

Modelo numérico de fluxo subterrâneo de Barro Branco

Uma vez definidas as unidades hidroestruturais e as condições de contorno, foi iniciada a construção do modelo numérico 3D da micro-bacia de Barro Branco. O programa escolhido foi o FEFLOW – *Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System* (Diersch, 1998).

O FEFLOW é um programa interativo de simulação de processos de fluxo e transporte de massa e de calor na água subterrânea e na zona não saturada. Este programa foi considerado o mais adequado por utilizar o método dos elementos finitos, que é mais versátil para lidar com geometrias complicadas, contornos irregulares, condições de contorno internas ao domínio, como rios ou zonas de falha, e níveis d'água dinâmicos (Anderson & Woessner, 2002), e por suportar bem malhas pesadas, com grande número de elementos, necessárias para a modelagem de problemas como bacias hidrográficas. Outra característica determinante para a escolha deste programa, como já mencionado no item 4.2, é a possibilidade de acoplamento do fluxo não saturado com o saturado, permitindo a avaliação da recarga direta através dos diferentes tipos de solo que ocorrem na bacia. O acoplamento dos fluxos não saturado-saturado permite também que se obtenha uma distribuição de carga hidráulica mais acurada por considerar a zona não saturada do solo. O programa também aceita arquivos no formato *shape*, possibilitando que a construção do domínio, definição espacial dos contornos e atribuição dos parâmetros de fluxo se faça através da leitura direta deste tipo de

arquivo. Com isso é possível a construção do modelo conceitual dentro de um ambiente SIG e a posterior transferência de todas as suas características geométricas diretamente para o FEFLOW.

Foram feitas, a princípio, simulações de fluxo saturado em regime permanente. Posteriormente, foram introduzidos os parâmetros de fluxo não saturado dos solos e o regime transiente, com base nos dados de precipitação medidos em Barro Branco de janeiro de 2006 a julho de 2007.

6.1

Equações de Fluxo

O problema de fluxo proposto na bacia de Barro Branco envolve apenas os aspectos quantitativos do fluxo subterrâneo, incluindo a avaliação da recarga e das relações entre bombeamento e vazão descarregada pelos cursos d'água superficiais. As equações envolvidas são as do fluxo saturado, em 3D, e do fluxo parcialmente saturado, através do perfil de solo, (1D).

A forma geral da equação do fluxo subterrâneo saturado em 3D é:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (\text{Eq. 16})$$

Onde K_x , K_y e K_z são as componentes do tensor de condutividade hidráulica, S_s , o armazenamento específico e R^* um termo geral, positivo, que representa a entrada de um volume de fluxo no sistema, por unidade de volume do aquífero, por unidade de tempo. Para simular a saída de um volume de fluxo $R^* = -W^*$ (Anderson & Woessner, 2002).

O fluxo vertical, não saturado, através do perfil de solo (1D) é descrito pela Equação de Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \quad (\text{Eq. 17})$$

Onde θ é o teor de umidade volumétrico, ψ é o potencial mátrico e $K(\psi)$ é a condutividade hidráulica não saturada (em função do potencial mátrico).

6.2

Malha de Elementos Finitos

O processo de geração da malha de elementos finitos de Barro Branco começou a duas dimensões, com a importação do contorno da bacia na forma de arquivo *shape* (ESRI) para dentro do FEFLOW, dentro do módulo *Mesh Generator* do programa. Foi também importado o arquivo *shape* (ESRI) da hidrografia simplificada, sem as barragens, que foi adicionada como referência para a criação de nós sobre os rios. A seguir, foi gerada a malha 2D automaticamente, usando o gerador TMesh e a opção de baixo refinamento da malha nas proximidades do rio.

A topografia foi criada usando o módulo 3D do programa, que trabalha com fatias e camadas para construir o domínio. As fatias são os topos de cada camada, onde são atribuídos todos os parâmetros de fluxo e propriedades dos materiais que as constituem. As curvas de nível, com 5 m de equidistância, foram transformadas em pontos dentro do programa ArcGIS (ESRI) e importadas para dentro do FEFLOW, que usou esta “nuvem” de pontos para interpolar o relevo. O programa oferece diversas opções de interpolação, tendo sido escolhido o método Akima (Akima, 1978), *spline* que utiliza polinômios de 3º grau e se caracteriza por uma grande eficiência computacional. As fatias do modelo, e suas respectivas camadas, foram então geradas a partir da superfície da bacia, subtraindo-se da coordenada *z* (cota altimétrica) o valor espessura que se desejava para cada camada. A nuvem de pontos resultante foi utilizada para reproduzir o relevo da camada superficial, em cada fatia, através de nova interpolação. Ao final, obteve-se como resultado uma distância constante entre as fatias.

O tipo de elemento escolhido foi o prisma triangular de 6 nós (Figura 27). A malha final utilizada na simulação calibrada possui 282.576 elementos e 155.272 nós. Abaixo, na Figura 28, está representada a malha em 2D, e na Figura 29, um detalhe mostrando o refinamento da malha em torno do rio simplificado (sem as barragens). Na figura 30 é apresentada a malha em 3D, com exagero vertical de 1,15.

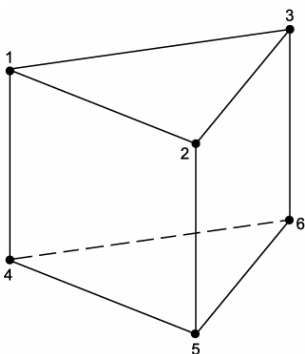


Figura 27 - Elemento finito utilizado - prisma triangular de 6 nós. Adaptado de Cook et al. (1989)

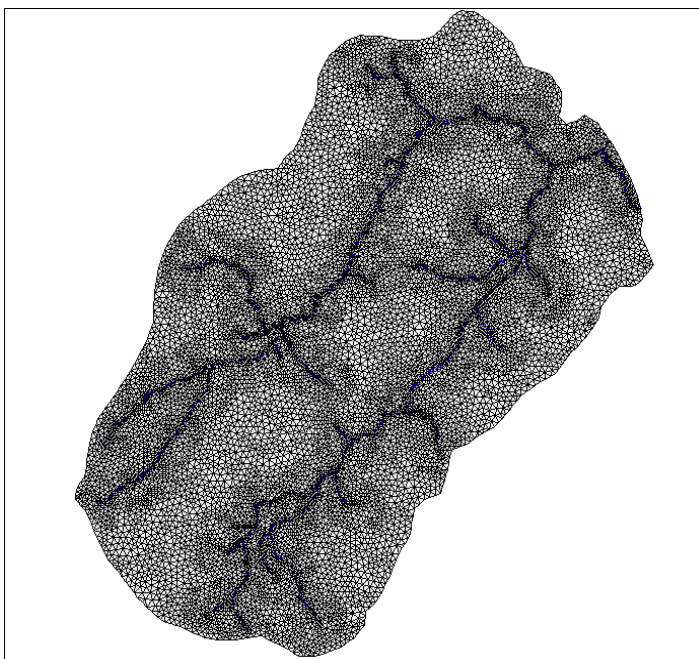


Figura 28 - Malha de elementos finitos em 2D da micro-bacia de Barro Branco

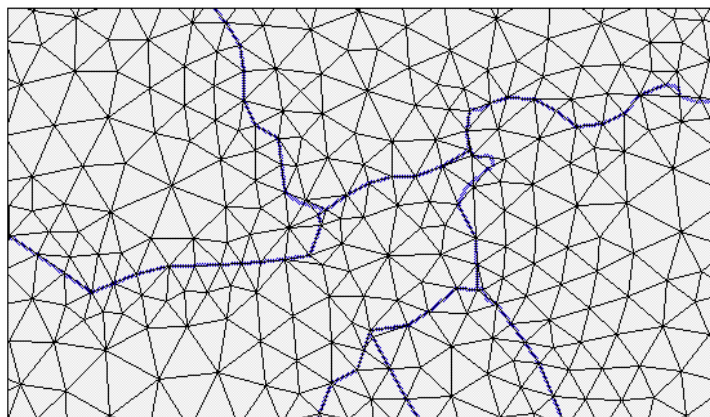


Figura 29 – Detalhe do refinamento da malha sobre o rio simplificado

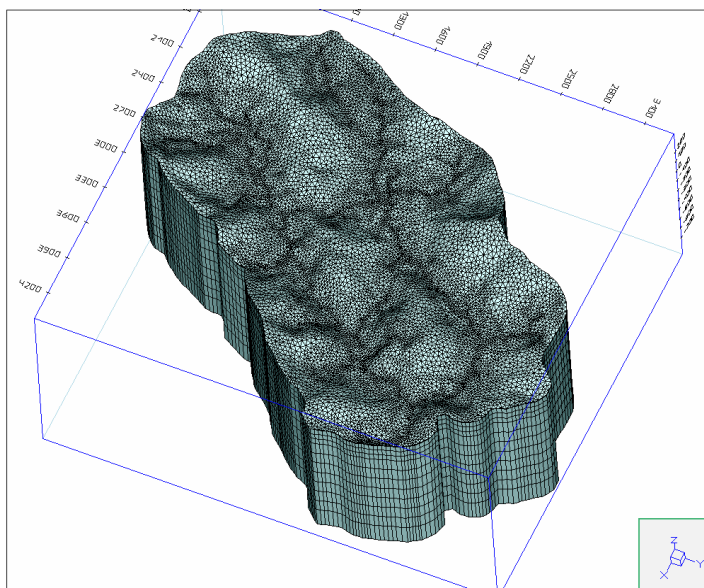


Figura 30 – Sólido com a malha de elementos finitos da micro-bacia de Barro Branco, exagero vertical de 1:1,15.

6.3

Dados de Entrada

Os dados que alimentaram o modelo numérico da micro-bacia de Barro Branco foram discutidos e justificados no Capítulo 4. Segue abaixo a descrição dos procedimentos utilizados na construção do modelo e a especificação dos parâmetros utilizados.

6.3.1

Condições Iniciais

A condição inicial de distribuição de carga hidráulica na bacia era desconhecida, com exceção das cotas dos rios, interpoladas do modelo digital de elevação. O poço profundo e os dez poços rasos existentes na área não eram suficientes e nem estavam bem distribuídos, impossibilitando a sua utilização para a interpolação do nível freático. Optou-se então por simular apenas o fluxo saturado, em regime permanente, onde o rio foi inserido como carga prescrita e a recarga considerada equivalente a 15% da precipitação média anual, assumida como 1200 mm/ano. Foram executadas várias simulações considerando duas classes de recarga, morros e baixadas. Os valores de recarga em cada classe foram

variados (respeitando-se o volume global de 15% da precipitação) e variou-se também a condutividade hidráulica, até a obtenção de convergência. Posteriormente, o valor da recarga, conjugado com os valores de condutividade hidráulica, foi refinado e as cotas dos rios ajustadas até a obtenção da melhor correlação entre as cargas hidráulicas computadas e as observadas nos poços. A distribuição de carga resultante foi então exportada em formato *shape* (ESRI) e alimentada nas simulações transientes seguintes que consideraram o fluxo não saturado. Novamente, a distribuição de carga hidráulica resultante, correspondente ao melhor ajuste entre as cargas computadas e observadas, foi utilizada como distribuição inicial de novas simulações transientes. Nessas simulações atribuiu-se uma taxa de recarga constante por um longo período (8 anos em média) até a estabilização do nível estático dos poços (caracterizando o alcance de regime permanente). Finalmente, a distribuição de carga resultante destas simulações que apresentou melhor correlação com o nível dos poços foi considerada como condição inicial das simulações seguintes, que utilizaram os dados hidrológicos reais, medidos na bacia. Assim, as condições iniciais de carga hidráulica foram obtidas no próprio processo de calibração do modelo.

6.3.2

Condições de contorno

As condições de contorno do modelo numérico da micro-bacia de Barro Branco (Fig. 31) foram definidas no Capítulo 5 e serão detalhadas a seguir:

- 2º tipo – Fluxo imposto. Divisores de água e limite inferior do domínio, a 1000 m de profundidade, com $q=0$;
- 3º tipo – Transferência. Córregos e afluentes com carga hidráulica de referência correspondendo à altura do MDE nos vales e subtraindo-se 3 m. A transferência se dá através de uma camada colmatante, de 1 m de espessura, representando o sedimento do fundo dos canais, com taxas de transferência influente $K_{inf} = 1,72 \times 10^{-1}/d$, e efluente, $K_{eff} = 3,44 \times 10^{-1}/d$;
- 2º tipo – Fluxo imposto na superfície do domínio, correspondendo à recarga subterrânea direta: $q = R$.

Todo o fluxo entra na bacia através da recarga direta, em sua superfície, e escoa como fluxo de base dos rios, deixando a bacia através de uma única seção de canal representada pela estação fluviométrica.

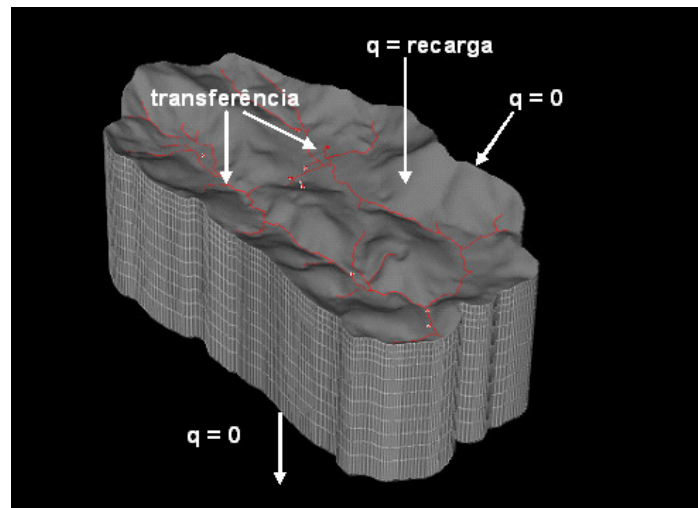


Figura 31 – Condições de contorno

6.3.3

Parâmetros de Fluxo

- Condutividade hidráulica – As condutividades hidráulicas das unidades hidroestruturais definidas foram indicadas na Tabela 3, item 5.3.4.1;
- Coeficiente de Armazenamento – Foi atribuído um valor global de 0,002;
- Condutividade hidráulica não saturada – Os parâmetros de fluxo não saturado (modelo de Van Genuchten) usados no modelo estão relacionados na Tabela 9 abaixo. O mapa de solos com os perfis utilizados se encontra na Figura 20 (Capítulo 5) e os parâmetros das curvas de retenção correspondentes na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros de fluxo não saturado aplicados no modelo de Barro Branco

Tipo de Solo	Curva de Retenção	a (1/m)	n (VG)	Sat. Residual	Sat. Max	K _s (cm/s)	n
Argissolo latossólico	70 BA	10,619	1,38838	0,49105	1	52,128	0,503
Argissolo c/ afl. de rocha	70 Bt2	7,451	1,48053	0,53786	1	7,776	0,515
Afloramento de rocha	81 3Cgn1	7,200	1,29127	0,72000	1	0,000	0,020
lagoa	81 Apg	7,678	1,27346	0,59902	1	0,864	0,611
Luvissolo	83 Bt2	7,983	1,41480	0,62635	1	4,704	0,554
Argissolo	90 BA	22,388	1,39418	0,38783	1	600,000	0,526
Argissolo Sapr. c/ Af. R.	90 Bt2	7,841	1,41999	0,63563	1	44,640	0,494
Glei	NS4 Ap	46,661	1,28025	0,33844	1	286,560	0,653
Argissolo c/ Nitossolo	PF9 Bt1	14,630	1,47868	0,48259	1	218,880	0,603
Nitossolo	PF9 Bt2	10,979	1,44172	0,57955	1	30,480	0,616

6.3.4

Recarga

Na tabela 10 são apresentadas as porcentagens da precipitação diária aplicadas em cada classe de relevo, de janeiro de 2006 a julho de 2007, correspondendo ao fluxo de recarga no período.

Tabela 10 – Porcentagens da precipitação aplicadas em cada classe de relevo

Período	% da Precipitação por Classes de Relevo				
	Mont	F. Ond.	O. F.Ond	Ondulado	Pl. S. Ond.
Jan a Ago 2006	3,7	3,7	12,2	18,5	164,5
Set a Jul 2007	4,1	4,1	13,6	20,6	183,3

6.4

Calibração

A calibração do modelo foi obtida após diversas simulações onde foram variadas as entradas de recarga, condutividade hidráulica, e carga hidráulica ao longo do rio. Os resultados foram confrontados com as medidas dos níveis estáticos nos dez poços rasos monitorados na bacia.

O registro diário da precipitação ao longo de 602 dias (de 6 de janeiro de 2006 a 31 de julho de 2007) foi utilizado para a atribuição da recarga, que foi aplicada como uma porcentagem da precipitação, segundo as cinco classes de recarga descritas no Capítulo 5. O valor total anual de recarga aplicado foi estimado através do método de separação da hidrógrafa, como descrito no item

5.3.5, para os anos hidrológicos de 2005/2006 e 2006/2007, e ajustado proporcionalmente para o período monitorado.

Nas simulações de ajuste do modelo, o rio foi colocado como contorno de 1º tipo, tanto nas simulações permanentes quanto nas transientes, com a distribuição de carga hidráulica ao longo do rio interpolada com as cotas do modelo digital de elevação. Uma vez obtida uma distribuição de carga hidráulica próxima aos valores medidos nos 10 poços rasos, aplicou-se esta condição como inicial das simulações permanentes e transientes subseqüentes, onde o rio foi inserido como um contorno de 3º tipo (transferência através de uma camada colmatante, dependente de uma carga de referência). Os valores de espessura da camada colmatante, bem como a sua condutividade hidráulica, foram obtidos durante a calibração, por tentativa e erro. A carga de referência dos rios foi variada, em toda a sua extensão e de uma forma global, acima e abaixo das cotas calculadas pelo MDE, em intervalos de 1 m, desde 1 m acima até 4 m abaixo das cotas dos vales, até a obtenção da melhor correspondência com as cargas medidas na bacia. A taxa de transferência entre o rio e o aquífero foi encontrada fixando-se a espessura da camada colmatante (sedimentos do fundo do rio) em 1 m e variando-se os valores de condutividade hidráulica, para o fluxo influente e efluente, sempre com valores menores que os aplicados para a camada de solos. O melhor ajuste foi conseguido com a condutividade hidráulica para o fluxo influente (K_{inf}) duas vezes menor que para o fluxo efluente, como especificado no item 5.3.4.3.

Os valores de carga hidráulica computados na simulação considerada calibrada foram comparados com os valores medidos nos poços, seguindo a orientação da Designação ASTM: D5490-93, (2002). Foram calculados os resíduos entre os valores computados pelo modelo e os valores medidos nos 10 poços rasos, para todos os meses em que foram efetuadas medidas de nível d'água. As vazões resultantes na estação fluviométrica foram comparadas com as cargas hidráulicas medidas no piezômetro x-6R e no nó n11, situado no local da estação fluviométrica, onde os valores de carga hidráulica computados no nó foram aplicados como alturas linimétricas na curva chave da estação.

Infelizmente, por problemas internos ao projeto PRODETAB/Aquíferos, o monitoramento da carga hidráulica nos poços rasos sofreu interrupções. Sendo assim, no ano de 2006, todos os dez poços foram monitorados mensalmente, de

janeiro a agosto, e em 2007, uma parte dos poços foi monitorada de janeiro a maio. Na tabela 11 estão relacionados os poços utilizados na calibração e o regime de monitoramento, e na Figura 32 é apresentado o mapa com a sua localização.

Tabela 11 – Poços utilizados na calibração e regime de monitoramento

ID DRM	ID FEF	UTM N	UTM E	COTA (m)	MONITORAMENTO					
					2006	2007				
					Jan- Ago	J	F	M	A	M
15R	1	7633426	190822	149,52	X		X			X
17R	2	7634351	190719	142,72	X					
19R	3	7634193	191106	162,51	X		X	X	X	X
20R	4	7634171	191031	138,28	X					
21R	5	7634618	191944	136,34	X					
23R	6	7635199	192404	126,02	X					
55R	7	7634191	190885	138,43	X	X	X	X	X	X
x-4R	8	7634341	190647	139,91	X	X	X	X	X	X
x-5R	9	7634105	190484	140,43	X	X	X	X	X	X
x-6R	10	7635182	192245	125,11	X	X	X	X	X	X

Os poços x-4R e x-6R (poços 8 e 10 nas listagens) foram escolhidos para a análise da variação temporal dos resíduos, e também, para comparação com os valores de resíduo máximo, mínimo e desvio padrão dos resíduos, por estarem localizados em pontos estratégicos da bacia, e por serem piezômetros especialmente instalados para o monitoramento do nível freático. Todos os outros pontos são poços rasos residenciais que foram aproveitados para o monitoramento. O piezômetro x-6R está localizado ao lado da estação fluviométrica do córrego de Barro Branco e o piezômetro x-4R está localizado no vale principal da bacia (Figura 32).

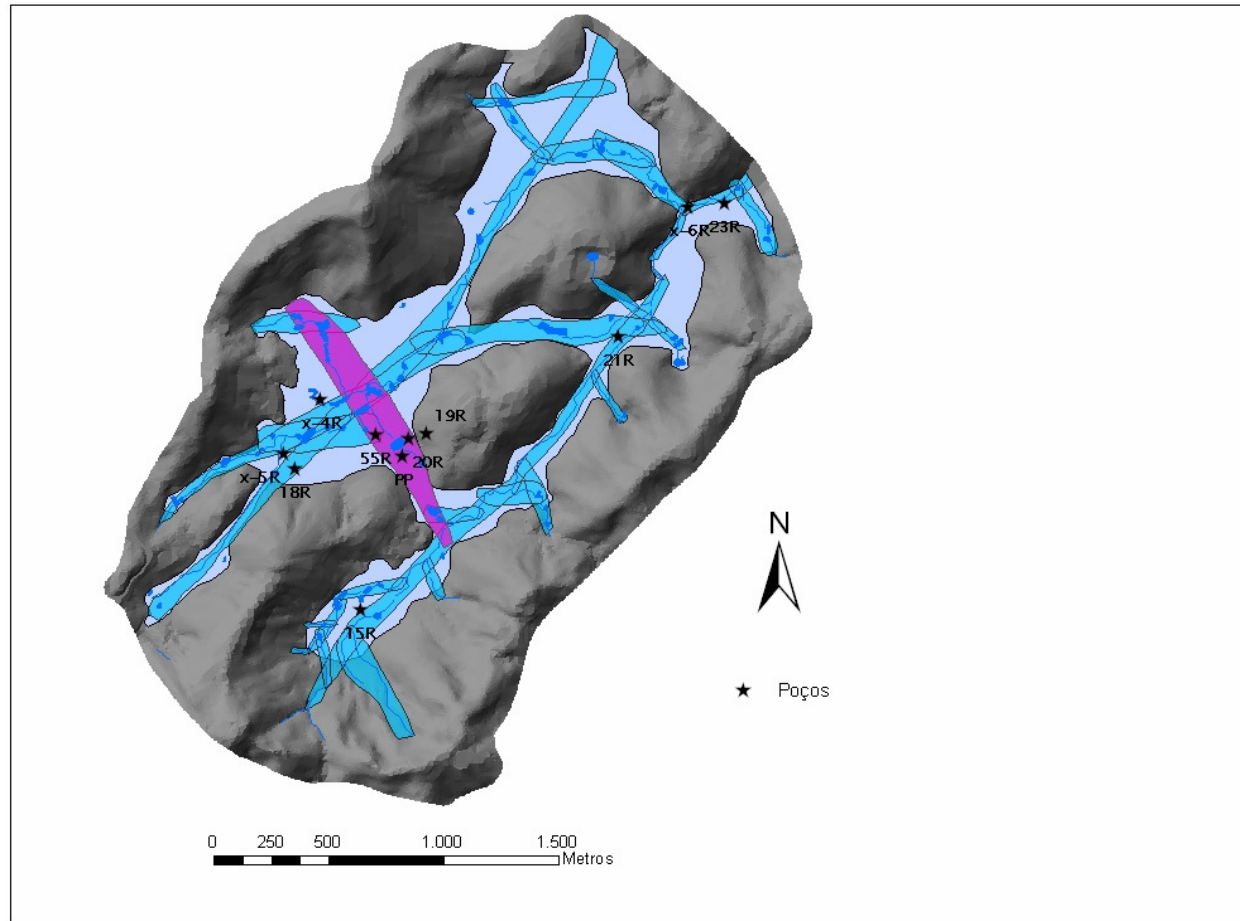


Figura 32 – Mapa de localização dos poços utilizados na calibração do modelo

Optou-se pela utilização do Modelo Digital de Elevação como referência altimétrica para toda a modelagem por não existir um levantamento com precisão adequada das cotas dos poços de monitoramento. Sendo assim, o critério de calibração levou em consideração valores máximos de carga hidráulica, de acordo com as cotas do MDE, para os pontos monitorados, sendo os valores máximos de carga hidráulica admissíveis nos poços x-6R e x-4R de 125,0 m e de 139,6 m, respectivamente. Abaixo, na tabela 12, é apresentada a listagem dos resíduos máximo, mínimo, médio e o desvio padrão, para os meses de fevereiro, abril e agosto de 2006, onde:

$$R_i = h_i - H_i \quad (\text{Eq. 18})$$

$$DPR = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i - H_i)^2 \right]^{0,5} \quad (\text{Eq. 19})$$

R_i = Resíduo de carga hidráulica no ponto i

h_i = Carga computada no ponto i

H_i = Carga medida no ponto i

DPR = Desvio Padrão dos Resíduos

R_{max} = Resíduo Máximo

R_{min} = Resíduo Mínimo

R_{med} = Média dos valores de resíduo

R_{abs} = Valor Absoluto do Resíduo

MR_{abs} = Média dos Valores Absolutos dos Resíduos

Tabela 12 – Resíduos de Carga Hidráulica da simulação calibrada

Dia/mês	Poços	h_i	H_i	R_i (Eq. 16)	$R_{i \text{ abs}}$	R_{max}	R_{min}	R_{med}	MR_{abs}	DPR (Eq.17)
57 dias/ fevereiro	1	148,317	148,600	-0,284	0,284	1,741	-0,828	0,524	0,815	0,528
	2	141,884	141,720	0,164	0,164					
	3	160,500	159,250	1,250	1,250					
	4	139,970	138,280	1,690	1,690					
	5	134,462	135,290	-0,828	0,828					
	6	125,073	125,420	-0,347	0,347					
	7	139,258	137,810	1,448	1,448					
	8	138,439	138,330	0,108	0,108					
	9	140,631	138,890	1,741	1,741					
	10	123,954	123,660	0,294	0,294					
117 dias/ abril	1	147,684	148,620	-0,936	0,936	1,562	-0,959	0,292	0,840	0,493
	2	141,623	141,770	-0,147	0,147					
	3	160,500	159,120	1,380	1,380					
	4	139,842	138,280	1,562	1,562					
	5	134,311	135,270	-0,959	0,959					
	6	125,117	125,370	-0,254	0,254					
	7	139,024	137,850	1,174	1,174					
	8	137,888	138,330	-0,442	0,442					
	9	140,229	138,800	1,429	1,429					
	10	123,795	123,680	0,115	0,115					
237 dias/ agosto	1	147,050	148,560	-1,510	1,510	1,975	-2,223	-0,024	1,331	1,061
	2	141,180	142,720	-1,540	1,540					
	3	160,393	158,510	1,883	1,883					
	4	139,565	137,590	1,975	1,975					
	5	133,947	136,170	-2,223	2,223					
	6	125,063	126,020	-0,957	0,957					
	7	138,738	137,680	1,058	1,058					
	8	137,754	138,300	-0,546	0,546					
	9	139,773	138,440	1,333	1,333					
	10	123,718	123,430	0,288	0,288					

Outra medida de calibração utilizada é o Desvio Padrão do Resíduo Médio (s), que dá a medida de desvio dos resíduos em torno do Resíduo Médio.

$$s = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - R_{\text{med}})^2}{n - 1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq. 18})$$

Na figura 33 pode-se acompanhar o comportamento dos resíduos máximo, mínimo, médio, da média dos valores absolutos dos resíduos e do desvio padrão do resíduo médio (Eq. 18), ao longo dos meses monitorados em 2006. Em 2007 o monitoramento foi muito irregular, rendendo um conjunto heterogêneo de dados, não sendo adequada a aplicação destas medidas de calibração para análise conjunta dos mesmos, já que em janeiro foram monitorados apenas 4 poços, em fevereiro e maio, 6 poços, e 5 poços em março e abril (tabela 11). Na figura 34 são apresentadas as cargas hidráulicas medidas e computadas ao longo do ano de 2006, nos poços x-4R e x-6R.

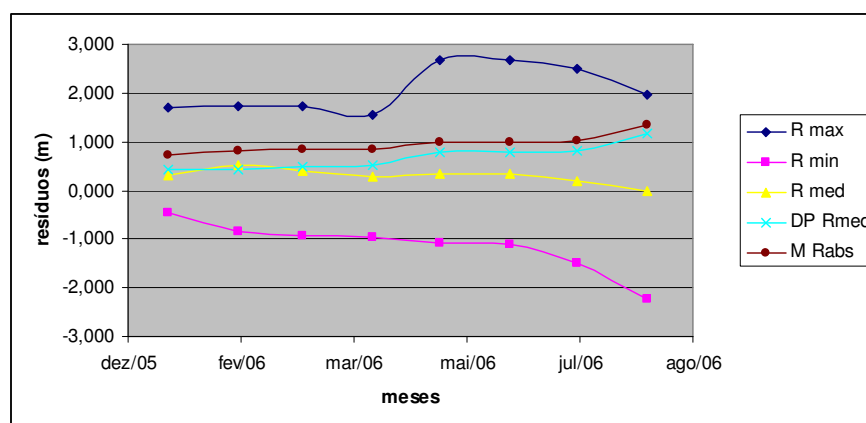


Figura 33 – Comportamento dos resíduos de carga hidráulica ao longo dos meses de monitoramento em 2006.

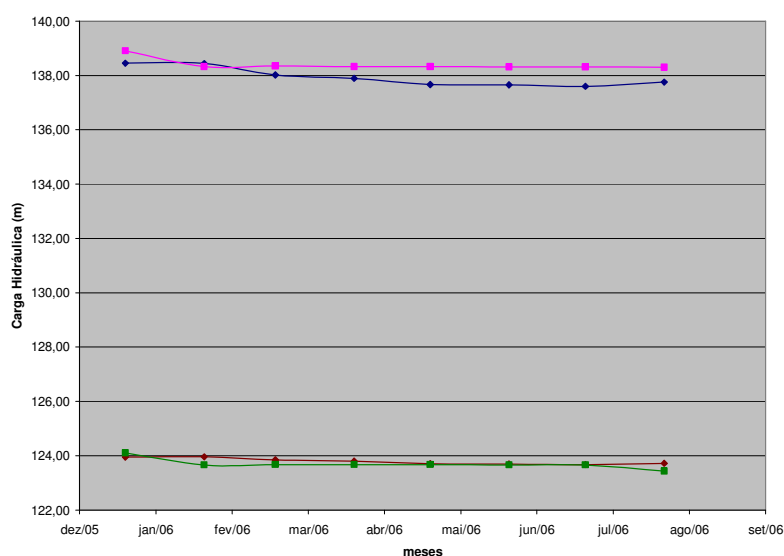
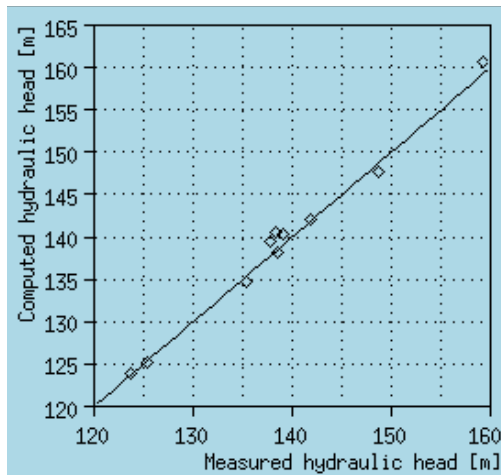
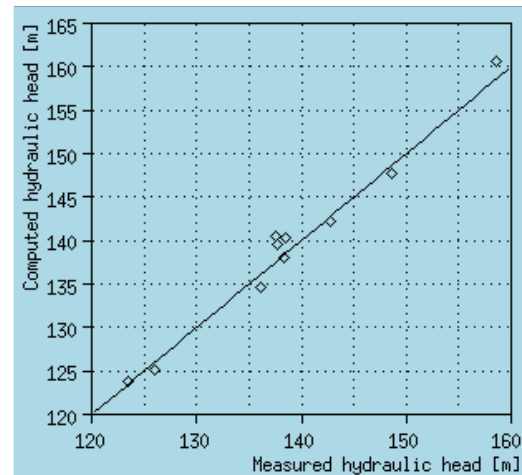


Figura 34 – Cargas hidráulicas computadas e medidas dos poços x-4R e x-6R no período de monitoramento de 2006.

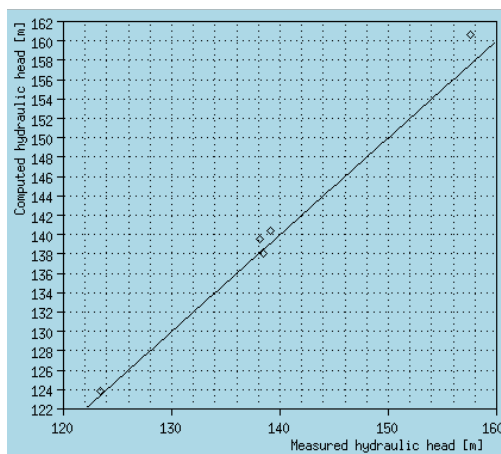
A figura 35 corresponde aos diagramas de dispersão de cargas hidráulicas computadas versus cargas hidráulicas medidas, gerados pelo programa FEFLOW para os meses de janeiro e agosto de 2006, e março e maio de 2007.



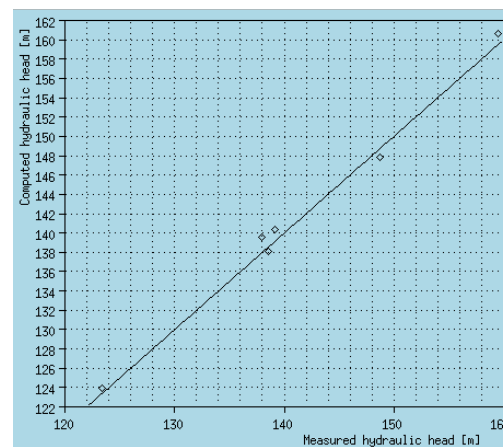
a



b



c



d

Figura 35 – Diagramas de dispersão de cargas hidráulicas computadas versus cargas hidráulicas observadas: a) Janeiro de 2006; b) Agosto de 2006; c) Março de 2007 e d) Maio de 2007.

A calibração do modelo em relação à vazão medida na estação fluviométrica de Barro Branco só pôde ser feita de forma indireta, uma vez que os resultados do modelo dizem respeito à distribuição de carga hidráulica e de vazões do fluxo subterrâneo e não fornecem resultados de fluxo superficial. Se considerarmos o nó da malha de elementos finitos, correspondente ao local da estação equivalente a um piezômetro imaginário, com o fundo localizado no leito do rio, é possível comparar as cargas hidráulicas computadas no nó com as leituras de altura linimétrica tomadas na estação. A estação fluviométrica do córrego do Barro Branco está representada no modelo pelo nó n11, mas a cota de referência das medidas linimétricas na estação (*zero* da régua linimétrica) era desconhecida e, portanto, se usou de um artifício para fazer a comparação entre as alturas registradas na estação e as cargas hidráulicas computadas pelo modelo. O poço x-6R se encontra a 3,5 m de distância da estação fluviométrica de Barro Branco. As medidas de carga de julho e agosto de 2006, no poço, se mantiveram em 123,43 m. Assumindo-se que, para estes meses, devido ao baixo índice de precipitação (4,1 e 9,1 mm respectivamente), a altura linimétrica no rio teria origem exclusivamente no fluxo subterrâneo (recessão), e que a menor carga hidráulica medida no poço e a menor altura linimétrica registrada na estação ocorreram simultaneamente, tomou-se a carga de 123,43 m como equivalente à medida de 0,045 m na estação (menor altura registrada). Estimando-se um gradiente de 0,005 (levando-se em conta a topografia no entorno da estação), chegou-se ao valor de 123,41 m para a carga hidráulica no nó n11, correspondente à cota da lâmina d'água no rio. Assim a cota do *zero* da régua linimétrica foi encontrada subtraindo-se a leitura de 0,047 deste valor, chegando-se a 123,36 m. O valor encontrado para o *zero* da régua linimétrica, apesar de aproximado, pôde ser utilizado para avaliar se as vazões computadas pelo modelo corresponderam às vazões medidas, no mínimo em relação às ordens de grandeza envolvidas. A estimativa foi feita considerando-se o modelo calibrado em relação às cargas hidráulicas medidas nos 10 poços monitorados.

Na tabela 13 são apresentadas as cargas máxima e mínima computadas no nó n11, e os valores máximo e mínimo das medidas de altura linimétrica média, medidas na estação, transformados em carga. Na tabela 13, são apresentadas as alturas médias mensais registradas na estação, as cargas hidráulicas correspondentes e as cargas computadas no nó n11 e no piezômetro x-6R. Não foi

possível o estabelecimento de uma relação temporal entre as alturas medidas na estação e as leituras no poço x-6R, pois não foi executada nenhuma campanha de monitoramento integrado de água subterrânea e superficial. A defasagem entre o tempo de elevação do estágio do rio e do nível d'água no poço x-6R após eventos de precipitação não foi, portanto, estabelecida. Na figura 36 é apresentada uma comparação entre a variação das cargas computadas no poço x-6R e no nó n11 com as cargas hidráulicas correspondentes às alturas linimétricas mínima, média e máxima, registradas (utilizando-se a cota de 123,36 m como zero da régua). A figura 5.10 corresponde à variação da vazão computada e das vazões mínima, média e máxima medidas, no período monitorado.

Tabela 13– Cargas mínimas e máximas na estação fluviométrica

	H n11 computado (m)	H n11 medido (m)	H linimétrica média (m)
Mínima	123,58	123,36	0,045
Máxima	124,53	123,60	0,392
ΔH	0,95	0,35	0,347

Tabela 14 – Carga computada e altura linimétrica média no período monitorado

Leituras	H n11	H x-6r	leit. med	leit. min	leit. máx	H lin.média
jan/06	123,87	123,98	123,30	123,24	123,52	0,0870
fev/06	123,87	123,99	123,40	123,34	123,47	0,1880
mar/06	123,76	123,87	123,35	123,29	123,49	0,1416
abr/06	123,71	123,81	123,32	123,28	123,37	0,1100
mai/06	123,62	123,73	123,30	123,25	123,47	0,0940
jun/06	123,61	123,72	123,26	123,24	123,28	0,0450
jul/06	123,58	123,69	123,26	123,25	123,31	0,0530
ago/06	123,63	123,73	123,28	123,27	123,30	0,0742
set/06	123,63	123,74	123,31	123,28	123,38	0,1020
out/06	123,66	123,76	123,33	123,28	123,46	0,1200
nov/06	123,81	123,93	123,54	123,28	123,89	0,3300
dez/06	123,80	123,92	123,52	123,40	123,59	0,3050
jan/07	123,96	124,08	123,60	123,44	124,55	0,3920
fev/07	124,53	124,64	123,52	123,45	123,61	0,3090
mar/07	124,05	124,16	123,42	123,33	123,60	0,2130
abr/07	123,93	124,04	123,43	123,34	123,88	0,2180
mai/07	123,95	124,07	123,43	123,39	123,46	0,2230

H n11 - Carga computada no nó 11 correspondente à estação fluviométrica

H x-6R - Carga computada no poço x-6R

leit. min, méd e máx – alturas linimétricas transformadas em carga, com a cota de referência de 123,21 m

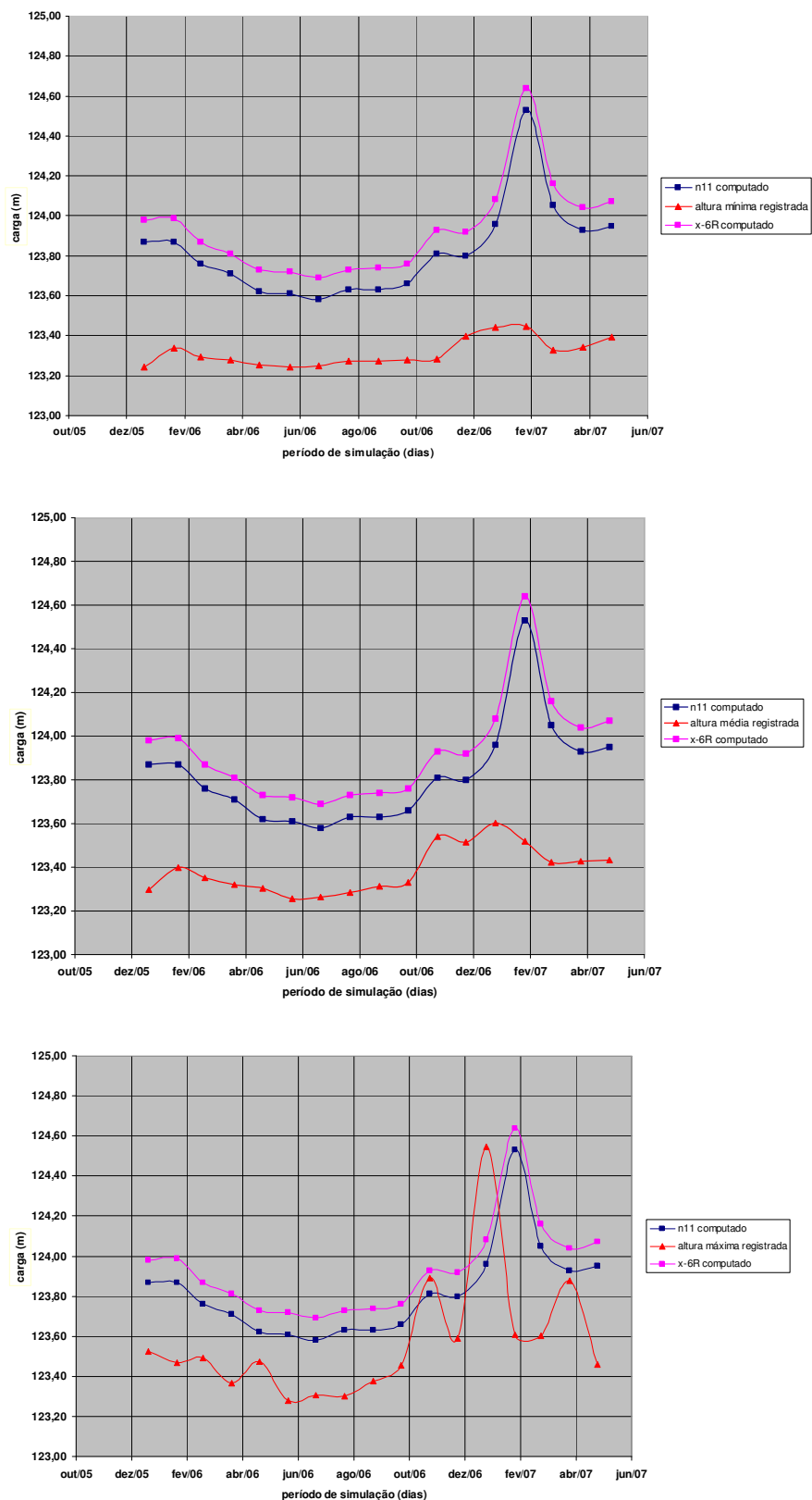


Figura 36 – Comparação entre as cargas hidráulicas computadas nos pontos x-6R e n11 e as alturas mínimas, médias e máximas mensais registradas na estação fluviométrica

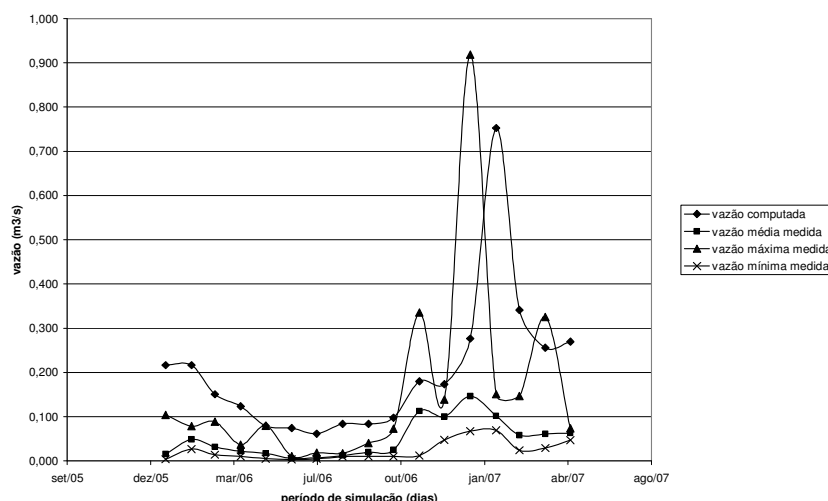


Figura 37 – Vazões computadas pelo modelo e vazões mínimas, médias e máximas mensais

É importante ressaltar que os valores utilizados correspondem à média das vazões mínima, média e máxima registradas para cada mês de monitoramento. Pode-se observar que os valores de vazão computados pelo modelo, considerando a cota de referência estimada, estão dentro de uma faixa de valores aceitáveis quando comparados com as vazões medidas. No entanto, a falta de dados de campo relativos às cotas envolvidas e a ausência de um monitoramento integrado do fluxo superficial e das cargas hidráulicas subterrâneas não permitiram a calibração do modelo em relação ao escoamento superficial.

6.5

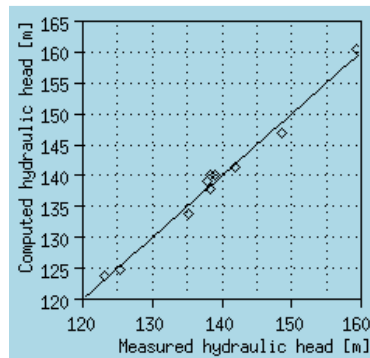
Verificação da calibração

A calibração do modelo foi verificada através da aplicação de um novo conjunto de dados hidrológicos, com a atribuição da recarga nas mesmas proporções segundo as classes de relevo. Ao invés da chuva diária de janeiro de 2006 a julho de 2007, utilizou-se a série histórica da precipitação média mensal da estação de Cardoso Moreira. Os resultados foram comparados com a leitura dos poços, desta vez utilizando os dados desde outubro de 2005 a maio de 2007, correspondente ao período total de monitoramento dos mesmos (o monitoramento dos poços começou antes do monitoramento hidrometeorológico de Barro Branco).

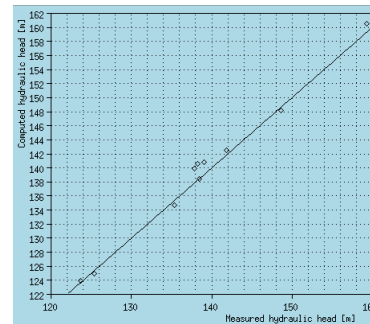
Abaixo, são apresentados os diagramas de dispersão de carga calculada versus carga medida nos 10 poços, em diversos estágios de tempo (Figura 38), e na tabela 15 são apresentados os resíduos de carga hidráulica para os mesmos meses da simulação de calibração, e ainda para o mês de outubro de 2005.

Tabela 15 – Resíduos de carga hidráulica e desvio padrão de resíduos, da série histórica de recarga, no período de calibração (outubro de 2005 a agosto de 2006)

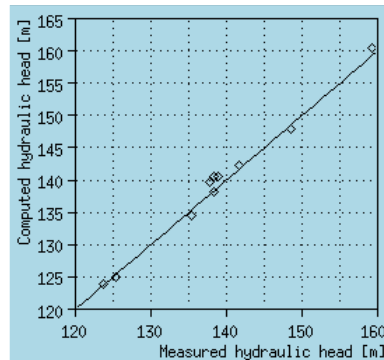
Dia/mês	Poço	h_i	H_i	R_i	R_{abs}	$R_{máx}$	$R_{mín}$	R_{med}	MR_{abs}	DPR (Eq 17)
6511 dias out/05	1	146,979	148,620	-1,641	1,641	1,719	-1,641	0,115	1,014	0,626
	2	141,445	141,850	-0,405	0,405					
	3	160,413	159,280	1,133	1,133					
	4	139,999	138,280	1,719	1,719					
	5	133,925	135,290	-1,365	1,365					
	6	124,725	125,360	-0,635	0,635					
	7	139,064	137,790	1,274	1,274					
	8	137,784	138,230	-0,446	0,446					
	9	140,000	138,940	1,060	1,060					
	10	123,668	123,210	0,458	0,458					
6631 dias fev/06	1	147,900	148,600	-0,700	0,700	2,238	-0,700	0,599	0,979	0,739
	2	142,261	141,720	0,541	0,541					
	3	160,544	159,250	1,294	1,294					
	4	140,519	138,280	2,238	2,238					
	5	134,603	135,290	-0,687	0,687					
	6	124,977	125,420	-0,443	0,443					
	7	139,700	137,810	1,890	1,890					
	8	138,257	138,330	-0,073	0,073					
	9	140,633	138,890	1,743	1,743					
	10	123,844	123,660	0,184	0,184					
6691 dias abr/06	1	147,556	148,620	-1,064	1,064	2,104	-1,064	0,449	0,980	0,698
	2	142,059	141,770	0,289	0,289					
	3	160,525	159,120	1,405	1,405					
	4	140,384	138,280	2,104	2,104					
	5	134,390	135,270	-0,880	0,880					
	6	124,941	125,370	-0,429	0,429					
	7	139,486	137,850	1,636	1,636					
	8	138,047	138,330	-0,283	0,283					
	9	140,416	138,800	1,616	1,616					
	10	123,779	123,680	0,098	0,098					
6811 dias ago/06	1	146,743	148,560	-1,817	1,817	2,378	-2,358	-0,042	1,483	1,314
	2	141,292	142,720	-1,428	1,428					
	3	160,395	158,510	1,885	1,885					
	4	139,968	137,590	2,378	2,378					
	5	133,812	136,170	-2,358	2,358					
	6	124,634	126,020	-1,386	1,386					
	7	138,992	137,680	1,312	1,312					
	8	137,663	138,300	-0,637	0,637					
	9	139,885	138,440	1,445	1,445					
	10	123,620	123,430	0,190	0,190					



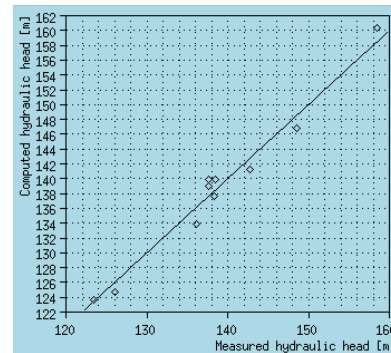
a)



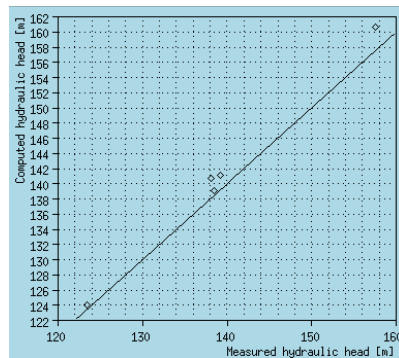
b)



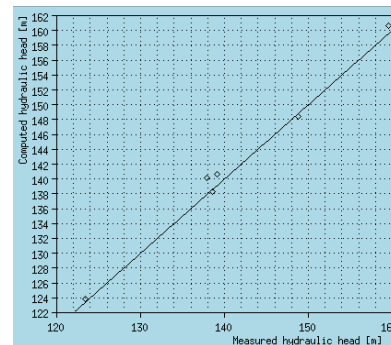
c)



d)



e)



f)

Figura 38 – Diagramas de dispersão das cargas hidráulicas computadas versus medidas para a simulação da série histórica de 20 anos. A) Outubro de 2005; b) Janeiro de 2006; c) Fevereiro de 2006; d) Agosto de 2006; e) Março de 2007 e f) Maio de 2007

A análise dos dados apresentados na tabela 15 permite concluir que não houve nenhuma discrepância entre a simulação histórica e a simulação calibrada com relação aos valores encontrados de desvio padrão e média dos valores absolutos dos desvios. Nos diagramas de dispersão, foi observada uma boa

concordância entre os valores computados e medidos no campo, não havendo também discrepância quando comparados aos resultados da simulação que utilizou os dados da estação de Barro Branco.

A calibração foi verificada também em termos de volume médio escoado na bacia. O escoamento foi medido ao longo do ano civil de 2006 (já que os dados disponíveis não abrangeram um ano hidrológico completo), e parte do ano de 2007, totalizando 602 dias de monitoramento da vazão. As vazões médias mensais escoadas nas duas estações instaladas na bacia foram comparadas com o volume de fluxo total através do contorno dos rios, calculado pelo modelo. Foi feito o balanço global de fluxo para os dois períodos no FEFLOW e o volume total de fluxo efluente foi comparado com o volume total correspondente à soma das vazões médias mensais das duas estações. O resultado se encontra exposto na tabela 16, onde também foi incluída uma estimativa de volume subtraído do escoamento para o uso na irrigação das lavouras existentes na bacia. O cálculo foi feito utilizando-se uma vazão média por bomba de irrigação de $4,0 \text{ m}^3/\text{h}$ (Bhering, 2007), multiplicada pelo número de produtores de tomate cadastrados na bacia em 2006 (18 produtores, (Fidalgo, 2006)) com um regime de bombeamento de 6 horas por dia, durante 120 dias, correspondentes aos meses de maio a agosto (época do cultivo do tomate). Para o período de 602 dias este volume foi dobrado, uma vez que o monitoramento da estação em 2007 abrangeu o período de janeiro a julho.

Tabela 16 – Comparação entre os volumes escoados, computados e medidos e a correção relativa aos volumes estimados para a irrigação

	Volumes (m^3)	365 dias	602 dias
Balanço de Massa Acumulado	Total computado	2,023E+06	4,213E+06
	Total medido	1,794E+06	3,484E+06
	Resíduo	2,295E+05	7,290E+05
	Volume estimado p/ irrigação	5,184E+04	1,037E+05
	Resíduo corrigido	1,777E+05	6,254E+05
Resíduos convertidos em fluxo (mm)	Resíduo/período	41,96	133,28
	Resíduo/dia	0,1150	0,2214
	Resíduo/dia est.chuvosa	0,3497	0,7405
	Resíduo corrigido/período	32,49	114,33
	Resíduo corrigido/dia	0,0890	0,1899
	Resíduo corrigido/dia est.chuvosa	0,2707	0,6352

O volume total escoado, computado pelo modelo, foi de $2,023 \times 10^6 \text{ m}^3$ por ano (janeiro a dezembro de 2006) e de $4,21 \times 10^6 \text{ m}^3$ em 602 dias (de janeiro de 2006 a julho de 2007). O volume total medido foi de $1,794 \times 10^6 \text{ m}^3$ e de $3,484 \times 10^6 \text{ m}^3$ para os mesmos períodos. A diferença, ou resíduo, foi dividida pela área da bacia e pelo número de dias em cada período, resultando em um fluxo diário na superfície da bacia. O mesmo cálculo foi feito levando-se em consideração apenas os dias correspondentes à estação chuvosa para os dois períodos (120 e 180 dias respectivamente). Os resíduos resultantes, apresentados na tabela 16, foram considerados satisfatórios, levando-se em consideração os erros envolvidos nos procedimentos de aquisição de dados nas estações instaladas na bacia (a resolução do pluviômetro é de 0,254 mm, Moraes, 2007). Se a estimativa de volume subtraído da vazão para irrigação for levada em consideração, as diferenças entre as vazões computadas e medidas são ainda menores.

Deve-se lembrar que este modelo não reproduz o escoamento superficial, podendo apenas avaliar as relações entre a recarga subterrânea e o escoamento nos canais fazendo de um balanço de massa através do contorno que representa este escoamento (condição de 3º tipo, transferência entre aquífero e rio). Para uma avaliação mais precisa da relação entre a vazão medida no rio e a vazão descarregada através do fluxo de base, seria necessário um modelo que integrasse o fluxo subterrâneo ao escoamento superficial. Outra questão é a incerteza envolvida nos procedimentos de aquisição de dados hidrometeorológicos e a precisão dos equipamentos utilizados, que não foi considerada neste estudo e que necessita de uma avaliação no futuro.

6.6

Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade tem por objetivo avaliar a incerteza do modelo calibrado que está relacionada à incerteza da estimativa de parâmetros de alimentação deste modelo, tais como os parâmetros de fluxo, condições de contorno, geometria, etc. (Anderson & Woessner, 2002). *“A sensibilidade é a variação no valor de uma ou mais variáveis de saída, (tais como carga hidráulica), ou quantidades calculadas a partir destas variáveis, (como descargas subterrâneas), devido à variabilidade ou incerteza em um ou mais parâmetros de*

entrada de um modelo de fluxo subterrâneo (tais como propriedades hidráulicas ou condições de contorno)”, (ASTM/D 5611-94, 2002).

A sensibilidade do modelo calibrado da micro-bacia de Barro Branco foi analisada quanto aos parâmetros recarga, condutividade hidráulica e cota de referência dos rios, que quando variados dentro das faixas de valores utilizados na calibração mostraram uma maior alteração dos resultados, ou seja, mostraram uma maior sensibilidade. A avaliação da sensibilidade consistiu na variação sistemática destes parâmetros em uma faixa de valores possíveis, e na comparação entre os resultados obtidos e os do modelo calibrado, através da análise do comportamento dos resíduos de carga hidráulica e de vazões computadas.

Os parâmetros de fluxo não saturado não foram avaliados, em razão da pequena sensibilidade do modelo a estes parâmetros durante o processo de calibração. Para intervalos menores de tempo de simulação estes parâmetros podem ter um peso maior, pois foi observado que a sua influência diz respeito apenas ao tempo de chegada da frente de umidade ao nível freático. A recarga direta no modelo não depende dos parâmetros de fluxo não saturado, pois consiste em um fluxo prescrito na superfície do domínio. No entanto, o uso de parâmetros não saturados adequados é importante para a obtenção da distribuição de carga hidráulica na interface entre a zona saturada e não saturada, e na camada superficial, com base nas características dos solos locais.

A identificação do tipo de sensibilidade de cada parâmetro analisado seguiu a orientação da norma D5611-94/ASTM (2002). Existem quatro tipos de sensibilidade (Fig. 39) relacionados aos impactos que mudanças nos valores de entrada do modelo calibrado terão nas conclusões do mesmo.

As sensibilidades do tipo I e II não representam um problema, pois não provocam mudanças significativas nas conclusões do modelo. A sensibilidade do tipo III também não é motivo de preocupação, pois apesar da mudança nos valores de entrada afetar as conclusões do modelo, esses valores ao mesmo tempo o tiram da calibração. O tipo de sensibilidade que causa maiores problemas no processo de calibração de um modelo é o IV por invalidar os seus resultados, já que para toda uma faixa de valores dos parâmetros de entrada, em que o modelo pode ser considerado calibrado, as conclusões mudam de maneira significativa, não havendo mérito, portanto, na sua utilização. Este tipo de sensibilidade geralmente

requer um levantamento adicional de dados para diminuir a gama de valores possíveis dos parâmetros de entrada (ASTM D 5611-94, 2002).

		Mudança na calibração	
		não significativa	significativa
Mudança nas conclusões	não significativa	Tipo I	Tipo II
	significativa	Tipo IV	Tipo III

Figura 39 – Resumo dos tipos de Sensibilidade (modificado de ASTM, D 5611-94, 2002)

6.6.1

Recarga

Após a calibração do modelo, a recarga foi variada dentro da faixa de valores calculados com os dados de vazão da Estação de Cardoso Moreira, na simulação que reproduziu a série histórica de precipitação de 20 anos. Os valores variaram de 77 a 540 mm, sendo este último correspondente à recarga do ano de 2006 para 2007, quando houve uma intensa estação chuvosa. Os resultados obtidos para os diversos níveis de recarga mostraram que a carga hidráulica nos 10 poços de monitoramento se manteve dentro da faixa de valores observados na bacia, não tendo apresentado grandes variações, indicando uma sensibilidade do tipo IV deste parâmetro em relação à recarga.

A validação do modelo quanto aos seus aspectos preditivos e como ferramenta de suporte na gestão de reservas subterrâneas na bacia de Barro Branco depende de uma avaliação cuidadosa desta sensibilidade, pois a recarga é ao mesmo tempo um parâmetro de entrada e um dos objetivos da modelagem. O cálculo da recarga anual pelo fluxo de base serviu como uma referência de valores aproximados, que são geralmente menores que a recarga real (Risser, 2006). A

calibração deste parâmetro foi feita através da comparação do volume de fluxo efluente obtido na simulação de 602 dias, com o volume de fluxo total medido na estação de Barro Branco, tendo-se previamente calibrado a altura do rio e a condutividade hidráulica em relação à carga observada.

A sensibilidade do modelo ao parâmetro recarga foi então avaliada de forma sistemática em 8 simulações, através da aplicação de um fluxo constante na superfície da bacia, distribuído pelas classes de recarga previamente definidas, que, em volumes globais, variou de $1,039 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ a $6,952 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ como descrito na tabela 17. Os valores de recarga aplicados ficaram dentro da faixa observada na série histórica.

Tabela 17 – variação da recarga nas simulações de avaliação da sensibilidade do modelo a este parâmetro

Simulação	Recarga		
	m3/dia	m3/ano	mm/ano
1	1,04E+03	3,79E+05	69,34
2	1,66E+03	6,07E+05	111,04
3	2,46E+03	9,00E+05	164,45
4	2,64E+03	9,63E+05	176,12
5	2,70E+03	9,86E+05	180,19
6	3,25E+03	1,19E+06	216,86
7	3,90E+03	1,42E+06	260,24
8	4,71E+03	1,72E+06	314,24
9	5,70E+03	2,08E+06	379,97
10	6,06E+03	2,21E+06	404,00
calibrada	6,95E+03	2,54E+06	463,88

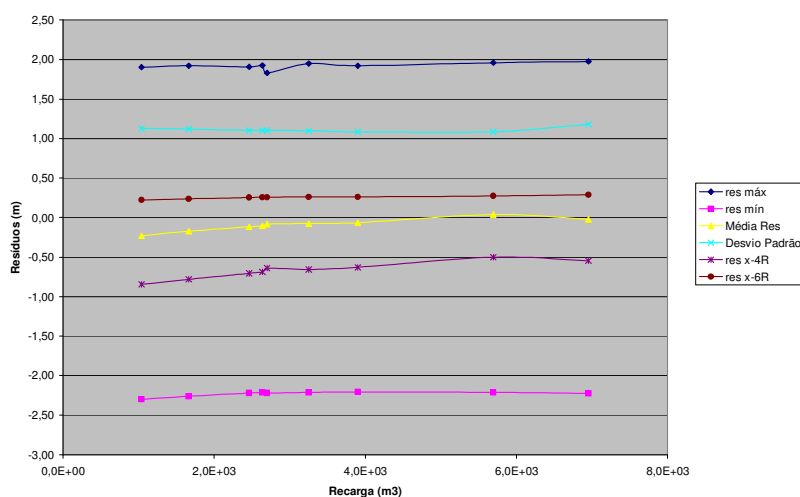


Figura 40 – Variação dos resíduos de carga hidráulica, desvio padrão e resíduos dos poços x-4R e x-6R em relação à recarga aplicada (agosto de 2006).

Na Figura 40 é apresentada a variação dos resíduos de carga hidráulica relativos ao mês de agosto de 2006. Observa-se que os resíduos médio e mínimo e o resíduo do poço x-4R mostram uma pequena variação em relação aos valores de recarga aplicada, e diminuem à medida que a recarga é aumentada, se mantendo constantes nas duas últimas simulações. O desvio padrão e o resíduo máximo do poço x-6R, contíguo à estação, se mantém praticamente inalterados. Na figura 41, observa-se que a carga hidráulica nos dois poços de controle praticamente não se altera, mantendo-se abaixo das cotas máximas admissíveis para estes dois pontos. Este comportamento caracteriza a sensibilidade do resultado de distribuição de carga hidráulica em relação à recarga como do tipo IV, pois não houve praticamente nenhuma mudança na calibração deste parâmetro e a estimativa da recarga é essencial para o entendimento da dinâmica de fluxo da bacia e a avaliação de suas reservas subterrâneas

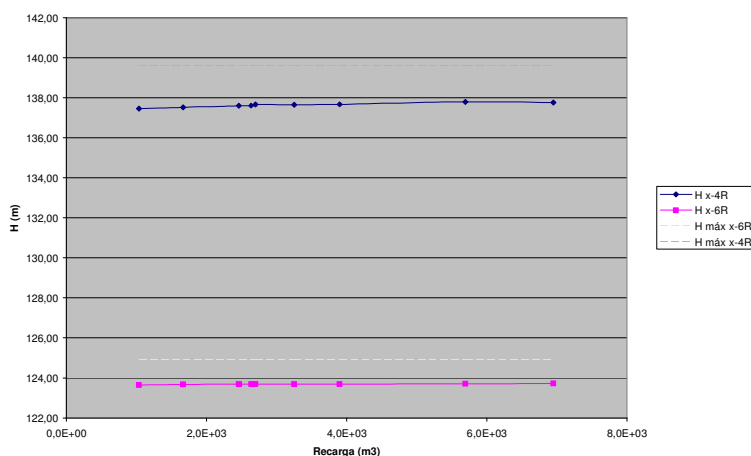


Figura 41 – Comportamento da carga hidráulica nos poços x-4R e x-6R em relação ao fluxo de recarga aplicado (agosto de 2006).

O resultado de vazão total efluente das 10 simulações, no período de 602 dias, por outro lado, apresentou uma grande sensibilidade ao valor de entrada de recarga (Figura 42). A curva de variação do volume de fluxo total com a recarga aplicada apresentou uma grande inflexão entre $5,7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ e $6,95 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$, evidenciando a existência de um valor crítico de recarga a partir do qual o volume

de fluxo efluente descarregado pelos córregos aumenta muito rápido em relação ao incremento de recarga aplicado.

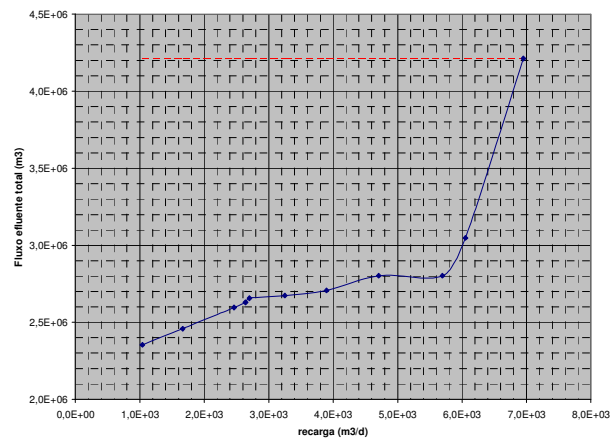


Figura 42 – Comportamento da carga hidráulica nos poços x-4R e x-6R em relação ao fluxo de recarga aplicado. Agosto de 2006.

Foi também observada uma grande variação nos valores relativos ao volume de fluxo influente das 10 simulações (Figura 43), caracterizando uma sensibilidade do tipo III deste resultado em relação à recarga.

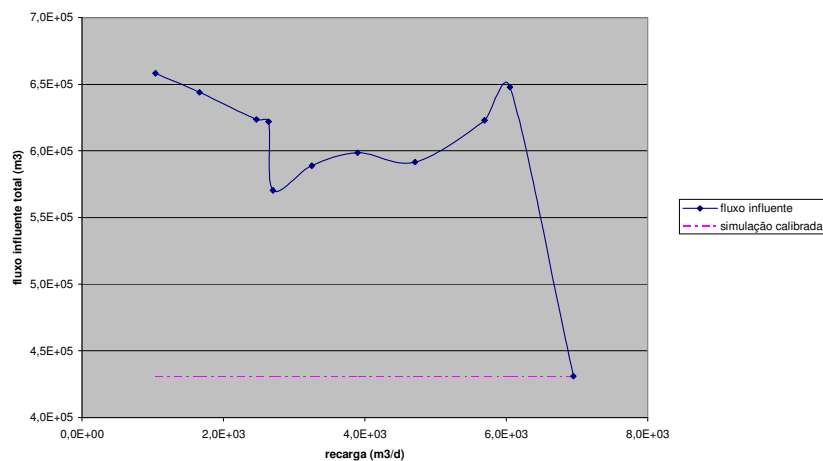


Figura 43 – Variação do volume total de fluxo influente em relação à recarga aplicada

6.6.2

Condutividade Hidráulica

A sensibilidade dos resultados de carga hidráulica, e dos volumes totais de fluxo, em relação aos valores de entrada de condutividade hidráulica foi avaliada através de 6 simulações. A condutividade hidráulica das quatro primeiras camadas de rocha do domínio, até a profundidade de 250 m, foi variada dentro de uma faixa de valores possíveis para as litologias envolvidas, como descrito na tabela 18. Os parâmetros da camada superficial de 5 m de espessura, que representa o solo, não foram modificados.

Na figura 44 estão representados os resíduos de carga hidráulica, o desvio padrão dos resíduos e os resíduos dos poços x-4R e x-6R, relativos ao mês de agosto de 2006. Foi também plotada a variação da carga hidráulica dos poços x-4R e x-6R em relação à condutividade hidráulica. O retângulo tracejado marca os valores da simulação calibrada. O comportamento do fluxo efluente em relação à condutividade hidráulica (Figura 45) também apresentou uma grande variação.

Tabela 18 – Valores de condutividade hidráulica aplicados no estudo de sensibilidade

simulação	camadas	Condutividade Hidráulica (m/s)		
		Zonas de fraturas	Zona de transição	Mação cristalino
1	2 e 3	2,5E-08	2,0E-09	2,0E-10
	4 e 5	1,0E-08	2,0E-09	2,0E-10
2	2 e 3	2,5E-07	2,0E-07	2,0E-08
	4 e 5	1,0E-07	1,0E-08	1,0E-09
3	2 e 3	1,0E-06	5,0E-07	5,0E-08
	4 e 5	2,5E-07	1,0E-07	1,0E-08
4	2 e 3	2,0E-06	1,0E-06	1,0E-07
	4 e 5	2,5E-07	2,0E-07	2,0E-08
calibrada	2 e 3	1,0 - 2,5E-06	2,0E-06	2,0E-07
	4 e 5	1,0E-06	1,0E-07	1,0E-08
6	2 e 3	4,0E-06	4,0E-07	4,0E-08
	4 e 5	4,0E-07	4,0E-08	4,0E-09
7	2 e 3	5,0E-06	1,0E-06	1,0E-07
	4 e 5	1,0E-06	1,0E-07	1,0E-08

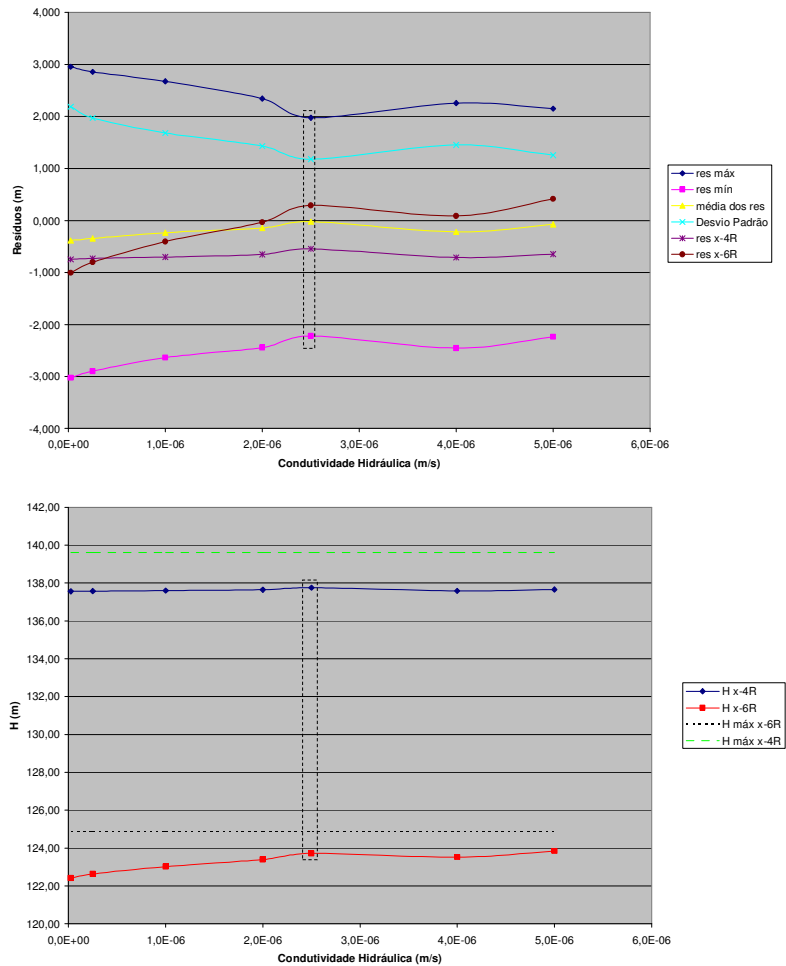


Figura 44 – Comportamento dos resíduos e da carga hidráulica dos poços x-4R e x-6R em relação à condutividade hidráulica. Agosto de 2006.

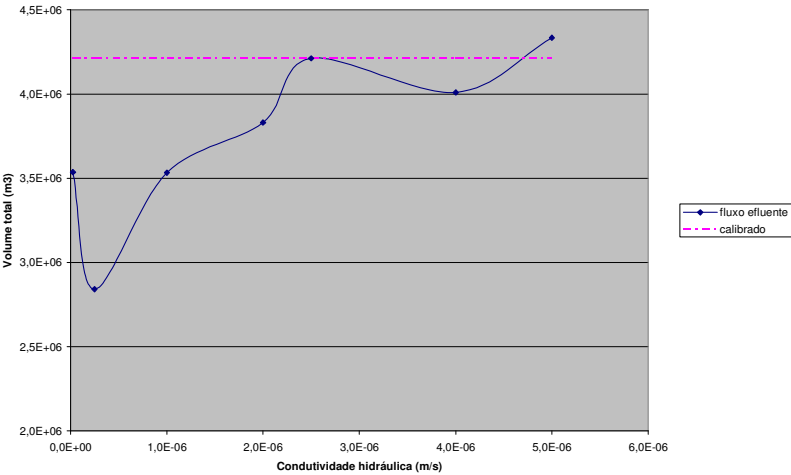


Figura 45 – Variação do volume total de fluxo efluente descarregado em 602 dias em relação à condutividade hidráulica

A variação dos valores de saída de carga hidráulica e do fluxo efluente, em relação à variação da condutividade hidráulica, caracteriza uma sensibilidade do tipo III do modelo em relação a este parâmetro.

6.6.3

Carga hidráulica de referência dos rios

A grande sensibilidade do modelo ao nível de referência da lâmina d'água dos corpos hídricos superficiais foi verificada durante todo o processo de calibração. A carga hidráulica de referência do contorno que simula os corpos hídricos superficiais representa o nível potenciométrico de base de todo o fluxo subterrâneo na bacia, e do seu ajuste (juntamente com a condutividade hidráulica) vai depender toda a distribuição de gradiente hidráulico, e conseqüentemente, os volumes de fluxo descarregados através deste contorno.

Os valores de carga hidráulica do rio foram variados num intervalo de 5 m, tomando-se como referência as cotas estimadas através do Modelo Digital de Elevação da bacia. Foram usadas cotas desde 4 metros mais baixas, até 1 metro mais elevadas em relação ao MDE. A cota da estação fluviométrica (125 m no MDE) foi usada como referência para a apresentação dos resultados do estudo de sensibilidade, tendo sido variada desde 121 m até 126 m.

A figura 46 representa a variação dos resíduos de carga hidráulica do mês de agosto de 2006 em relação à variação da cota do rio. O polígono tracejado marca os valores da simulação calibrada.

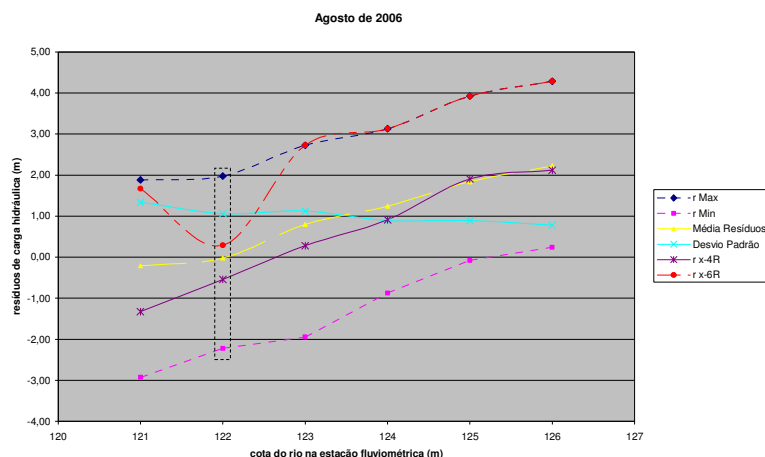


Figura 46 – Variação dos resíduos de carga hidráulica em função da variação da cota dos rios. Agosto de 2005.

A variação das cargas hidráulicas dos poços x-4R e x-6R foi plotada em função da cota do rio, para os meses de março e agosto de 2006, e de janeiro de 2007. Os valores máximos admissíveis de carga hidráulica de cada ponto foram representados por linhas tracejadas (Figura 47). A cota do rio junto à estação fluviométrica na simulação calibrada é de 122 m. A grande sensibilidade da carga hidráulica nos poços era esperada devido à sua localização, próxima aos córregos e canais da bacia.

O volume total descarregado no rio em 602 dias foi também plotado em relação à cota do rio (Figura 48). Nota-se que o volume de fluxo efluente varia fortemente, diminuindo progressivamente quando a cota ultrapassa o valor de 122 da calibração. Contrariamente, à medida que o volume de fluxo efluente diminui, o fluxo influente aumenta a partir do valor de calibração. Este resultado é esperado, já que nos trechos onde o rio é efluente o aumento de sua cota representa uma diminuição do gradiente hidráulico na interface água subterrânea-superficial, e conseqüentemente, da vazão descarregada pelo aquífero. Inversamente, nos trechos onde o rio é influente, o aumento de sua carga hidráulica e do gradiente hidráulico entre o rio e o aquífero aumenta a vazão descarregada no fluxo subterrâneo a partir do rio.

O comportamento da carga hidráulica e do volume de fluxo, influente e efluente, em relação à variação da cota do rio caracteriza uma sensibilidade do tipo III em relação a este parâmetro.

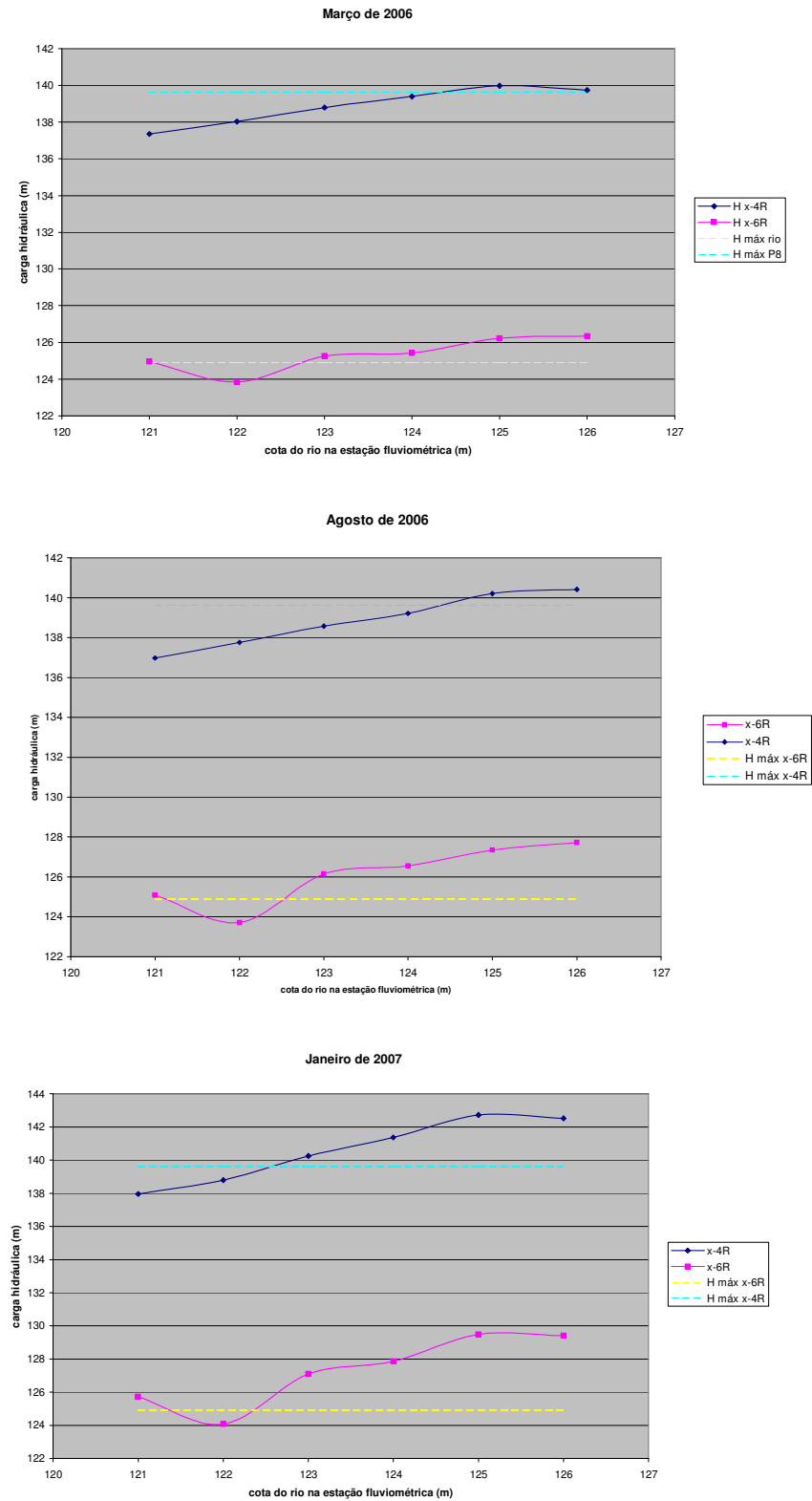


Figura 47 – Variação da carga hidráulica dos poços x-4R e x-6R em relação à variação da cota do rio

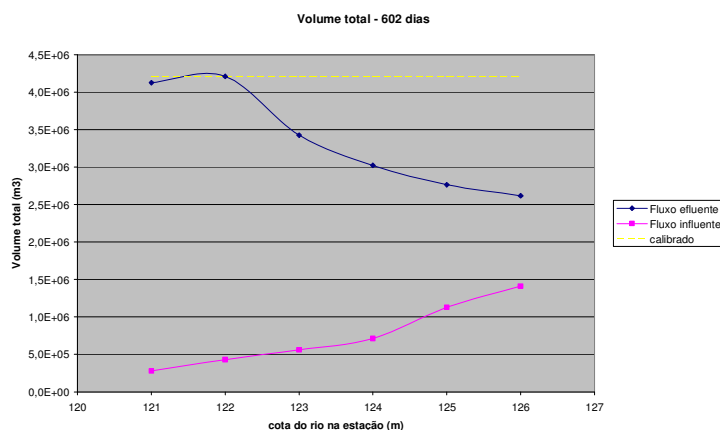


Figura 48 – Variação do fluxo efluyente e influente em relação à carga de referência do rio

6.7

Apresentação e análise dos resultados

6.7.1

Distribuição da carga hidráulica e posição do nível freático

Na figura 49 é apresentado o resultado de distribuição de carga hidráulica, relativo aos estágios de 327, 415 e 602 dias da simulação calibrada. Os estágios correspondem ao final da estação seca de 2006, ao final do período chuvoso em 2007 e ao final da simulação, em julho de 2007. A carga hidráulica variou de um valor mínimo de aproximadamente 122 m, na saída da bacia, a aproximadamente 394 m nas elevações de suas cabeceiras. Nota-se que a carga hidráulica nas encostas e elevações se mantém praticamente inalterada, enquanto nos vales e planícies aluvionares há uma mudança sensível entre a estação chuvosa e a estação seca. O período simulado de janeiro de 2006 a julho de 2007 foi o mais úmido dos últimos 20 anos, tendo correspondido ao maior evento de recarga, segundo os cálculos do fluxo de base. A condição resultante na bacia de Barro Branco para esta simulação, portanto, é a de armazenamento máximo, tendo sido observados níveis d'água aflorantes nas várzeas dos córregos que drenam a bacia, como pode-se observar na figura 50. A superfície freática (pressão igual a 0 KPa), intercepta a topografia formando diversas “poças”. Este resultado, no entanto, deve ser analisado com cuidado, pois a resolução do MDE na área de baixada é

pequena, com poucos pontos cotados, não havendo precisão na reprodução da superfície do terreno. Um melhor resultado da posição do nível freático em relação à topografia teria sido obtido se houvesse um levantamento topográfico com equidistância de no máximo 1 m entre as curvas de nível, na área de baixada.

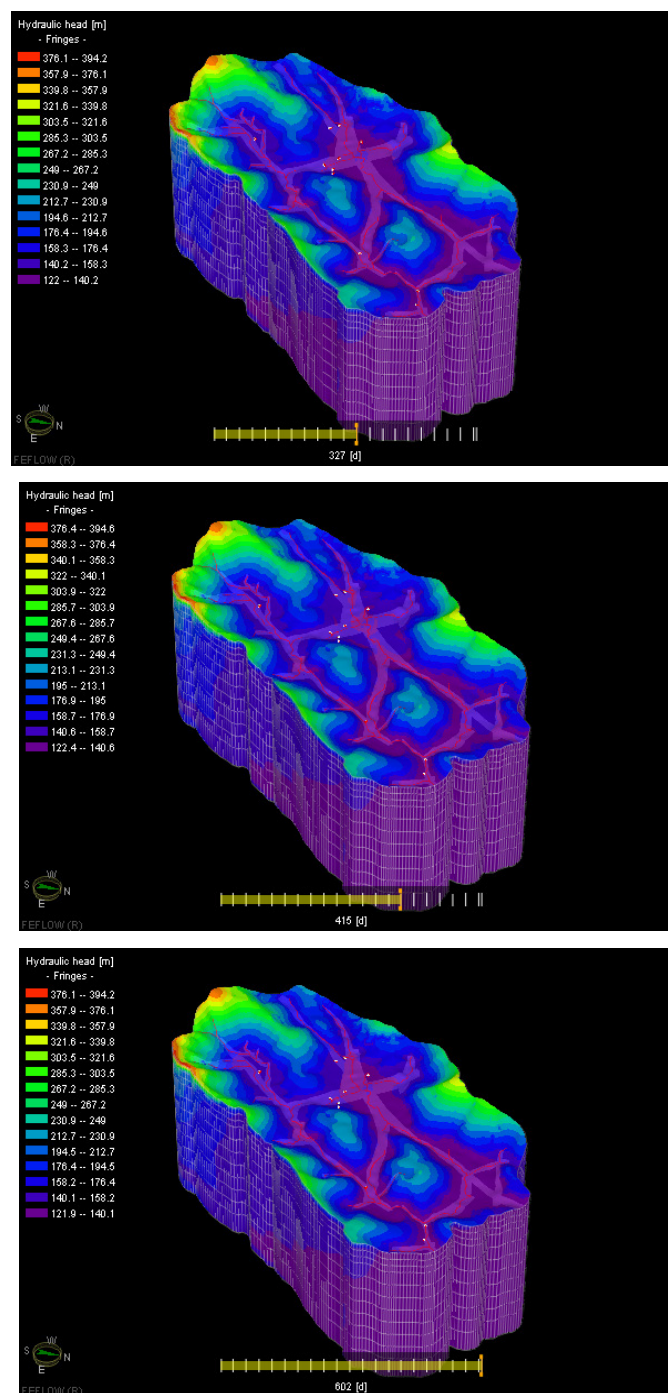


Figura 49 – Variação de carga hidráulica. De cima para baixo: Estágios de 327, 415 e 602 dias, respectivamente agosto de 2006 e fevereiro e julho de 2007.

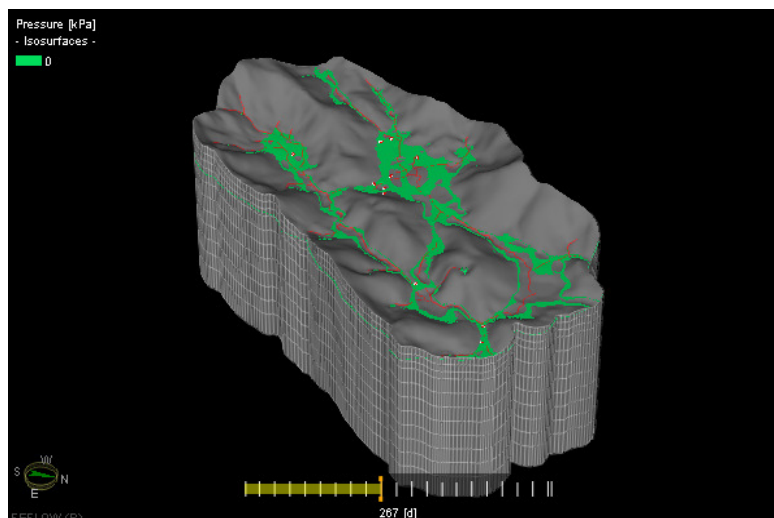


Figura 50 – Superfície freática no estágio de 267 dias

A figura 51 abaixo representa a variação de carga hidráulica, durante a simulação calibrada, nos poços monitorados e nos pontos de observação, correspondentes aos nós mais próximos de cada poço. Nota-se que só houve variação significativa de carga em torno de 420 dias de simulação, correspondendo ao mês de fevereiro de 2007, após três meses de precipitação intensa (862,2 mm de novembro de 2006 a janeiro de 2007). Mesmo assim esta variação mais brusca foi observada apenas nos poços localizados na interseção das zonas de fratura NE e NW, no vale principal do córrego Barro Branco (x-4R, x-5R, 20-R, PP, 15-R, 18-R).

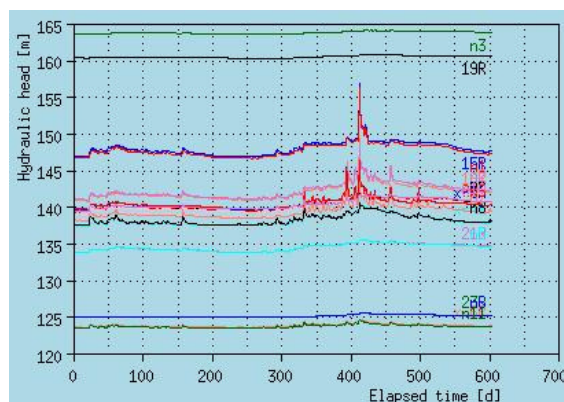


Figura 51 - Comportamento da carga hidráulica nos poços monitorados, e nos seus nós mais próximos, durante a simulação calibrada.

Os resultados de carga hidráulica da simulação da série histórica, de 1987 a 2007, foram analisados ano a ano e mostraram, de uma maneira geral, uma condição de distribuição de carga hidráulica que não sofreu alterações muito significativas ao longo do período, com exceção do último evento de recarga simulado, do ano de 2006 para 2007. Este resultado é coerente com a condição de um sistema de fluxo natural, sem bombeamento, que a longo prazo apresenta um balanço de massa médio ou uma condição de equilíbrio (Kalf and Wooley, 2005). Esta condição foi descrita por Fetter (1994) como um equilíbrio dinâmico, onde a quantidade de água que recarrega o aquífero é contrabalançada por uma quantidade equivalente de descarga natural, e o campo potencial é mais ou menos constante. Nesta situação pode-se descrever o fluxo como em um sistema permanente, como observaram Freeze & Cherry (1979) a respeito do uso de redes de fluxo permanentes para descrever sistemas de fluxo regionais.

Nas figuras a seguir são apresentadas as distribuições de carga hidráulica relativas ao final da estação seca (setembro/outubro) para os ciclos hidrológicos listados na tabela 19, que correspondem a diversos níveis de recarga observados na série analisada. A recarga variou de 65 mm no período de 1998 a 1999 a 541 mm de 2006 a 2007 (tabela 5), com um valor médio de 229,5 mm. Os anos escolhidos foram classificados de forma relativa, variando de muito secos a muito úmidos. Observa-se que não ocorrem mudanças significativas na distribuição de isovalores de carga hidráulica em todos os períodos analisados, independentemente do nível de recarga imposto.

Tabela 19 – Ciclos hidrológicos e sua classificação em relação ao volume de recarga direta

Período (ciclo hidrológico)	Estágio (dias)	Recarga Direta (mm)	Classificação relativa
1989 a 1990	1141	133	Seco
1991 a 1992	1861	219	Médio
1994 a 1995	2851	77	Muito Seco
1998 a 1999	4351	65	Muito Seco
2002 a 2003	5821	290	Úmido
2004 a 2005	6511	380	Muito Úmido

As Figuras 52 e 53 correspondem ao final da estação seca dos períodos analisados.

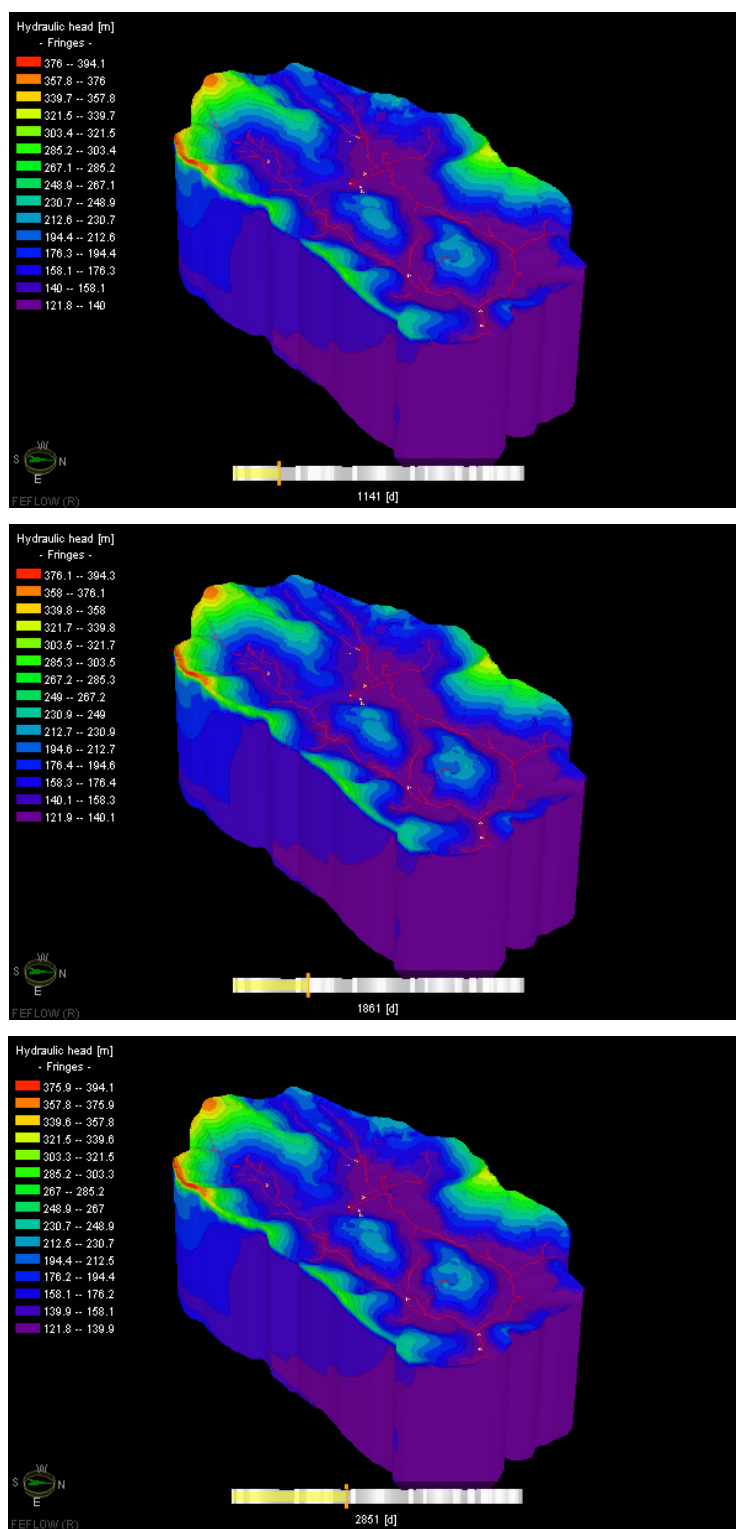


Figura 52 – De cima para baixo: Carga hidráulica em outubro de 1990, 1992 e 1995, relativas a ciclos classificados como seco, médio e muito seco, respectivamente.

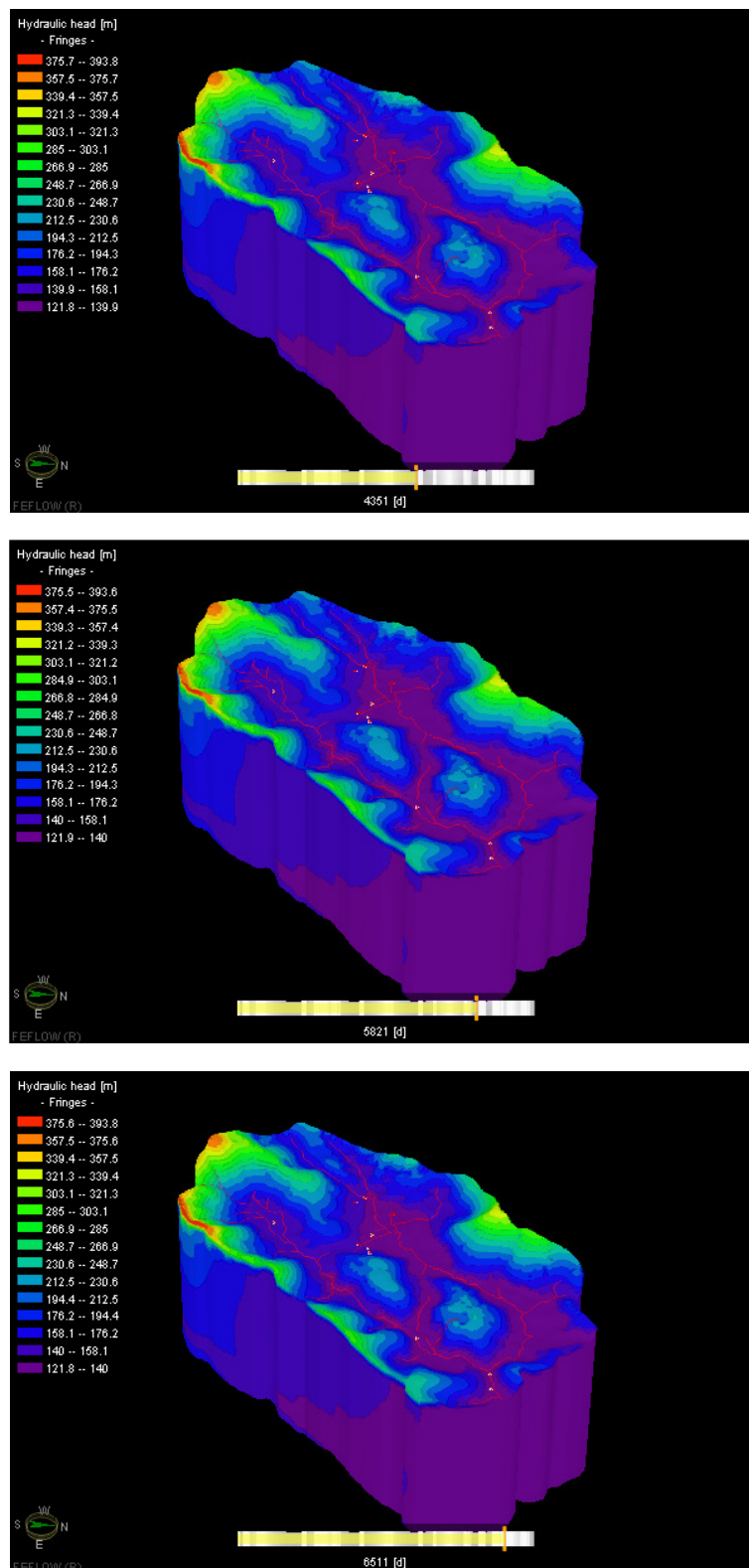


Figura 53 – De cima para baixo: Carga hidráulica em outubro de 1999, 2003 e 2005 correspondentes a ciclos classificados como muito seco, úmido e muito úmido, respectivamente.

O resultado relativo à estação chuvosa para os ciclos de 1989/90, 1991/92 e 1994/95 está exposto na Figura 54. O resultado relativo aos outros três períodos analisados (1999, 2003 e 2005) também apresentou a mesma distribuição de carga hidráulica.

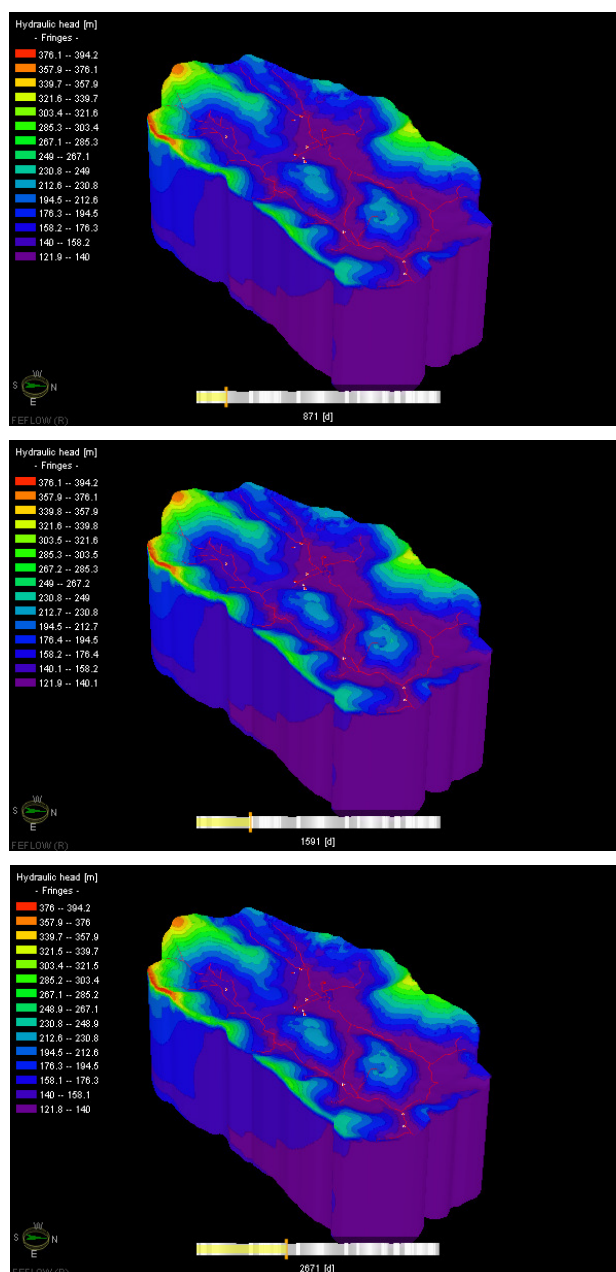


Figura 54 - De cima para baixo: Carga hidráulica em fevereiro de 1990, 1992 e 1995, relativas a ciclos classificados como seco, médio e muito seco, respectivamente.

O evento de recarga de 2006 a 2007, que foi analisado com dados de precipitação diária na simulação de calibração, foi reproduzido na série histórica com os dados de precipitação média mensal. Os resultados encontrados (Figura 55) são muito semelhantes aos apresentados na Figura 49 para aquela simulação.

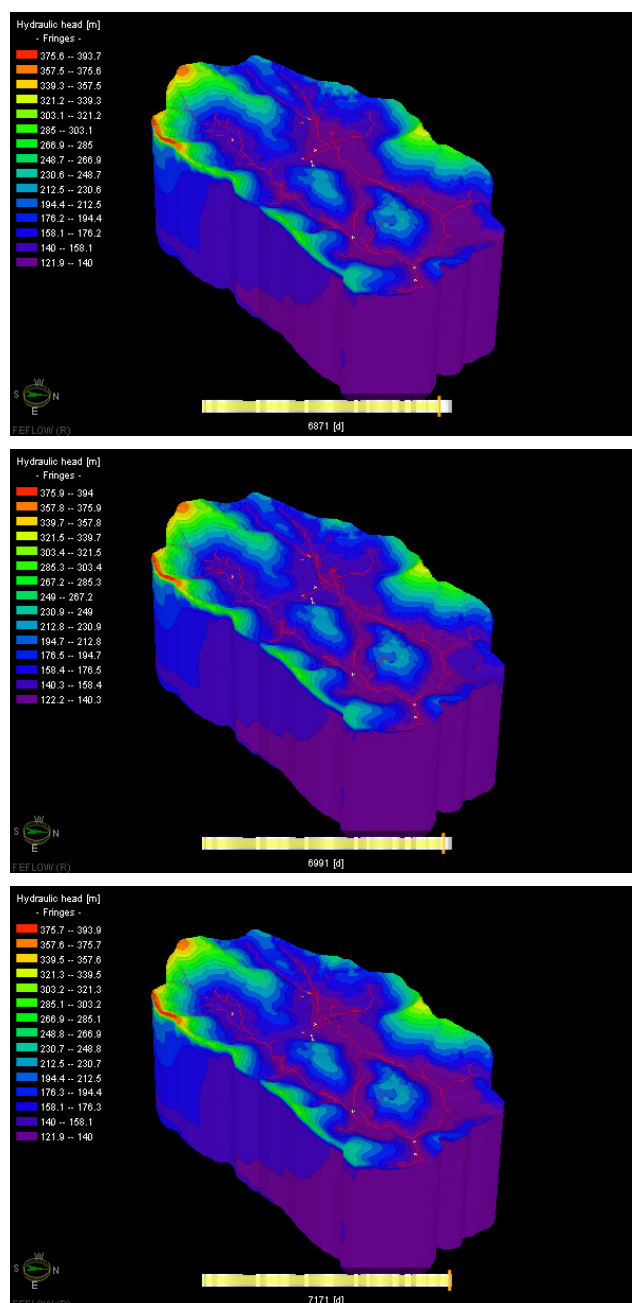


Figura 55 - De cima para baixo: Carga hidráulica em agosto de 2006, fevereiro e julho de 2007, como resultado da simulação histórica.

Os contornos de isovalores de carga hidráulica, correspondentes ao estágio de 415 dias daquela simulação, e de 6991 dias da simulação histórica, apresentaram uma grande variação em relação à configuração normal de distribuição de carga hidráulica (Figuras 49 e 55). A faixa de 121 a 140 m, correspondente aos menores valores de carga, após a estação chuvosa ocupa apenas a metade inferior do vale do córrego de Barro Branco, que é o vale mais ao norte da bacia (à direita na figura), enquanto que a faixa de valores imediatamente superior, de 140 a 158 m, ocupa toda a parte à montante neste vale. Os valores de carga hidráulica, nesta área da bacia, sofreram uma grande elevação imediatamente após o intenso evento de precipitação. Um novo equilíbrio foi restabelecido aos 7111 dias de simulação (Figura 56), no início do mês de junho, quatro meses depois. O excesso de fluxo foi dissipado através de um aumento significativo de descarga, como será visto mais adiante.

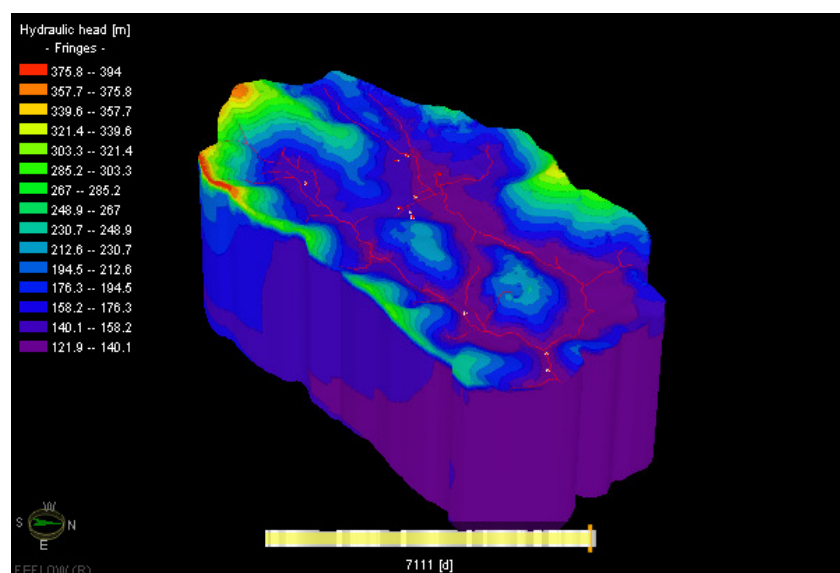


Figura 56 – Carga hidráulica aos 7111 dias de simulação, junho de 2007

Finalmente, na figura 57 é apresentada a variação de carga hidráulica nos poços de observação, e seus respectivos nós, durante a simulação de 20 anos. Nota-se a maior variação de carga hidráulica correspondente aos períodos de maior recarga, como nos ciclos de 1992 a 1993, 1993 a 1994, 2004 a 2005 e 2006 a 2007, próximos aos estágios de 1951, 2311, 6271 e 6991 dias. Mais uma vez, o mesmo grupo de poços apresentou as maiores variações, como ocorreu na simulação de 602 dias.

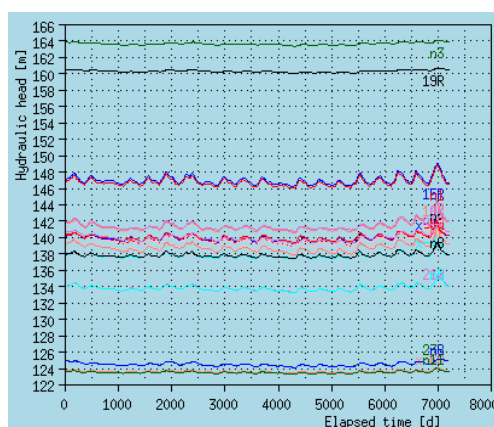


Figura 57 – Variação de carga hidráulica nos poços e respectivos nós, durante a simulação de 20 anos.

A configuração do campo potenciométrico resultante do modelo de fluxo da bacia de Barro Branco fica bem demonstrada em seções 2D, onde é possível a identificação dos sistemas de fluxo existentes. O estágio de tempo escolhido para traçar os perfis foi o de 6871 dias, que corresponde a outubro de 2006 (início da estação úmida monitorada). Foram traçadas seções transversais aos dois principais vales da bacia, e seções longitudinais, ao longo dos vales dos córregos de Barro Branco e Ferreira. Foram também traçadas quatro seções próximas ao exutório da bacia.

As direções de traçado dos perfis transversais aos vales do Barro Branco e do Ferreira estão indicadas na Figura 58. Os perfis 1, 5 e 7, de sentido NW-SE, são apresentados nas figuras 59, 60 e 61, respectivamente. As regiões de cor escura, no topo dos perfis, correspondem à zona não saturada, onde os altos gradientes resultam em equipotenciais muito próximas uma das outras, criando este efeito. Todas as seções transversais foram traçadas sem exagero vertical.

O perfil 1 atravessa a bacia no ponto de maior largura do vale do córrego Barro Branco (Fig. 59). Neste perfil, as linhas equipotenciais representam intervalos de 1m de carga hidráulica e mostram a existência de sistemas de fluxo locais, de pouca profundidade, com áreas de descarga nos vales dos córregos Ferreira e do Barro Branco, e áreas de recarga nos divisores de água entre os dois vales e nos divisores da bacia. A configuração das equipotenciais mostra que, localmente, para a geometria escolhida, com 1000 m de profundidade, não ocorrem sistemas de fluxo intermediários conectando os dois vales.

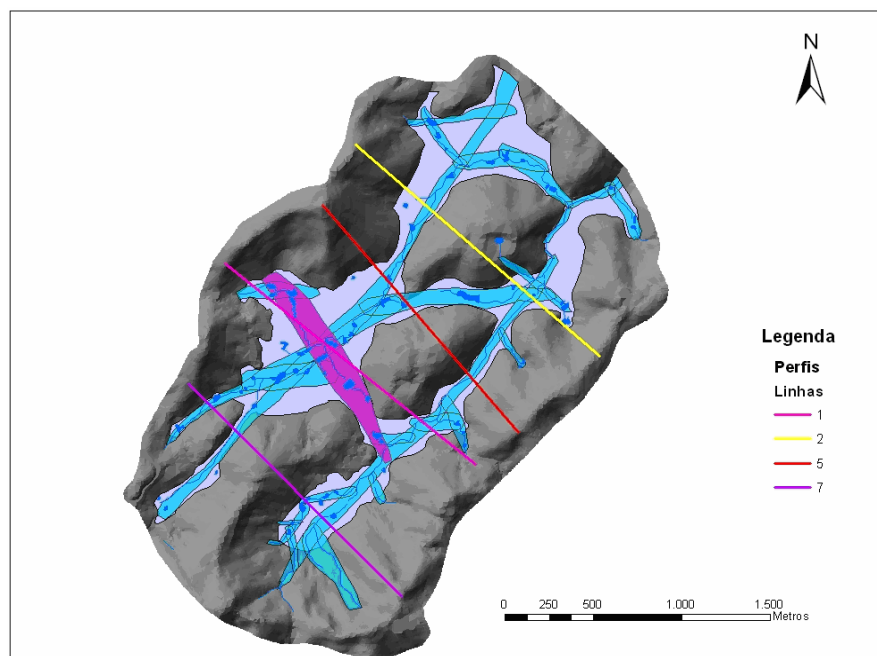
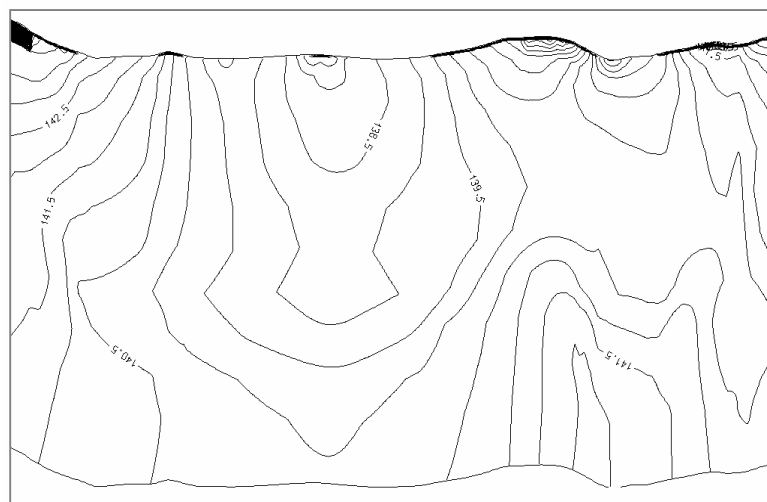


Figura 58 – Localização dos perfis transversais aos vales da bacia de Barro Branco

O perfil 5 (Fig. 60) corta a bacia mais à jusante, através dos pontos mais elevados dos divisores de água, e atravessa os vales em trechos mais estreitos. As equipotenciais representam intervalos de 0,5 m de carga hidráulica. Neste perfil nota-se a existência de um sistema de fluxo local descarregando no vale do Barro Branco, com áreas de recarga nos divisores do vale e um sistema intermediário, com área de recarga no vale do córrego Ferreira (à direita) e de descarga no vale do Barro Branco.



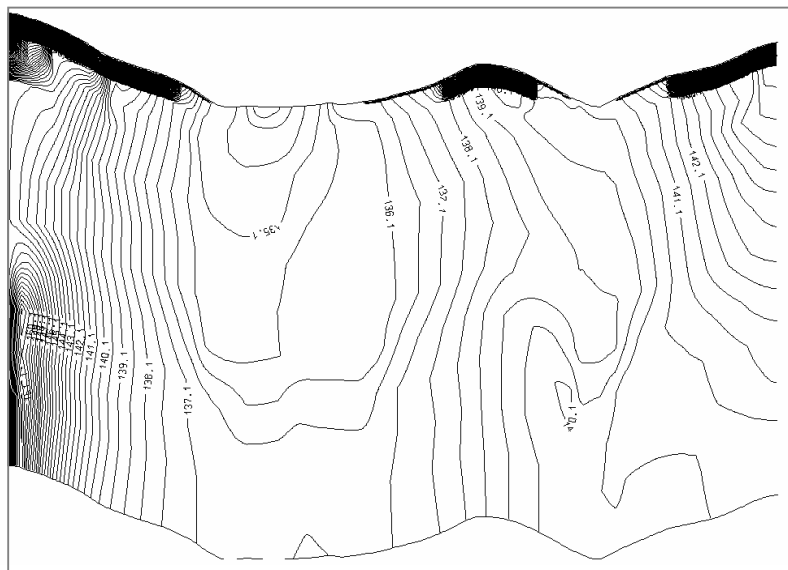
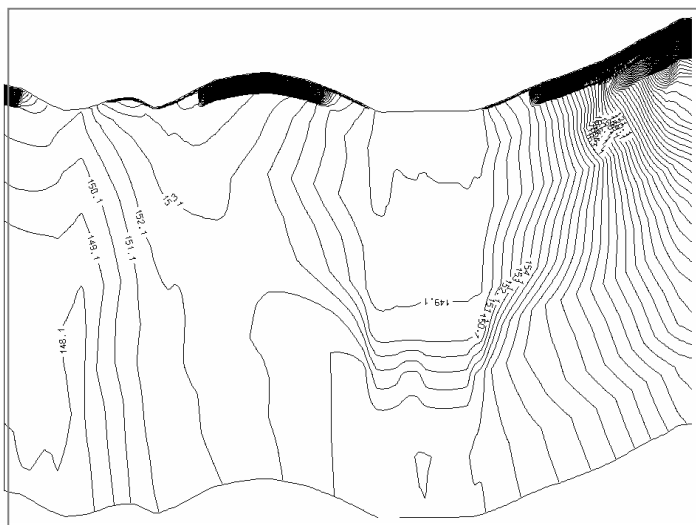


Figura 60 – Perfil 5

O perfil 7 (Fig. 61) está localizado em um trecho mais à montante na bacia do que os outros perfis, e atravessa os dois pequenos córregos que formam a cabeceira do córrego do Barro Branco. O trecho do córrego Ferreira (à direita, na figura) neste ponto é bem mais largo do que nos perfis 1 e 5. Os dois vales que formam as cabeceiras do córrego Barro Branco se configuram como uma área de recarga, bem como as elevações que os margeiam, indicando que os córregos são intermitentes. Já o vale do córrego Ferreira, atravessado pelo perfil, corresponde a uma zona de descarga de um sistema local, cuja recarga se dá nas duas elevações vizinhas. Os intervalos de carga hidráulica são de 0,5 m.



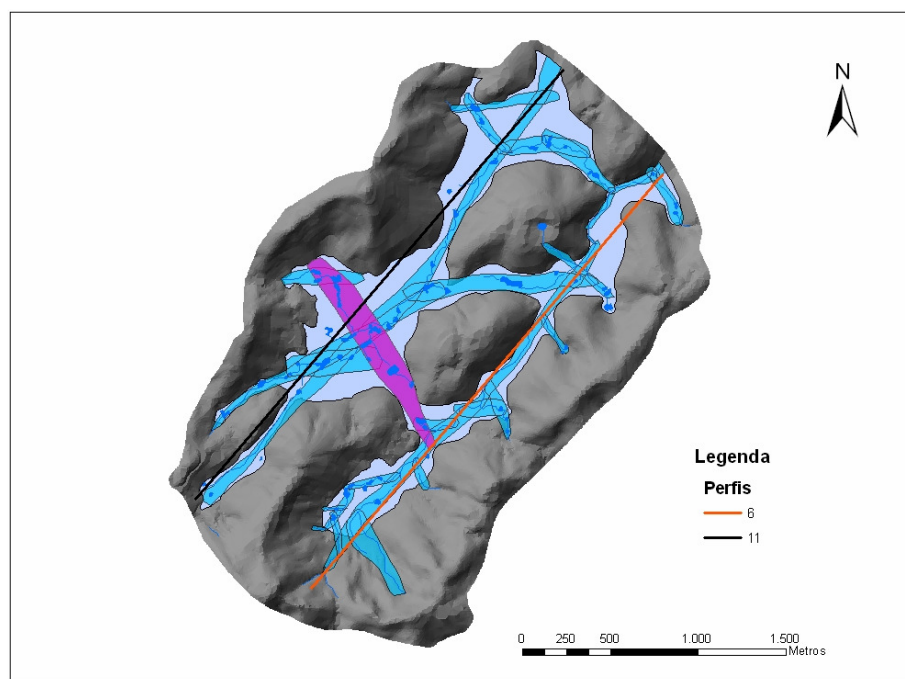


Figura 63 – Localização dos perfis longitudinais

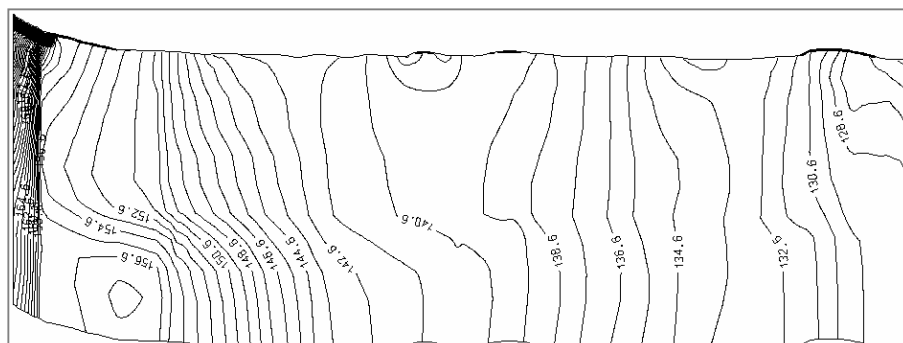


Figura 64 – Perfil 6

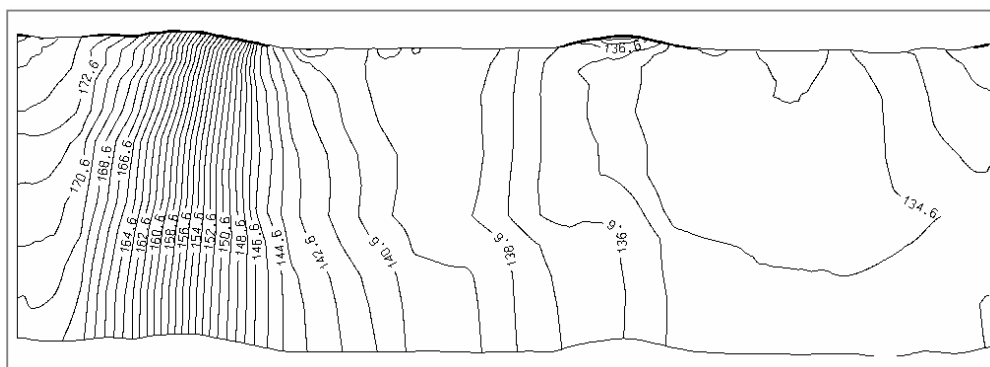


Figura 65 – Perfil 11

Finalmente, foram traçadas quatro seções próximas ao exutório da bacia (Fig. 66). A seção 13 foi traçada de NW para SE e a 14, de NE para SW, ou seja, da perspectiva de quem olha de montante para jusante no rio. Estas seções cruzam a área de várzea do córrego Barro Branco. A proporção entre as escalas vertical e horizontal é de 0,4.

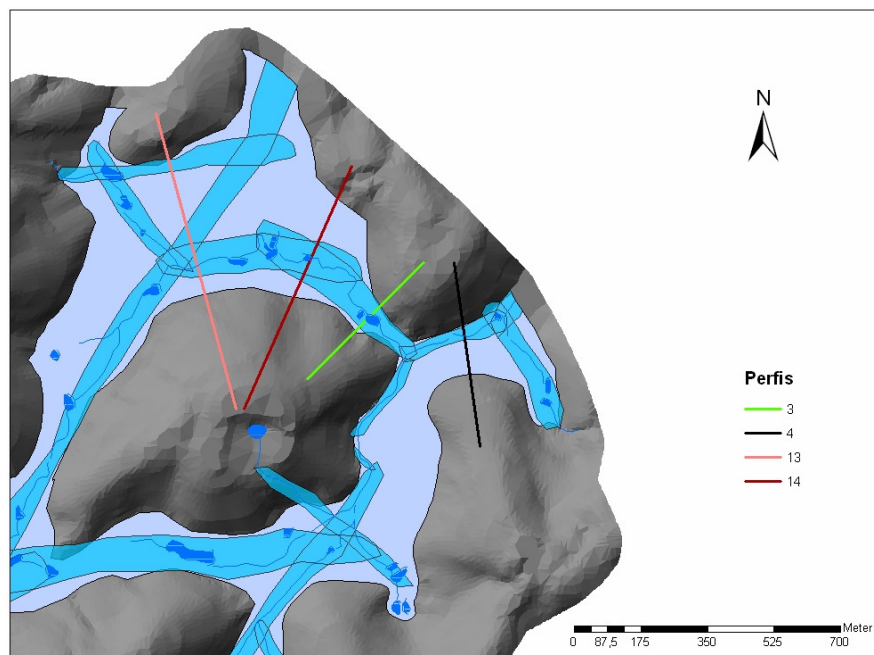


Figura 66 – Localização das seções próximas ao exutório da bacia

Observa-se na seção 13 (Fig. 67) a existência de um sistema de fluxo local que tem a sua área de descarga na várzea do córrego do Barro Branco, e recarga nas duas elevações que correspondem às extremidades da seção. O sistema mais profundo é devido à recarga a partir do alto da elevação, onde se encontra a barragem. A seção 14 (Fig. 68) apresenta o mesmo padrão, sendo a área de descarga por ela atravessada um pouco mais estreita. Intervalos de 0,5 m de carga hidráulica.

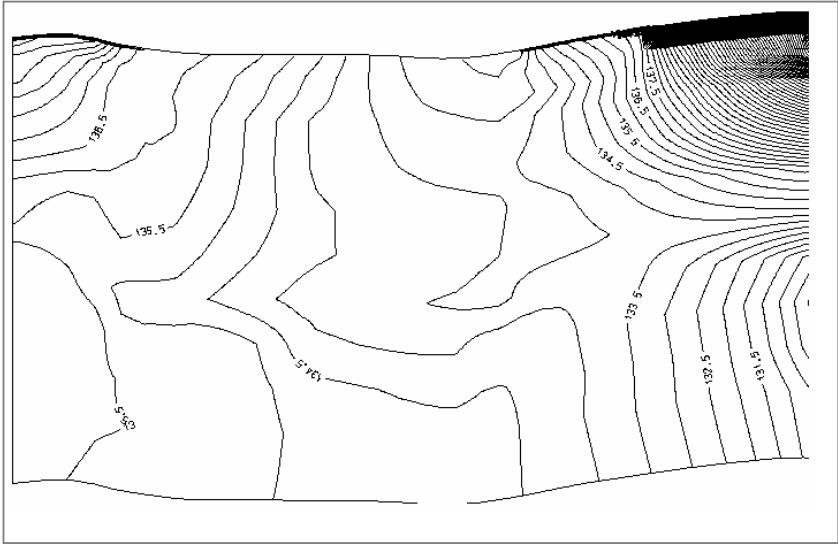


Figura 67 – Perfil 13

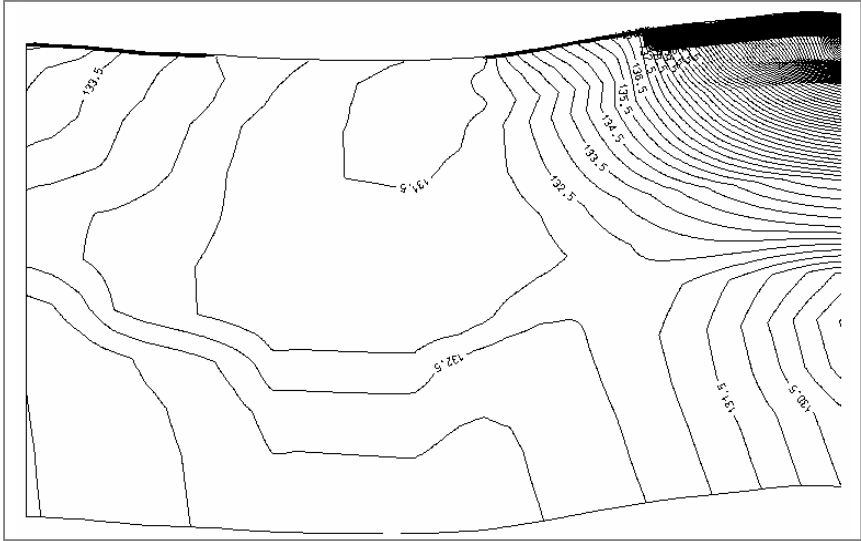


Figura 68 – Perfil 14

6.7.2

Estimativas de recarga e balanço de massa

A recarga subterrânea na bacia de Barro Branco foi calculada na simulação de calibração de 602 dias, e na simulação histórica de 20 anos. Foi computada a recarga direta, com origem na precipitação, e a recarga indireta, relativa ao fluxo influente que ocorre em alguns trechos dos canais que drenam a bacia, mesmo no período chuvoso. Na tabela 20 é apresentado o balanço de massa acumulado de 357 dias, a partir de janeiro de 2006 (período mais próximo de um ano civil), e de 602 dias, tempo total da simulação. Infelizmente os dados monitorados na estação de Barro Branco não abrangeram um ciclo hidrológico completo (setembro a agosto).

Tabela 20 – Balanço de massa global relativo ao período de 357 e 602 dias

Parcelas	dias	Volume (m ³)
Recarga direta	357	1,75 x 10 ⁶
	602	4,18 x 10 ⁶
Fluxo influente	357	2,99 x 10 ⁵
	602	4,31 x 10 ⁵
Fluxo efluente	357	1,97 x 10 ⁶
	602	4,21 x 10 ⁶
Recarga	357	2,05 x 10 ⁶
	602	4,62 x 10 ⁶
Deflúvio	357	1,97 x 10 ⁶
	602	4,21 x 10 ⁶
Balanço Global	357	8,2 x 10 ⁴
	602	4,07 x 10 ⁵

Nota-se que o valor de recarga direta relativo ao período de 602 dias é maior que o dobro do valor para o período de 357 dias, sendo este fato explicado pela forte estação chuvosa de 2006/2007. A rápida análise do balanço permite concluir que houve um aumento expressivo no armazenamento da bacia durante os dois períodos analisados.

Já o balanço relativo ao período de 20 anos (tabela 21) mostra uma alternância entre armazenamento e depleção nas reservas da bacia, sendo que apenas os últimos cinco ciclos da série foram responsáveis por balanços de massa acumulados positivos. O último período analisado, de setembro de 2006 a agosto de 2007, foi responsável por um armazenamento de $6,57 \times 10^5 \text{ m}^3$, tendo deixado um balanço acumulado positivo de $1,16 \times 10^6 \text{ m}^3$ na micro-bacia de Barro Branco. No entanto o balanço de massa acumulado permaneceu negativo durante 17 anos consecutivos da série, de 1988 a 2004, tendo havido uma recuperação das reservas apenas nos últimos três anos. O valor médio de recarga direta neste período foi de 233 mm, correspondendo a um volume de $1,27 \times 10^6 \text{ m}^3$. O valor médio computado do fluxo influente a partir dos córregos (recarga indireta) foi de $4,86 \times 10^5 \text{ m}^3$ por ciclo, correspondendo a uma altura de recarga direta de 88,9 mm, enquanto o valor médio do fluxo efluente ficou em $1,70 \times 10^6 \text{ m}^3$. O volume médio de recarga total de $1,76 \times 10^6 \text{ m}^3$ supera, portanto, o volume médio de fluxo efluente e realmente o balanço de massa anual foi positivo em treze dos 20 anos analisados. No entanto, para análise de reservas deve-se utilizar o balanço acumulado, pois é ele que vai definir, de ciclo a ciclo, a situação de armazenamento ou de depleção na bacia, sendo o seu valor médio, a longo prazo, o valor representativo para a quantificação de reservas. No caso da micro-bacia de Barro Branco a série de 20 anos analisada apresentou, como referido anteriormente, uma sequência de 17 anos de depleção. Os três últimos anos da série podem representar o início de uma sequência de armazenamento.

Tabela 21 – Balanço de Massa da Micro-bacia de Barro Branco relativo à série histórica de 20 anos

Ano Hidrológico	Precipitação (mm)	Volume Precipitado (m³)	Recarga Direta (m³)	Recarga Direta (mm)	Vazão Influyente/ano (m³)	Vazão Efluente/ano (m³)	Recarga Total (m³)	Balanço Anual (m³)	Balanço Acumulado (m³)
1988	975,9	5,34E+06	1,36E+06	247,74	3,76E+05	2,02E+06	1,73E+06	-2,93E+05	-2,93E+05
1989	891,2	4,87E+06	1,26E+06	229,86	3,97E+05	1,80E+06	1,65E+06	-1,41E+05	-4,34E+05
1990	710,3	3,89E+06	7,18E+05	131,33	4,50E+05	1,50E+06	1,17E+06	-3,35E+05	-7,69E+05
1991	960,7	5,26E+06	8,77E+05	160,40	6,08E+05	1,46E+06	1,49E+06	2,40E+04	-7,45E+05
1992	904,0	4,94E+06	1,24E+06	226,73	5,33E+05	1,62E+06	1,77E+06	1,57E+05	-5,87E+05
1993	876,8	4,80E+06	1,67E+06	305,80	4,15E+05	1,90E+06	2,09E+06	1,83E+05	-4,04E+05
1994	1106,4	6,05E+06	1,73E+06	316,20	4,40E+05	1,94E+06	2,17E+06	2,32E+05	-1,72E+05
1995	747,8	4,09E+06	4,38E+05	80,16	4,79E+05	1,40E+06	9,18E+05	-4,80E+05	-6,52E+05
1996	1068,3	5,84E+06	1,19E+06	216,74	5,44E+05	1,58E+06	1,73E+06	1,45E+05	-5,06E+05
1997	1057,0	5,78E+06	1,04E+06	189,75	6,57E+05	1,55E+06	1,69E+06	1,44E+05	-3,62E+05
1998	941,1	5,15E+06	1,15E+06	210,41	5,29E+05	1,57E+06	1,68E+06	1,07E+05	-2,56E+05
1999	812,1	4,44E+06	4,00E+05	73,13	4,94E+05	1,25E+06	8,94E+05	-3,51E+05	-6,07E+05
2000	984,6	5,39E+06	9,86E+05	180,20	5,15E+05	1,42E+06	1,50E+06	7,83E+04	-5,29E+05
2001	732,7	4,01E+06	8,55E+05	156,39	5,13E+05	1,39E+06	1,37E+06	-1,84E+04	-5,47E+05
2002	826,0	4,52E+06	7,59E+05	138,76	5,11E+05	1,34E+06	1,27E+06	-6,63E+04	-6,13E+05
2003	1086,9	5,95E+06	1,57E+06	286,11	5,25E+05	1,70E+06	2,09E+06	3,89E+05	-2,24E+05
2004	1012,7	5,54E+06	1,45E+06	264,95	5,13E+05	1,75E+06	1,96E+06	2,14E+05	-1,09E+04
2005	1342,2	7,34E+06	2,13E+06	390,30	4,17E+05	2,08E+06	2,55E+06	4,67E+05	4,56E+05
2006	803,0	4,39E+06	1,65E+06	302,31	4,24E+05	2,03E+06	2,08E+06	4,33E+04	5,00E+05
2007	1312,7	7,18E+06	2,97E+06	543,77	3,85E+05	2,70E+06	3,36E+06	6,57E+05	1,16E+06

6.7.3

Estimativas de vazão

As alturas de água computadas nas duas simulações foram lançadas na curva-chave da estação de Barro Branco, considerando-se a cota de referência calculada no item 6.4. As vazões encontradas para os meses de junho e setembro na estação seca, e dezembro e fevereiro na estação chuvosa, se encontram na tabela 22.

Na tabela 23 se encontram as vazões máximas, médias e mínimas, medidas na estação de Barro Branco nos mesmos meses dos anos de 2006 e 2007. Considerando-se que o período monitorado na estação foi excepcionalmente úmido, verifica-se que os resultados de vazão computados para a série histórica estão dentro da faixa de variação possível para os meses avaliados. Deve-se ter em mente que estes valores foram computados para o último dia de cada mês considerado, simulando a leitura de carga daquele dia e podem, portanto, equivaler à carga mínima, média ou máxima do mês.

Tabela 22 – Vazões computadas na simulação histórica para os meses indicados

Ano Hidrológico	Vazão Computada (m³/s)			
	Junho	Setembro	Dezembro	Fevereiro
1988	0,033	0,043	0,054	0,100
1989	0,011	0,004	0,046	0,043
1990	0,000	0,004	0,010	0,007
1991	0,000	0,000	0,001	0,019
1992	0,004	0,000	0,029	0,027
1993	0,010	0,005	0,086	0,041
1994	0,017	0,002	0,034	0,041
1995	0,000	0,001	0,000	0,001
1996	0,000	0,000	0,033	0,014
1997	0,000	0,001	0,025	0,013
1998	0,000	0,000	0,034	0,018
1999	0,000	0,000	0,000	0,000
2000	0,000	0,000	0,019	0,008
2001	0,000	0,000	0,015	0,002
2002	0,000	0,000	0,007	0,001
2003	0,001	0,000	0,018	0,070
2004	0,001	0,000	0,031	0,044
2005	0,032	0,007	0,046	0,090
2006	0,010	0,008	0,104	0,069
2007	0,072	0,028	0,164	0,252

Tabela 23 – Vazões medidas na Estação de Barro Branco

Nível	Vazão (m ³ /s)			
	Jun	Set	Set	Fev
Máximo	0,011	0,040	0,139	0,150
Médio	0,006	0,020	0,100	0,103
Mínimo	0,004	0,010	0,048	0,069

6.8

Vazões efluentes e vazão sustentável

O ano hidrológico de 1999 foi o mais seco de toda a série histórica analisada, tendo correspondido ao pior balanço de massa e deixado um déficit hídrico de $4,80 \times 10^5 \text{ m}^3$. Qualquer discussão a respeito de um valor sustentável de exploração de água subterrânea na bacia deve levar em consideração o caráter intermitente e temporário de seus córregos e a ocorrência de anos extremamente secos. Mesmo em anos úmidos, os cursos d'água apresentam vazões muito pequenas (como demonstram os dados das estações de Ferreira e Barro Branco) e esta característica é ainda agravada pela prática, disseminada em toda a região Noroeste Fluminense, de construção de pequenas barragens ao longo dos córregos.

Ao analisarmos o balanço de massa da série de 20 anos (Tabela 21 e Figura 71), verificamos que o volume de vazão efluente e de recarga correspondeu a $1,25 \times 10^6 \text{ m}^3$ e $8,94 \times 10^5 \text{ m}^3$ para o ano de 1999, e $1,40 \times 10^6 \text{ m}^3$ e $9,18 \times 10^5 \text{ m}^3$ para 1995, tendo sido estes os piores anos da série.

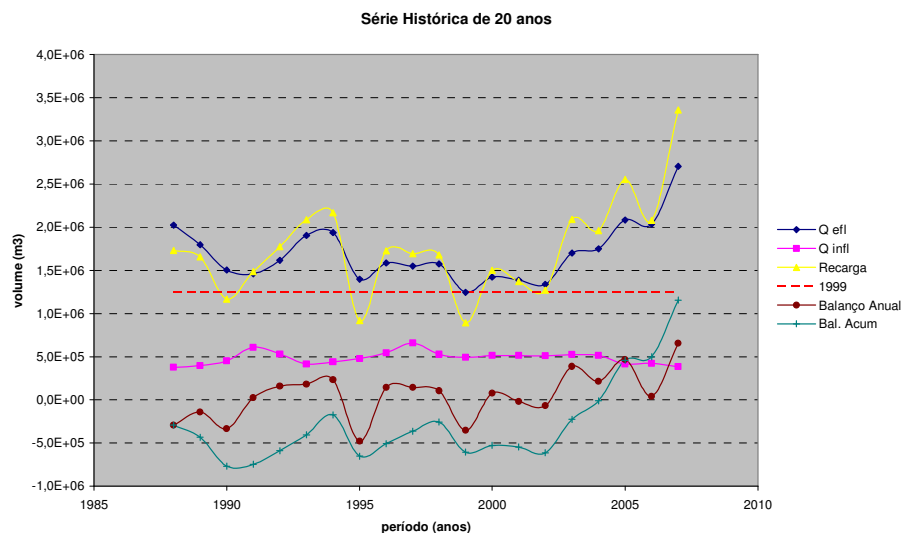


Figura 71 – Balanço de massa da Série de 20 anos

Estes valores correspondem a um cenário de seca acentuada, em que os córregos se transformaram em leitos secos, como atestam os registros jornalísticos da época. Pode-se estabelecer um valor mínimo de descarga total para a bacia, com base nestes valores, tendo-se em mente que a simulação da série de 20 anos não levou em consideração nenhum bombeamento, sendo o balanço de massa correspondente a uma condição natural de fluxo. Valores equivalentes aos encontrados em 1995 e 1999 corresponderiam à condição de secamento dos córregos e inviabilizariam, por exemplo, as culturas de verão em suas várzeas e qualquer outra atividade que dependa da captação das suas águas, sem falar nos transtornos causados pelo secamento de poços domésticos escavados, muito utilizados na região. Portanto, se o critério principal de estabelecimento da vazão sustentável de exploração for a descarga total medida por ano deve-se levar em consideração que determinados níveis de recarga, naturais da bacia, já são suficientes para ocasionar o secamento dos córregos e que qualquer extração adicional de água ocasionará uma piora deste cenário.

Tomando por base o volume de descarga do ano de 1995 e acrescentando uma pequena margem de segurança, pode-se sugerir como regime de exploração sustentável da micro-bacia de Barro Branco aquele que não resultar em vazões abaixo de $1,50 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, com exceção dos anos muito secos, onde, a rigor, não existiria uma vazão de exploração sustentável. Os anos muito secos da série não são necessariamente os anos de menor precipitação pluviométrica, a exemplo

do ano de 1999, cuja precipitação foi de 812,10 mm, sendo o quinto menor índice pluviométrico, mas possuindo a recarga mais baixa da série, de apenas 73,13 mm (Tabela 21). A avaliação da vazão sustentável, portanto, deve basear-se na análise do balanço de massa, ano a ano, através da utilização de um modelo numérico calibrado, em que o valor utilizado como entrada de recarga direta, seja calculado a partir do ajuste de dados hidrológicos, como a análise dos hidrogramas de rios da região.