dos dados dos piezômetros. No caso dos poços profundos os atributos analisados foram: tipo de entrada d'água (misto ou fraturado), e; pressão da água (livre ou semi- confinado) descritos nos perfis construtivos destes poços.

Os resultados dos piezômetros foram organizados na Tabela 9, 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 da variação positiva do nível de água nos piezômetros.

A Tabela 9 reúne as médias anuais do cumulativo de recarga, ou variação do nível de água, agrupadas de acordo com o tipo textural.

Tabela 9. Comparação entre a descrição litológica e variação positiva anual do nível de água - piezômetros

	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

Os poços que apresentaram as maiores variações do nível de água direta são os da classe “predominância de areia” (PM6), enquanto as menores variações concentraram-se na classe “predominância de argila” (PM3 e PM4), conforme já era esperado. O PM7 apresenta uma situação peculiar, pois exibe a mais elevada variação do nível de água (6,95m, Tab. 9), embora predomine argila no seu perfil descritivo. De fato, argila pura é encontrada a partir dos 3,9m até 9,0m, que funcionariam como barreira hidráulica, isolando o aquífero fraturado subjacente, mas localmente

criando um aquífero suspenso, conforme atestado pela mais alta correlação com a precipitação encontrada ($r=0,86$) - Tabela 7.

O conjunto desses resultados mostra coerência entre os parâmetros analisados de acordo com as principais características texturais (argilas e areias) revelando a importância desse fator o armazenamento do volume infiltrado.

A Figura 14 mostra a distribuição espacial das coberturas (aluvião, colúvio e solo residual jovem) associada ao comportamento da variação do nível de água dos piezômetros. Constatou-se que:

- As menores variações de nível incidiram nos substratos mais argilosos (aluvião) onde estão localizados o piezômetros PM3, PM4 e PM8. Destaca-se ainda que, além dessas zonas serem mais argilosas, a ocupação predial é também mais crítica em relação às demais zonas de cobertura, podendo contribuir também para os baixos valores de variação do nível de água. Observa-se que embora o PM7 esteja situado no 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.

No grupo de poços profundos, associando-se as informações quanto ao tipo de porosidade no qual o poço se insere (Tab. 10) com a média dos três anos hidrológicos da soma do acúmulo do nível de água em cada poço, extraíram-se as seguintes constatações:

- A menor variação do nível de água observada no P8 (livre/fraturado) é reflexo do maior isolamento hidráulico entre os meios granular e fraturado pela presença da camada argilosa nessa região, resultando no menor escoamento do primeiro para o segundo;
- Já a maior amplitude exibida nos poços semiconfinado/fraturados, bem como nos livres/mistos, pode ser reflexo da mais alta conectividade hidráulica entre os meios granular e fraturado.

7.3. Mapa potenciométrico

Para a identificação das regiões onde ocorrem as principais entradas 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.15) e fraturado (Fig. 16).

Constatou-se que o 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.

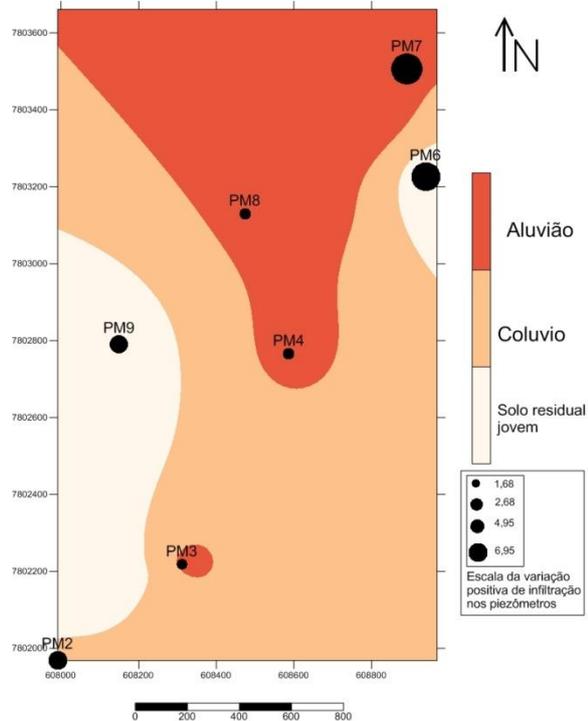


Figura 14. Mapa de características do solo com a média das variações positivas nos piezômetros

Tabela 10. Comparação entre a descrição litológica e a variação positiva anual do nível de água - poços profundos.

Classificação quanto à entrada de água	Pressão da água no aquífero	
	Livre	Semiconfinado
Misto	P4 (2,33m) / P9 (2,40m)	
Fraturado	P8 (2,08m);	P10 (2,40); P11(3,71m)

Os fluxos de ambos os aquíferos granular e fissural possuem sentido SW para NE, tendo como principal zona de recarga geral a porção SW da área, localizadas nas imediações do CDTN, região com importante parcela disponível para infiltração direta, uma vez em que é uma região com maior incidência de áreas gramadas ou arborizadas, com pouco impermeabilização do solo. Na porção NE, nas proximidades do cruzamento da Avenida Antônio Carlos com a Avenida Abrão Caram, é a região de descarga local da área de estudo, como indicam os fluxos observados na Figura 15, esta região está nas cotas altimétricas menos elevadas de toda a área de estudo, extrapolando a área de estudo localiza-se o córrego São Francisco, onde há descarga dos aquíferos em questão.

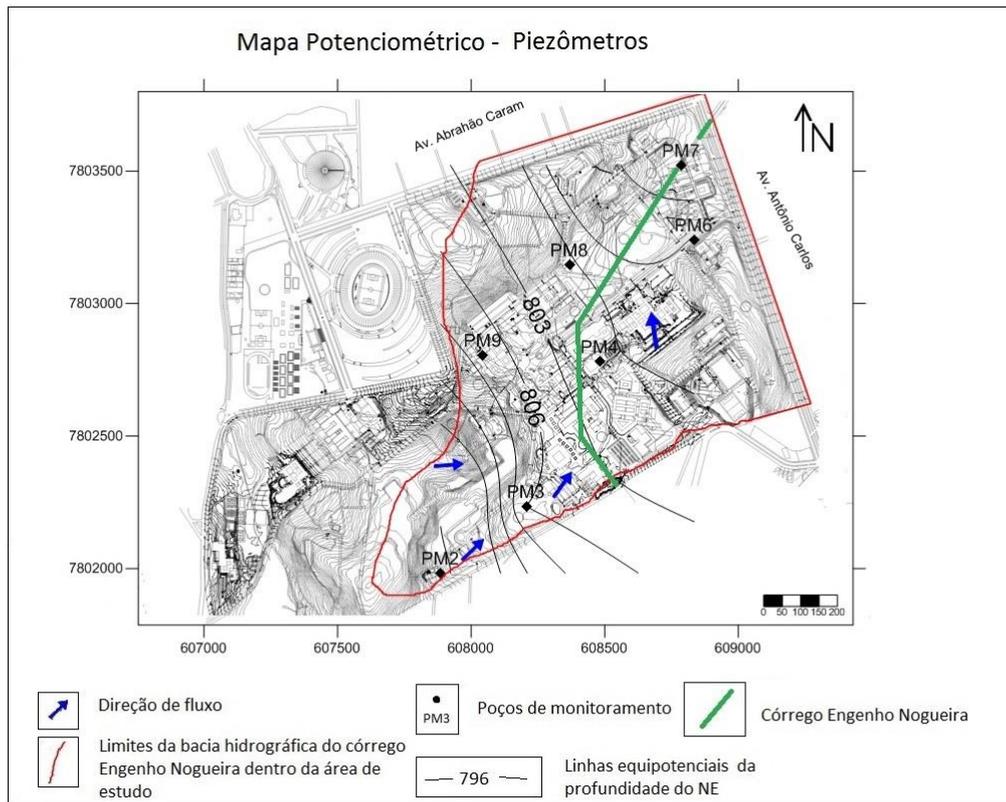


Figura 15. Mapa potenciométrico do Aquífero Poroso – mês de junho 2000.

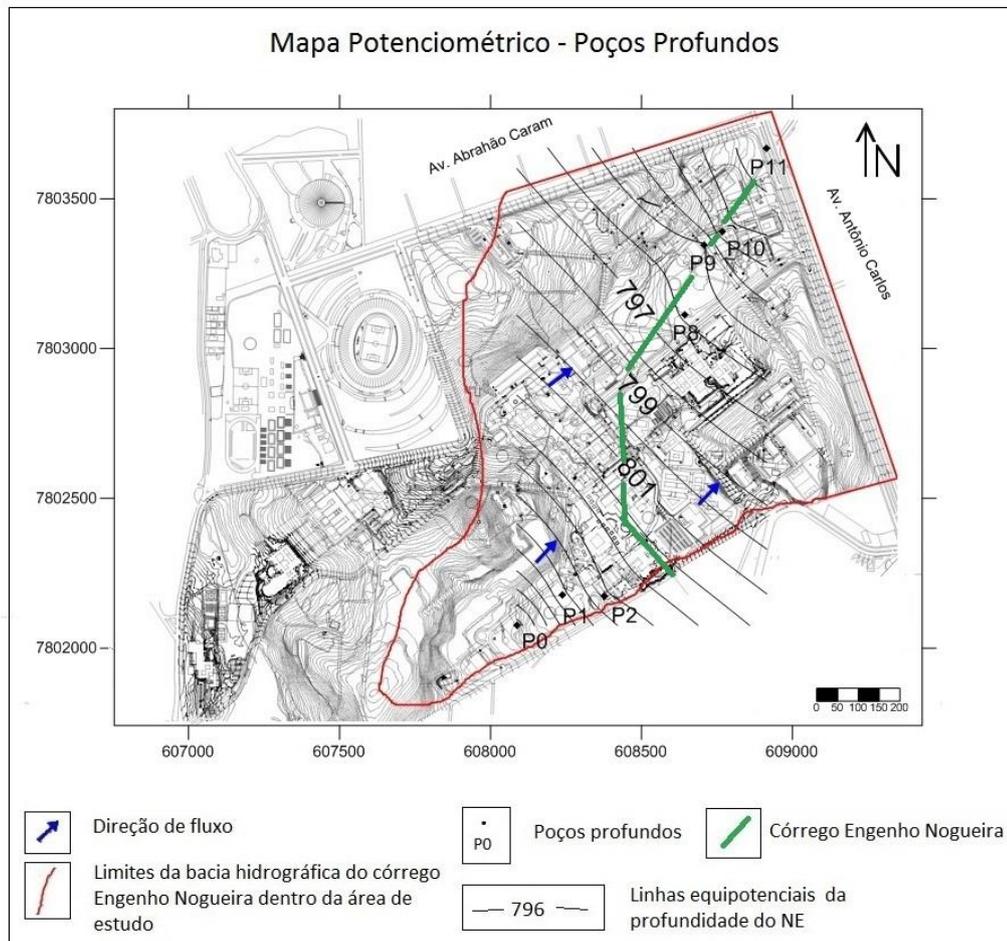


Figura 16. Mapa potenciométrico do Aquífero fissural/misto – mês de junho 2000.

Verificou-se assim, que a superfície potenciométrica em ambos os aquíferos segue, grosso modo, a conformação do relevo. Entretanto, a topografia suave ao longo do vale do córrego Engenho Nogueira não pode ser ignorada do ponto de vista de infiltração nas porções não impermeabilizadas.

Foi ainda realizada uma espacialização da variação do nível de água dos aquíferos poroso (Fig. 17) e fraturado (Fig. 18), de modo a se identificar as zonas que efetivamente são mais susceptíveis à recarga.

Observa-se na figura 17 que mais elevados valores de oscilação positiva do NA ocorrem próximos a zona de descarga, majoritariamente PM7 e secundariamente PM6. Este fato deve estar relacionado a dois fatores. Primeiramente em função de esses piezômetros estarem próximos ao exutório de toda área de estudo, região que recebe toda a descarga hídrica subterrânea. O outro fator deve-se ao já mencionada presença de espessa camada de argila na base do PM7. Outra região onde estão valores elevados de oscilação positiva do NA, é a zona de recarga. Embora com valores bem mais modestos que o encontrado na zona de descarga. Nela estão os piezômetros PM9 e PM2.

Para os poços profundos as maiores variações de nível de água ocorreram na região de descarga, na

porção NE próximas à Avenida Antônio Carlos (P11) e a S (P2 e P0), próximos ao córrego Engenho Nogueira, em sua porção a céu aberto, e nas imediações da zona de recarga. Estes últimos podem estar recebendo recarga indireta a partir do córrego enquanto o P11, por estar localizado no exutório da área de estudo apresenta esse valor elevado de oscilação de NA.

7.4. Profundidade do nível potenciométrico

A profundidade do nível potenciométrico é um importante fator que pode influenciar no quantitativo da recarga, pois quanto maior for a espessura da zona não saturada, maior a possibilidade de dispersão da água infiltrada.

Observou-se, entretanto, que a profundidade do nível de água no caso estudado possui pouca influência na infiltração como se observa nas Tabelas 11 e 12. 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. Uma explicação plausível é a heterogeneidade litológica no perfil do solo, o que dificulta essa análise, pois a essa característica pode ser primordial em relação à profundidade do nível d'água.

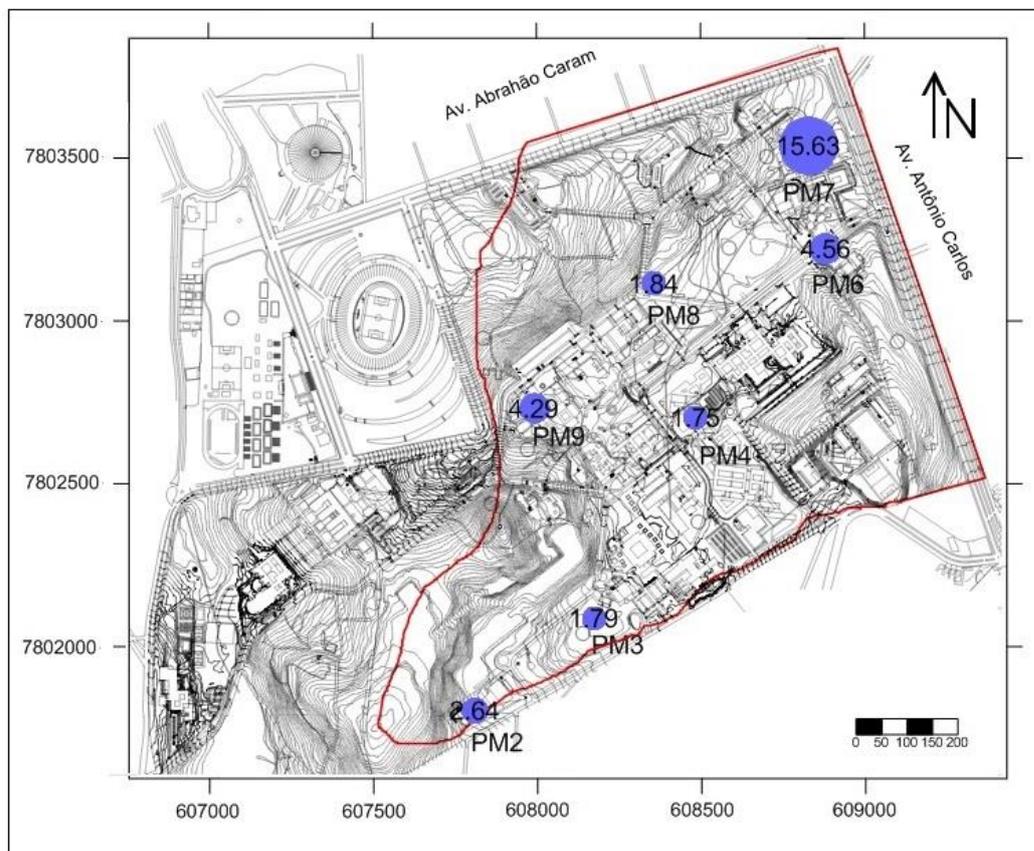


Figura 17. Variação total do nível de água calculada nos piezômetros no ano 97/98.

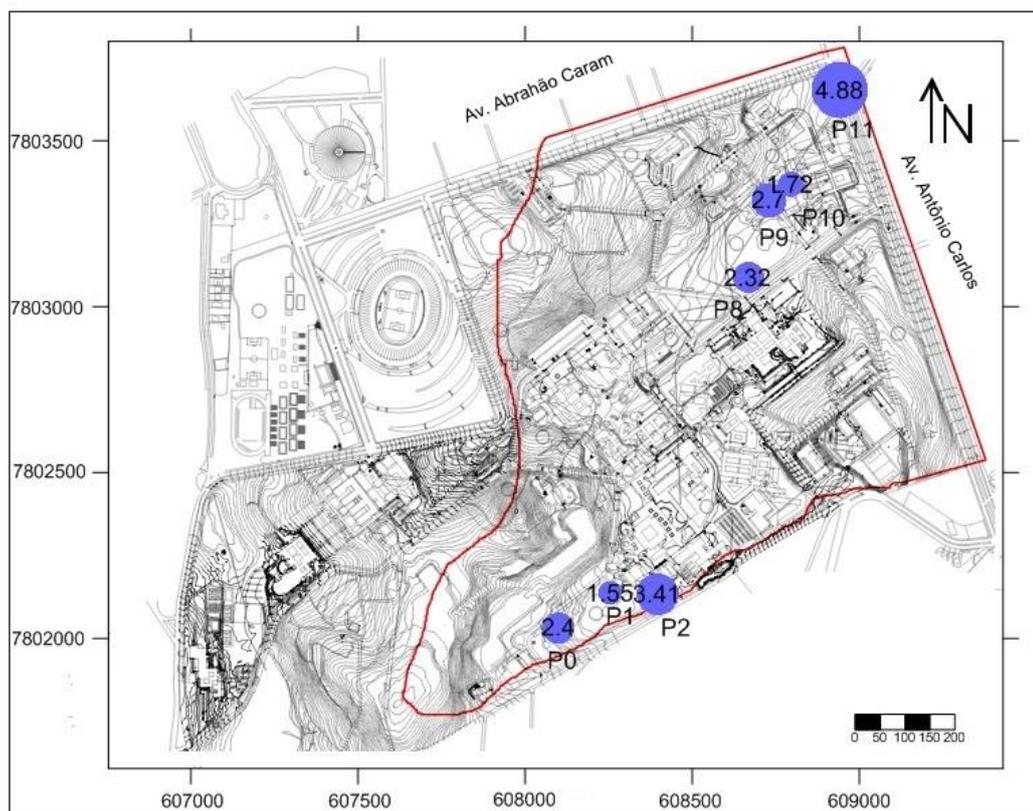


Figura 18. Variação total do nível de água calculada nos poços profundos para o ano 97/98.

Tabela 11. Coeficiente de correlação da variação do nível de água com a sua profundidade 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 12. Coeficientes de correlação da variação do nível de água com a sua profundidade 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	

7.5. Investigação da conexão hidráulica entre os aquíferos

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. Seguiram-se testes 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, os valores destas correlações estão expressos na Tabela 13.

Dos quatro pares de poços analisados, três exibiram correlações médias moderadas a forte, confirmando uma nítida e significativa conexão hidráulica entre os meios poroso e fraturado (Tab. 13). O par P10 e PM7 apresentou uma correlação ínfima e de valor negativo, sem significado físico. Digno de nota é o comportamento oposto desses poços, no teste de correlação da variação do nível de água com a precipitação: enquanto o aquífero fraturado (P10) exibiu os mais ínfimos valores ou mesmo ausência de correlação (Tab. Sete) o PM7 mostrou a mais alta correlação, 0,86 nos três anos hidrológicos analisados (Tabela 8).

A espessa lente argilosa verificada no meio poroso (PM7) deve ser estender até o local do P10, pois nota-se uma presença muito maior de argilas do que de areias nas camadas superiores do perfil

litológico desse poço, explicando a ausência de correlação do nível de água do P10 com a precipitação (Tab. 8).

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.

7.6. Cálculo da recarga – Variação do nível estático

Para o cálculo da recarga usou-se o valor do Sy (0,09) calculado em testes de bombeamento realizados na área de estudo por Carvalho Filho (1997). Esse autor encontrou para o ano hidrológico de 1997 valores de recarga variando de 22 a 42% do total de chuva.

A Tabela 14 mostra os valores calculados de recarga pontuais neste estudo para os piezômetros. Os valores de Sy mudam entre os piezômetros, isso em função do material encontrado no entorno dos mesmos. O PM6 e o PM7 estão em meio a uma densa lente de argila que provoca uma maior elevação do nível de água, resultando em um aquífero suspenso, sendo assim o valor de Sy utilizado no cálculo de recarga para estes poços é referente a este material, como descrevem Healy & Cook (2002). Para os demais poços, que não sofrem influência do material no seu entorno, foi utilizado o valor de Sy calculado para a área por Carvalho Filho (1997).

Os percentuais de recarga, entre todos os poços, variam de 9,32% a 33,52%. Os valores acima de 40% devem ser vistos com ressalva.

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.

8. CONCLUSÕES

Entre os fatores que influenciam na recarga a precipitação é o principal especialmente no sistema poroso, como esperado. Sendo assim anos de pouca precipitação ou de muita precipitação tendem a direcionar a profundidade do NA bem como os aquíferos estarem fortemente dependentes da quantidade de precipitação.

Embora no aquífero fraturado as correlações entre os dados do NA e a Precipitação, sejam fracas, a sua existência já é indicativo da influência do aquífero poroso sobre o fraturado, exercendo sobre este uma recarga indireta.

A conexão hidráulica entre o sistema poroso e fraturado foi confirmada pela forte a moderada correlação obtida entre os seus níveis d'água. A textura dos solos ao longo do perfil do solo também exerce uma influência relevante na recarga dos aquíferos, sendo esta maior nas áreas com predominância de argilas em relação às áreas com predominância de areia.

A profundidade do nível estático foi, entre todos os fatores analisados, o de menor influencia no comportamento da infiltração de água nos aquíferos, provavelmente pela forte heterogeneidade litológica verificada tanto em pontos de cargas hidráulicas mais elevadas como menos elevadas.

Tabela 13. Coeficientes de correlações entre as medidas de nível de água dos poços profundos (PP) e poços de monitoramento (PM).

PP	PM	97/98	98/99	99/00	Média	Característica do PP	Textura PM.	Distância PP-PM (m)
P10	PM7	-0,10	-0,22	-0,31	-0,21	FRAT / SCONF	63% argilas 37% areias	120
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	85
P0	PM2	0,89	0,44	0,64	0,65	SEM DADOS	31% argilas 37% silte arenoso 32% solo residual jovem	300

Tabela 14. Valores da recarga por período de monitoramento. Recarga total (mm) e relativa (%) em função da precipitação (P.)

	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	% 97/98	% 98/99	% 99/00	
PM2	0,09	1660	5150	4550	11,29	49,60	33,52	
PM3	0,09	1470	1220	2360	10,00	11,75	17,39	
PM4	0,09	1370	1550	2870	9,32	14,93	21,14	
PM6	0,039	4100	8340	6560	12,09	34,81	20,94	
PM7	0,039	10820	4160	5870	31,90	17,36	18,74	
PM8	0,09	1480	1370	2740	10,07	13,20	20,18	
PM9	0,09	3650	0	0	24,83			

Valores discrepantes em negrito

A recarga aquífera é complexa e regida não por somente um fator e sim por um conjunto de fatores que associados entre si. Por isso uma análise estatística multivariada faz-se essencial para se compreender o fenômeno, objeto do monitoramento automatizado que está em execução e que certamente complementar as análises já realizadas com este estudo, assim como este servirá de base de informação e subsídio para futuras análises e compreensões do comportamento dos níveis potenciométricos e da recarga para esta área de estudo.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA Agência NACIONAL DE ÁGUAS, 2007. Disponibilidade e demanda de recursos hídricos no Brasil. Cadernos de Recursos Hídricos, Brasília.
- Beato, D.A.C. (org)., 2001. Projeto Pampulha: Estudo hidrogeológico da bacia da Pampulha. Belo Horizonte. CPRM/PHB/.
- Beato, D.A.C.; Medeiros; M.J.; Drews, M.G.P. & Dutra, GM., 2003. Impactos Urbanos em Águas Subterrâneas: Bacia da Lagoa da Pampulha, Belo Horizonte - MG. Minas Gerais. Revista água subterrânea, 17.
- Carvalho Filho, C.A. 1997. Caracterização Hidrodinâmica de Parte do Sistema Aquífero da Bacia do Campus – UFMG/ Belo Horizonte, Minas Gerais. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 162 p.
- Costa, W.D. 2002. 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. 321p.
- Feitosa, F.A.C; Manoel Filho, J. (org)., 2008. Hidrogeologia Conceitos e Aplicações. 3ª ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID, UFPE, p391.
- Healy, R.W. & Cook, P.G., 2002. Using Groundwater Levels to Estimate Recharge. Hydrogeology Journal, 10:91-109 p.
- Landim, P.M.B, Monteiro, R.C & Corsi, A.C. Introdução à confecção de mapas pelo software Surfer. Geomatemática. Disponível em: www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html. Acesso em: 15/ 5/2012
- Rebouças, A.C., 2002. Águas subterrâneas. In: REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. (Org.) Águas Doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. São Paulo. Escrituras, p.:433-460.
- Silva, A.B.; Carvalho, E.T.; Fantinel, L.M.; Romano & A.W.; Viana, C.S., 1995. Estudos geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos e geoambientais integrados no Município de Belo Horizonte. Relatório Final. Belo Horizonte. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. UFMG/IGC/FUNDEP. 150p.
- Sousa, A. Coeficiente de Correlação Linear de Pearson. Depto. Matemática. Disponível em: http://www.aurea.uac.pt/pdf_MBA/coef_correl_Pearson.pdf. Acessado em 12/04/2012
- Vaccaro, A.; Caldera, G.R; Granato, M.F.; Souza, R.R.C. & Nascimento, T.S., 2009. Relatório Parcial da Proposta de Diagnóstico Ambiental da Bacia do Córrego Engenho Nogueira. Trabalho Temático 1. Departamento de engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.
- Wahnfried, I. & Hirata, R.C.A., 2005. Comparação de Métodos de Estimativa de Recarga de Aquíferos em Uma Planície Aluvionar na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo). São Paulo. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 10.
- Projeto Manuelzão, 2004. Mapa de localização do Córrego Engenho Nogueira. Disponível em: http://www.manuelzao.ufmg.br/assets/files/Textos%20mobilizacao/1096_mapa_engenho_nogueira.JPG Acessado entre abril e maio de 2012.