

7

Cenários simulados de bombeamento

Foram simulados seis cenários de bombeamento, onde foram variados o número de poços, a sua localização e as vazões bombeadas. A vazão de exploração escolhida para a maioria dos cenários foi de 20 m³/h, que corresponde a um valor de produção encontrado em diversos poços na região (Barreto et al. 2001), inclusive no Município de São José de Ubá. O balanço de massa de cada cenário de bombeamento foi computado e o resultado comparado com os valores encontrados para a série de 20 anos, sem bombeamento. Na figura 72 é apresentada a localização dos poços utilizados nos cenários em relação às unidades hidroestruturais e aos córregos da bacia. Todos os cenários tiveram o mesmo tempo de simulação da série histórica. O volume de fluxo efluente, relativo ao ano de 1999, foi utilizado como referência para a avaliação da sustentabilidade dos cenários simulados, já que neste ano foi registrada uma das maiores secas ocorridas na região, com o secamento do rio São Domingos e de seus afluentes em vários locais da bacia. O fluxo efluente computado para este ano corresponde, portanto, a um valor abaixo do limite de sustentabilidade sugerido para a bacia.

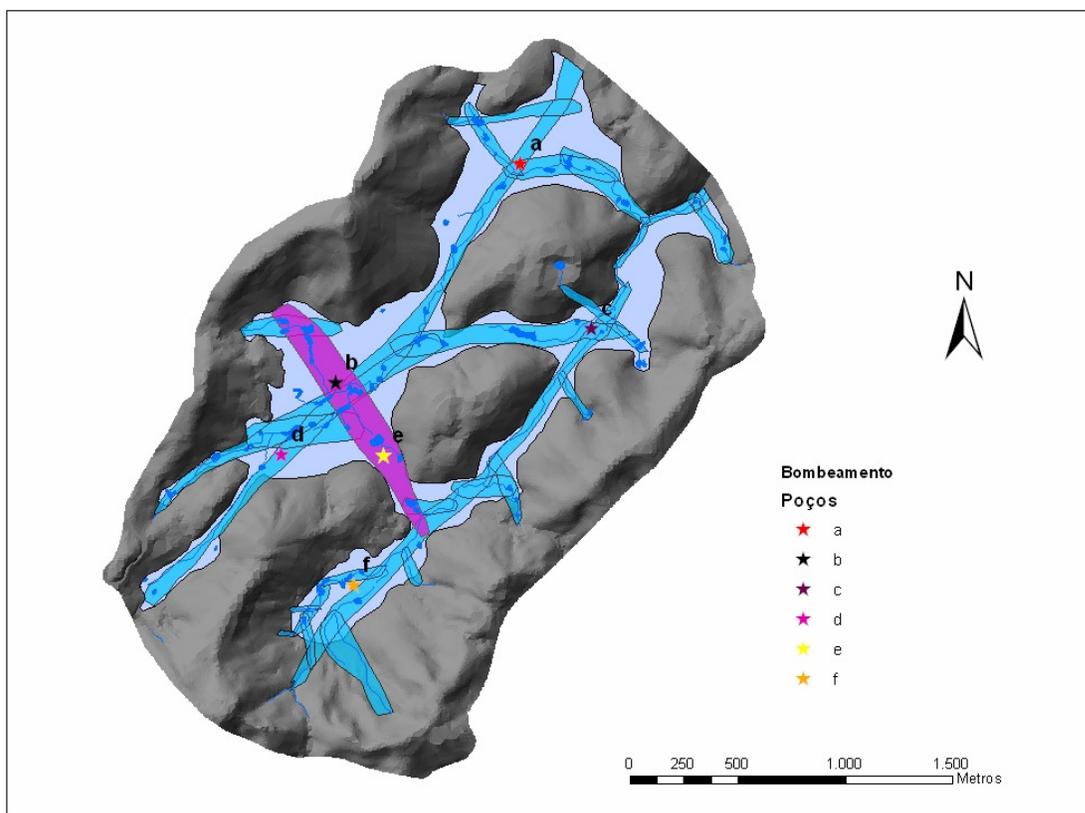


Figura 72 – Localização dos poços criados para os cenários simulados

7.1

Cenário 1: Vazão bombeada de 480 m³/d – 1 poço bombeando 20 m³/h próximo ao poço profundo (PP)

Esta simulação reproduziu o cenário de um único poço, bombeando 20 m³/h, ininterruptamente, totalizando 480 m³/dia, correspondendo ao poço “e” na Figura 72. A sua localização é praticamente a mesma do poço profundo de propriedade da prefeitura de São José de Ubá, e capta a zona de fratura NW, modelada como a de maior condutividade hidráulica, constituindo, portanto, o melhor “aquífero” da área.

Na Figura 73 é apresentado o resultado do balanço de massa global deste cenário, e na Figura 74, a comparação entre os valores de recarga total (direta e indireta) resultantes com os da série histórica. Nota-se na figura 74 que a recarga total

computada para o cenário 1, é ligeiramente maior ou igual à recarga total sem bombeamento (natural), com exceção do ano de 1996.

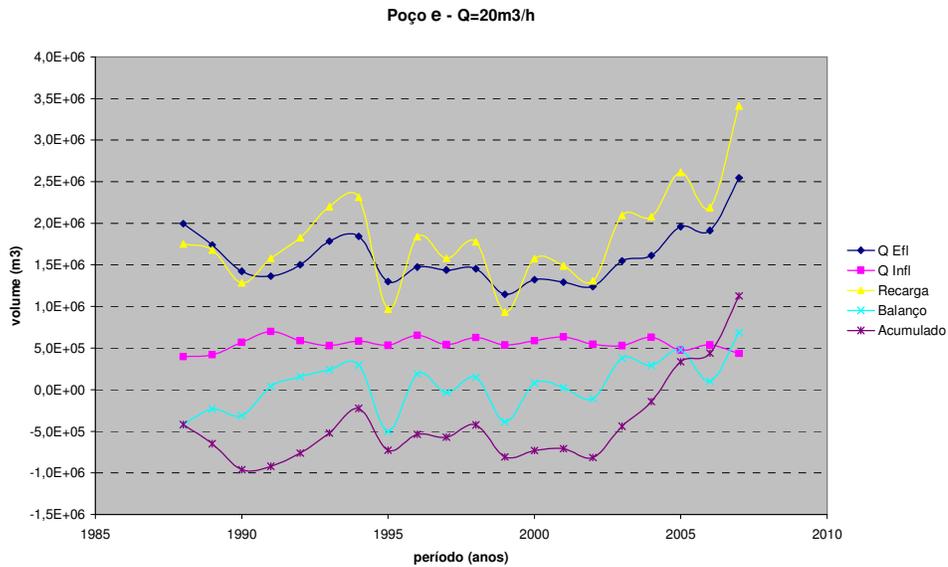


Figura 73 – Balanço global do cenário 1

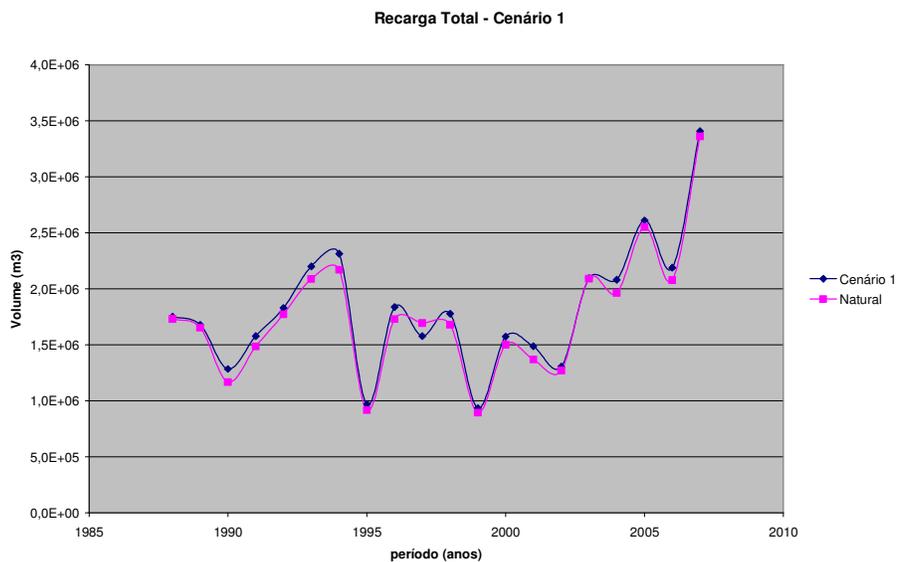


Figura 74 – Comparação entre a recarga total do cenário 1 e a recarga da série de 20 anos sem bombeamento.

Nas figuras 75 e 76 estão traçadas as curvas de vazão efluente e influente do Cenário 1 e as mesmas curvas para a condição natural. Nota-se que a vazão efluente do Cenário 1 é sempre menor do que a natural e que a vazão influente é quase sempre maior, com exceção de 1997, resultando em uma recarga menor para este ano. O volume de vazão efluente de 1999 foi traçado como referência.

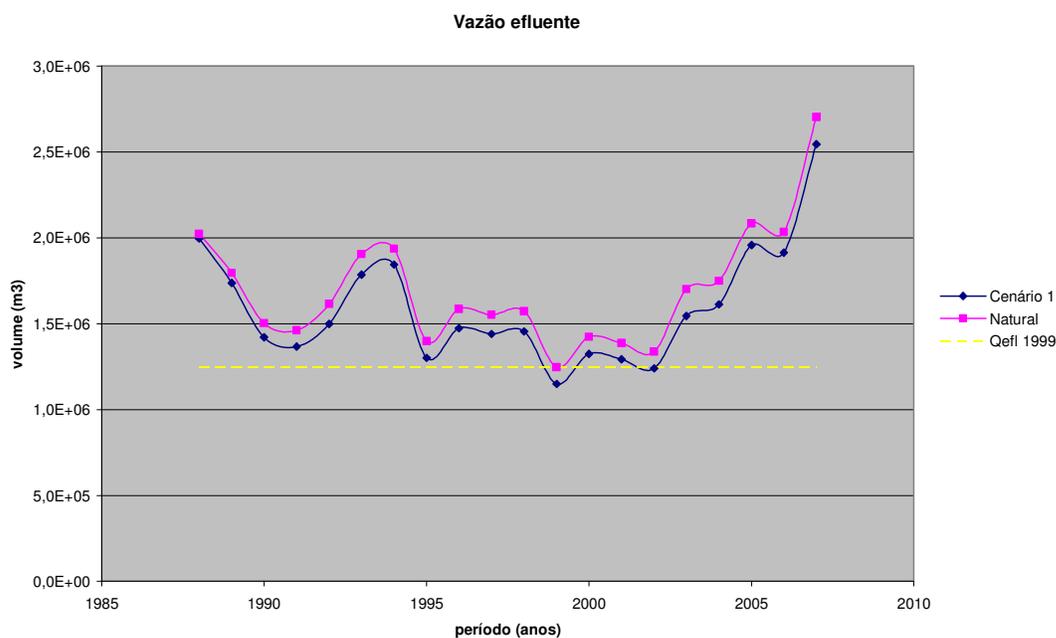


Figura 75 – Comparação entre a vazão efluente do cenário 1 e a da série de 20 anos sem bombeamento.

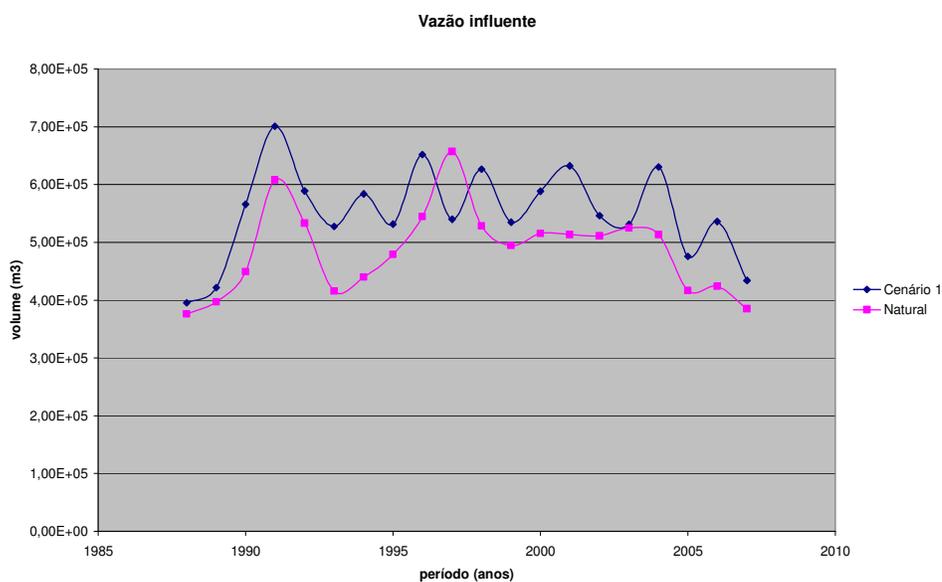


Figura 76 – Comparação entre a vazão influente do cenário 1 e a vazão influente sem bombeamento.

Na figura 77 é apresentada a comparação entre o balanço anual da bacia sem bombeamento e o do Cenário 1. Nota-se que o balanço do Cenário 1 é, em quase toda série, equivalente ou ligeiramente maior que o natural, tendo sido menor de 1988 a 1990, e em 1996. Na figura 78 é apresentado o comparativo dos balanços acumulados relativos ao cenário 1 e à condição natural da bacia. O balanço acumulado do cenário de bombeamento resultou em valores sempre menores que os encontrado para a condição natural.

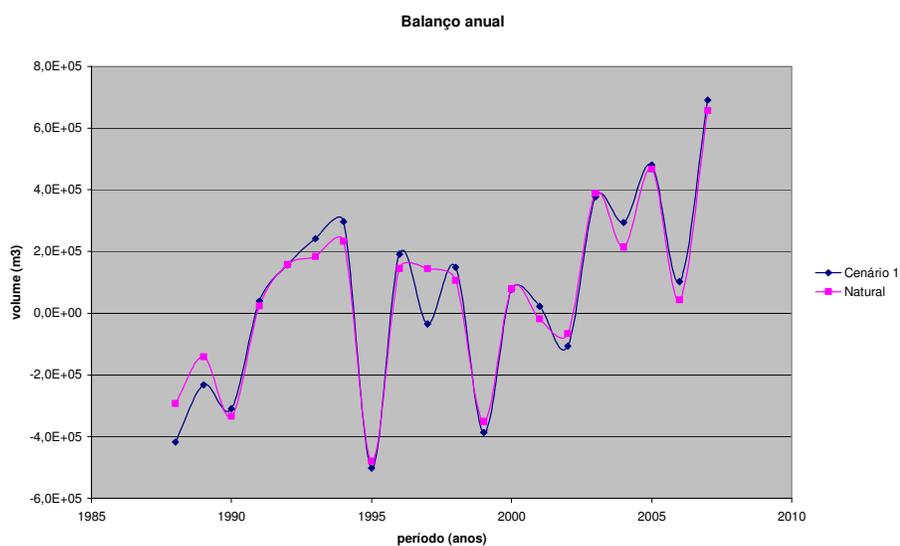


Figura 77 – Comparação entre balanço anual do cenário 1 e o da série de 20 anos sem bombeamento.

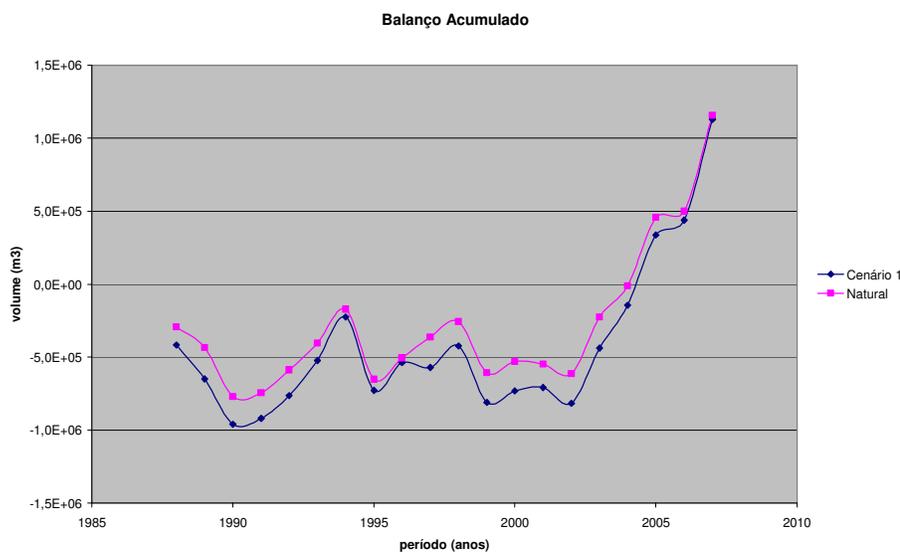


Figura 78 – Comparação entre balanço acumulado do cenário 1 e o da série de 20 anos sem bombeamento.

7.2

Cenário 2: Vazão bombeada de 480 m³/d – 1 poço bombeando 20 m³/h no vale maior da bacia

O segundo cenário corresponde a um único poço, localizado no maior vale da bacia, identificado como “b” na figura 72. Foi aplicado um regime de bombeamento de 20 m³/h/24h, totalizando uma vazão de 480 m³/d. A diferença entre este cenário e o anterior está apenas na localização do poço, sendo neste caso mais próxima do córrego Barro Branco. O sistema aquífero captado é o mesmo.

Na figura 79 é apresentado um diagrama com o balanço de massa do Cenário 2 e as suas respectivas parcelas. Na figura 80 foi traçado o comportamento da recarga no Cenário 2, confrontado com a recarga da bacia sem bombeamento. Nota-se um comportamento semelhante ao observado no Cenário 1, sendo a recarga equivalente ou ligeiramente maior durante toda a série, com exceção do ano de 1996.

Nas figuras 81 e 82 são apresentadas comparações entre as vazões efluentes e influentes do Cenário 2 e as da bacia em condições naturais. Novamente, como esperado, a vazão efluente do cenário é menor que a natural. Na Figura 81 a vazão efluente do ano de 1999 foi traçada como referência.

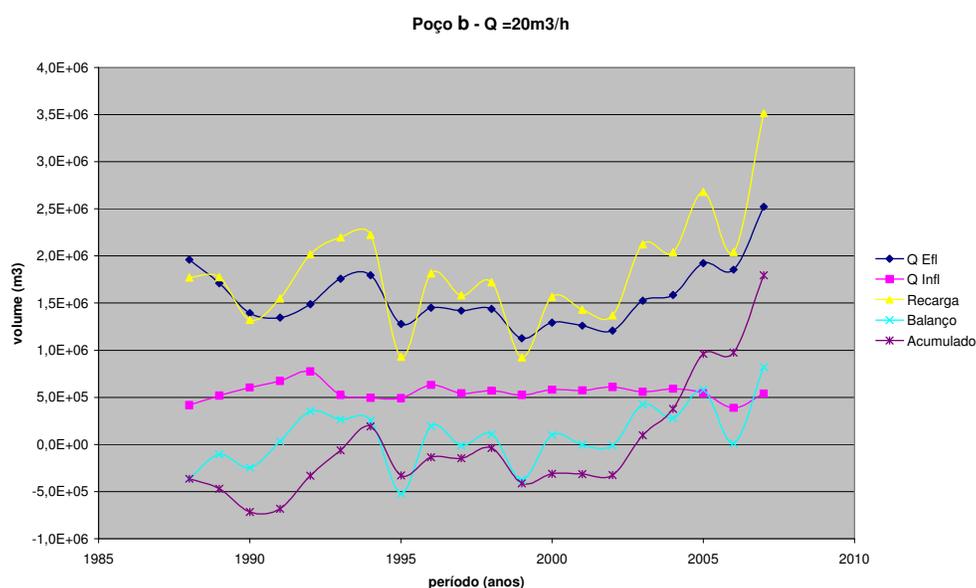


Figura 79 – Balanço global do cenário 2

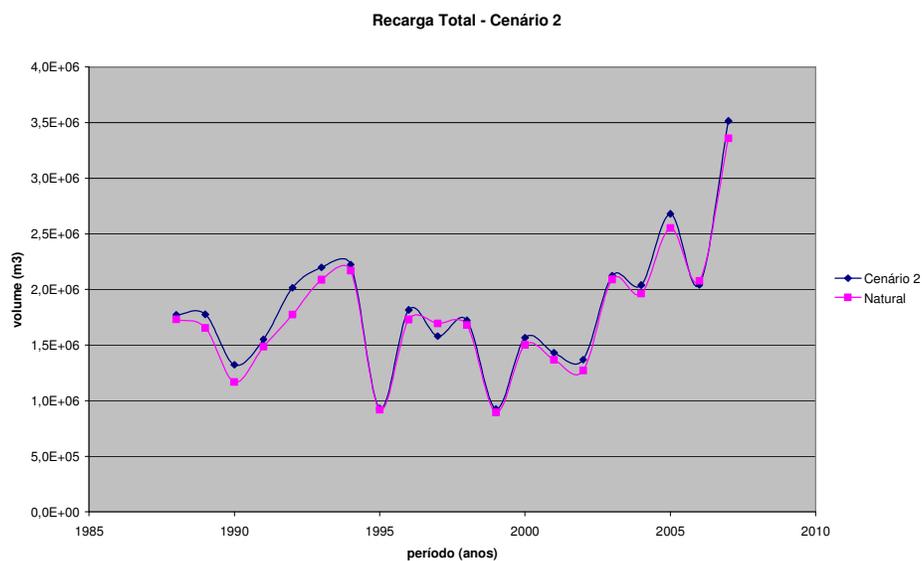


Figura 80 – Comparação entre a recarga total do Cenário 2 e a recarga da série de 20 anos sem bombeamento.

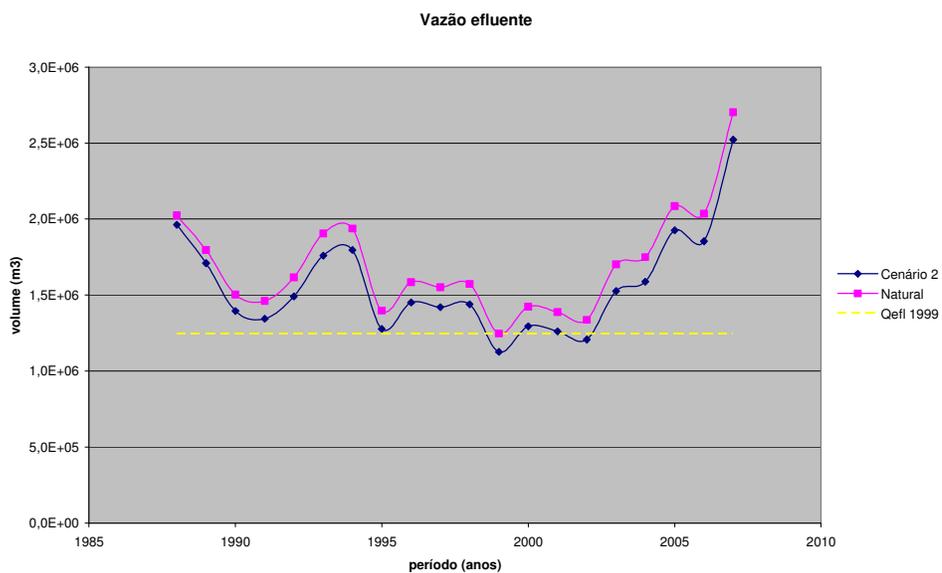


Figura 81 - Comparação entre a vazão efluente do cenário 2 e a da série de 20 anos, sem bombeamento.

Na Figura 82 observa-se novamente um comportamento semelhante ao do cenário anterior, sendo a vazão influente maior que a natural em quase toda a série, com exceção dos anos de 1997 e de 2006.

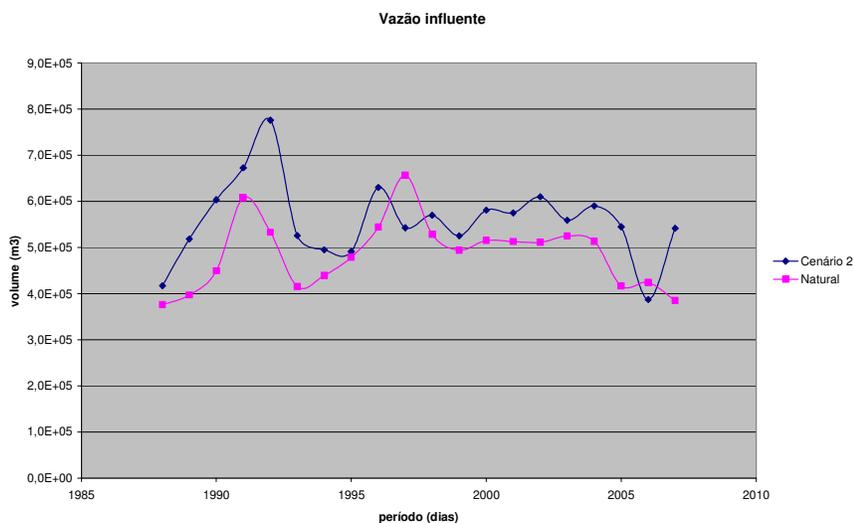


Figura 82 - Comparação entre a vazão influente do cenário 2 e a da série de 20 anos, sem bombeamento.

O balanço anual também apresentou resultado semelhante, sendo equivalente ou ligeiramente maior que o natural durante o período (Figura 83). Já o balanço acumulado (Figura 84) foi melhor que o do Cenário 1, tendo ficado menor que o natural apenas nos dois primeiros anos da série, apresentando valores maiores no restante do período.

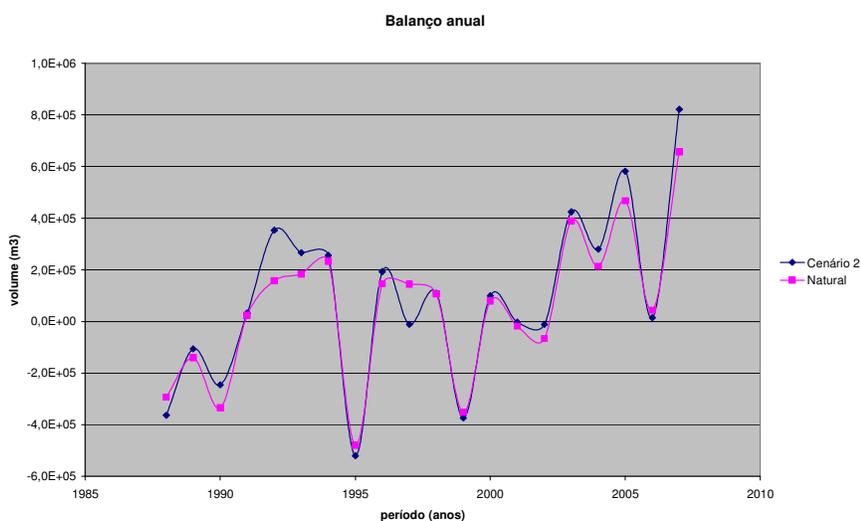


Figura 83 - Comparação entre o balanço anual do cenário 2 e o da série de 20 anos, sem bombeamento.

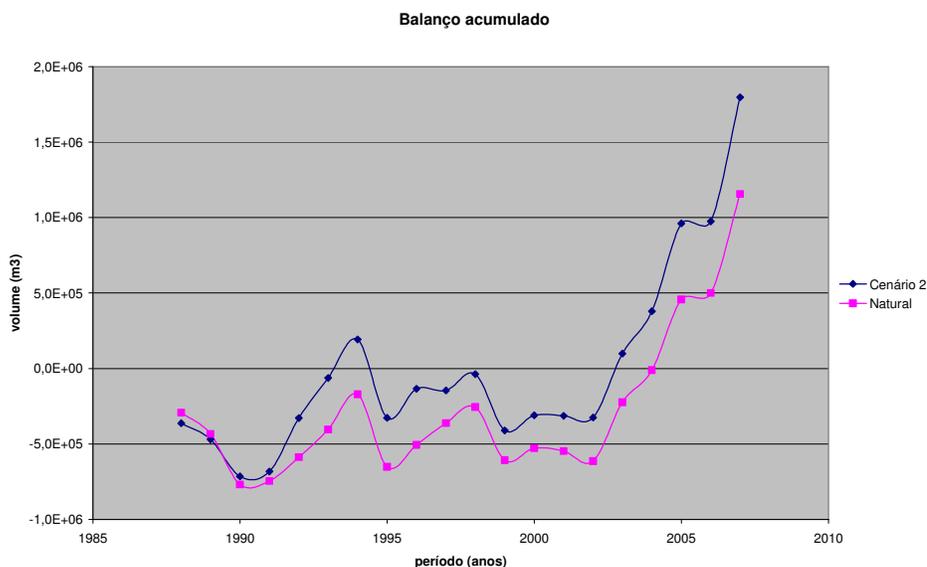


Figura 84 - Comparação entre o balanço acumulado do cenário 2 e o da série de 20 anos, sem bombeamento.

7.3

Cenário 3: Vazão bombeada de 480 m³/d – 1 poço bombeando 20 m³/h na várzea, à jusante, no Córrego Barro Branco

O cenário 3 corresponde ao mesmo regime de bombeamento dos anteriores, só que a localização do poço “a” (Figura 72) é mais à jusante no vale do córrego Barro Branco, na área onde se observou a ocorrência de nível freático aflorante na maioria das simulações. A sua localização é mais próxima, portanto da saída da bacia. Outra diferença entre este cenário e os anteriores é que a zona de fratura captada pelo poço “a” possui condutividade hidráulica quatro vezes menor que a zona de fratura captada nas duas simulações anteriores. Abaixo, na Figura 85, é apresentado o balanço global desta simulação e suas respectivas parcelas. Na Figura 86 observa-se novamente que a recarga computada teve um comportamento muito próximo da recarga sem bombeamento. Na Figura 87, observa-se que a vazão efluente também se manteve menor que a da série sem bombeamento.

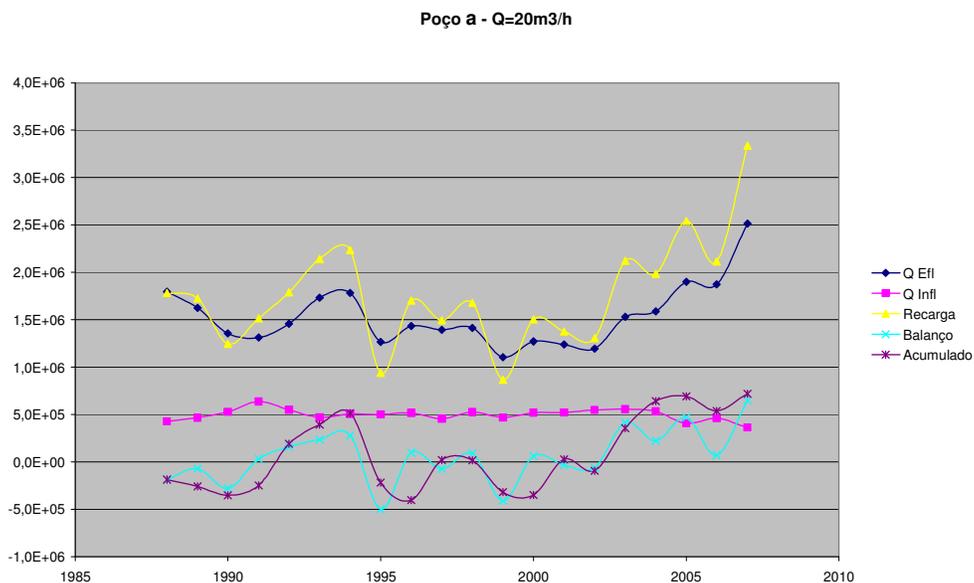


Figura 85 – Balanço global do cenário 3

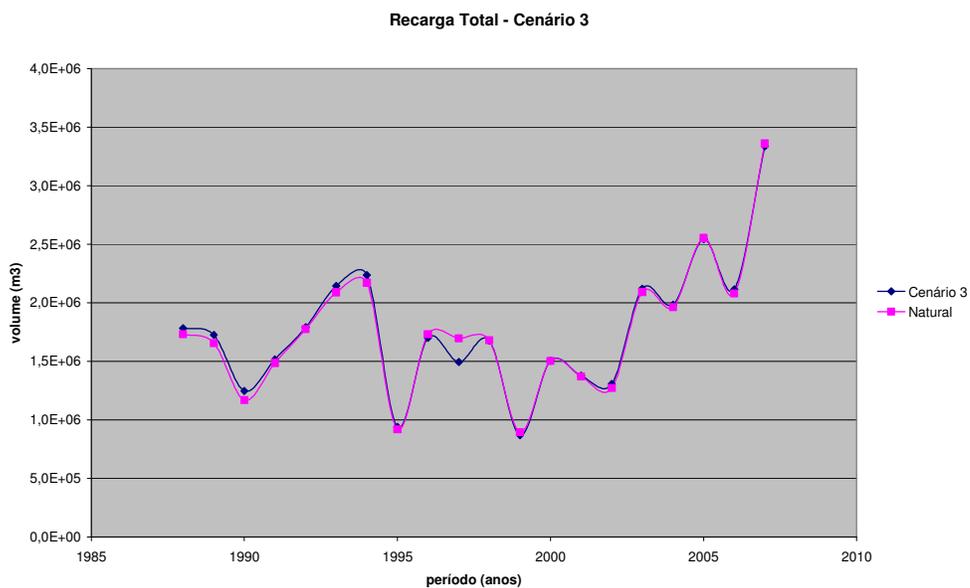


Figura 86 – Comparação entre a recarga total do cenário 3 e a recarga da série de 20 anos (natural).

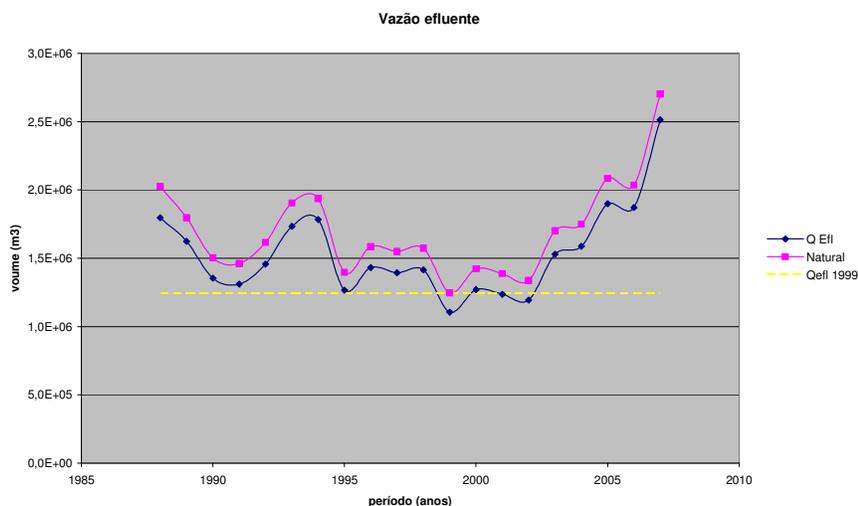


Figura 87 - Comparação entre a vazão efluente do cenário 3 e a da série de 20 anos, sem bombeamento (natural).

A vazão influente, no entanto, se comportou de forma diferenciada dos dois cenários anteriores (Fig. 88), apresentando valores mais próximos dos encontrados para a condição natural, e em alguns anos iguais ou menores. Com isso o balanço anual (Fig. 89) ficou muito próximo do natural e o acumulado foi ligeiramente maior até a metade da série, após o que, manteve-se equivalente ao da bacia sem bombeamento (Fig. 90).

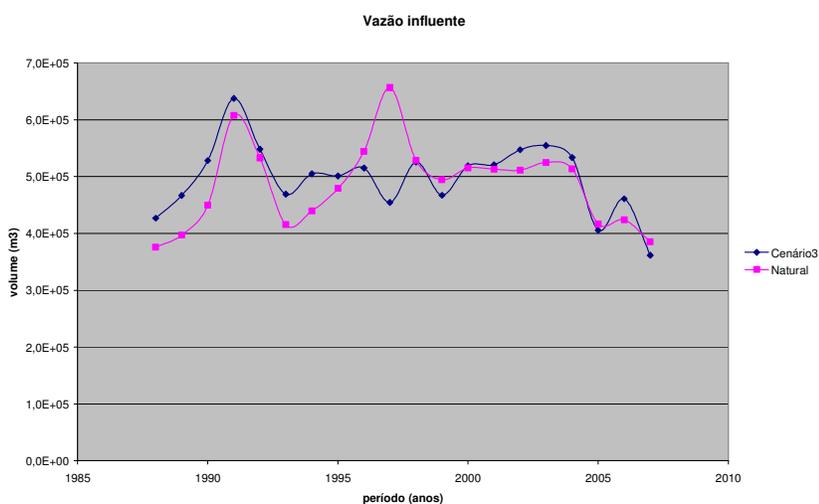


Figura 88 - Comparação entre a vazão influente do cenário 3 e a da série de 20 anos, sem bombeamento.

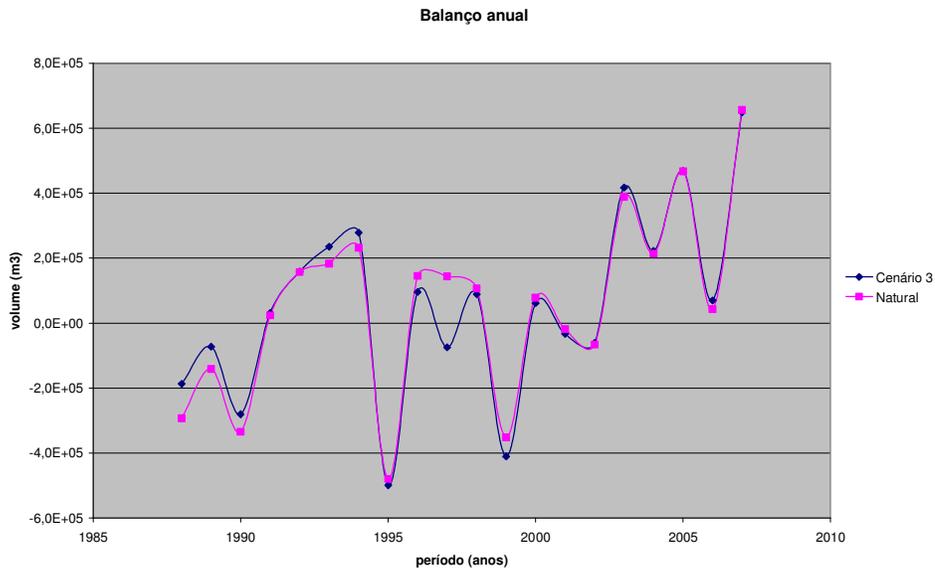


Figura 89 - Comparação entre o balanço anual do cenário 3 e o da série de 20 anos, sem bombeamento.

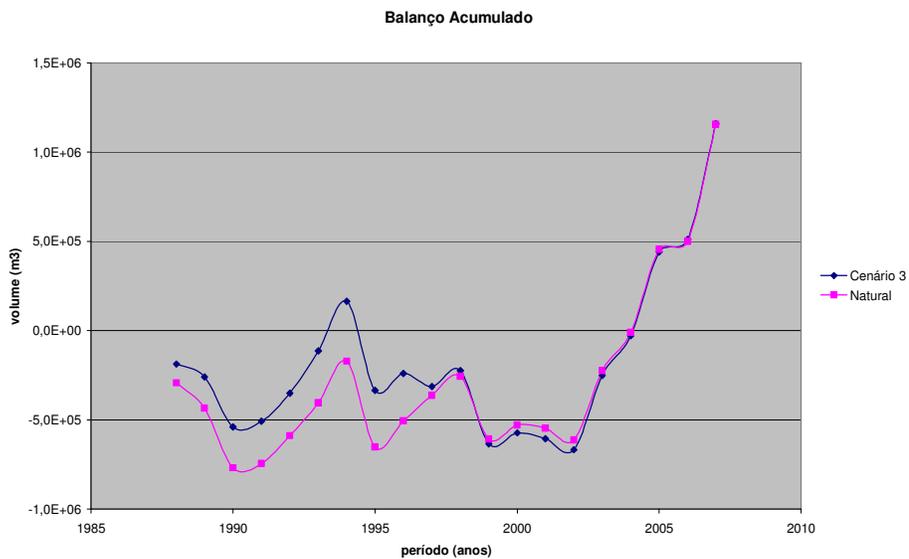


Figura 90 - Comparação entre o balanço acumulado do cenário 3 e o da série de 20 anos, sem bombeamento.

7.4

Cenário 4: Vazão bombeada de 960 m³/d – 2 poços bombeando 20 m³/h cada, poços “e” e “a”

Neste cenário a vazão bombeada foi dobrada, com dois poços bombeando 20 m³/h cada. Os poços utilizados foram o “e”, no local do poço profundo da prefeitura e o “a”, na várzea à jusante no córrego Barro Branco (Fig. 72). Na figura 91 foram traçadas as curvas correspondentes ao balanço global da bacia, para o período de 20 anos, e suas respectivas parcelas. Na figura 92, nota-se que a recarga para este cenário foi ligeiramente maior em quase toda a série com exceção de 1997, quando foi menor, apresentando neste caso uma diferença menor que a dos cenários anteriores. A vazão efluente (Fig. 93), como esperado, foi a menor de todas, assim como a vazão influente (Fig. 94) foi bem maior que a dos cenários 1 e 2. O balanço anual (Fig. 95) também não apresentou uma diferença sensível, tendo sido, no entanto, o pior de todos. Finalmente, o balanço acumulado (96) foi em toda a série menor do que o do cenário sem bombeamento.

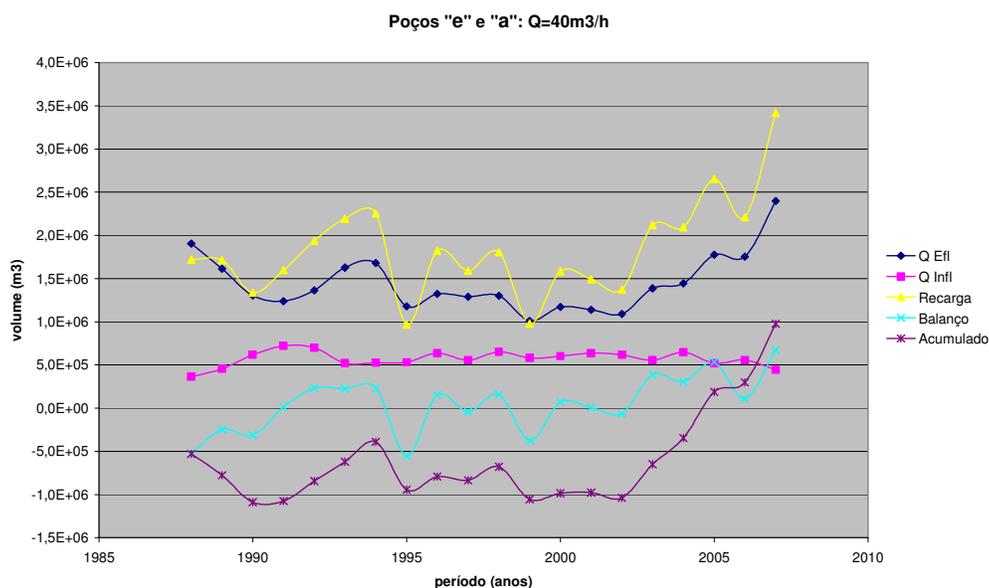


Figura 91 – Balanço global do Cenário 4.

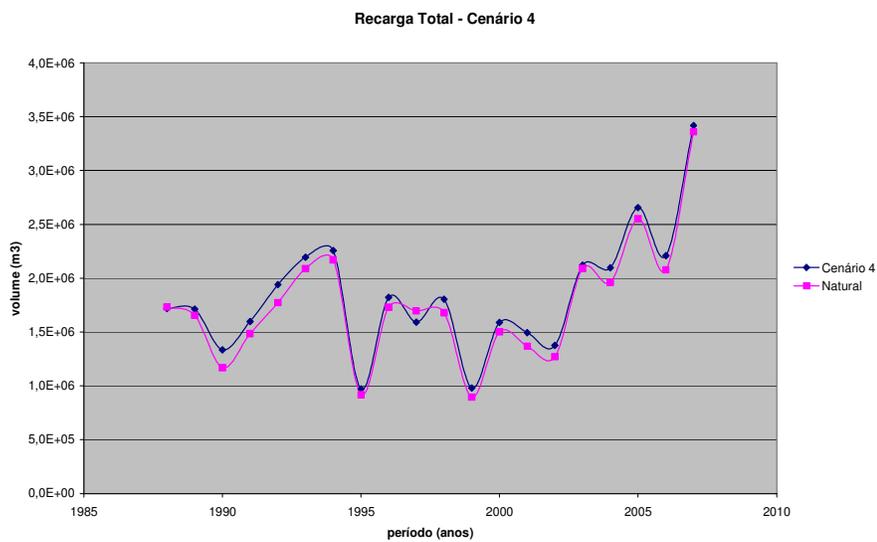


Figura 92 – Comparação entre a recarga total do Cenário 4 e a recarga da série de 20 anos.

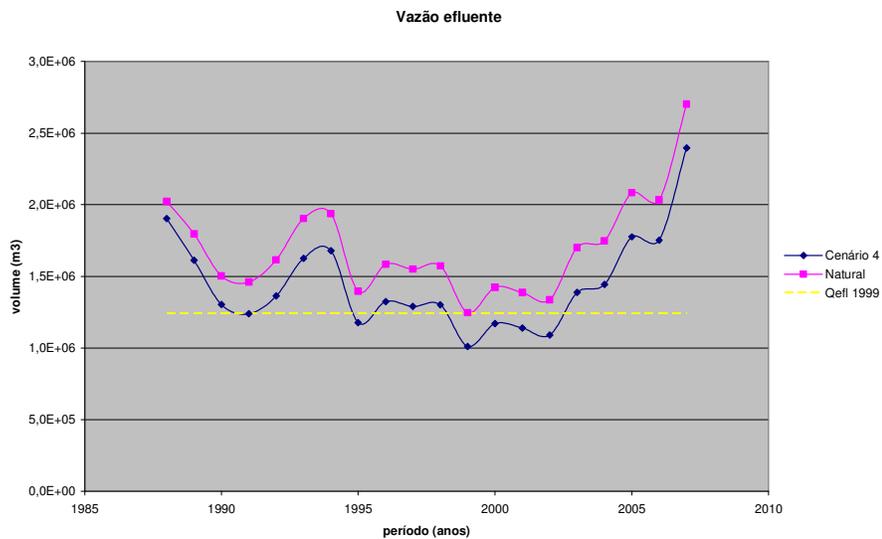


Figura 93 - Comparação entre a vazão efluente do Cenário 4 e a da série de 20 anos, sem bombeamento.

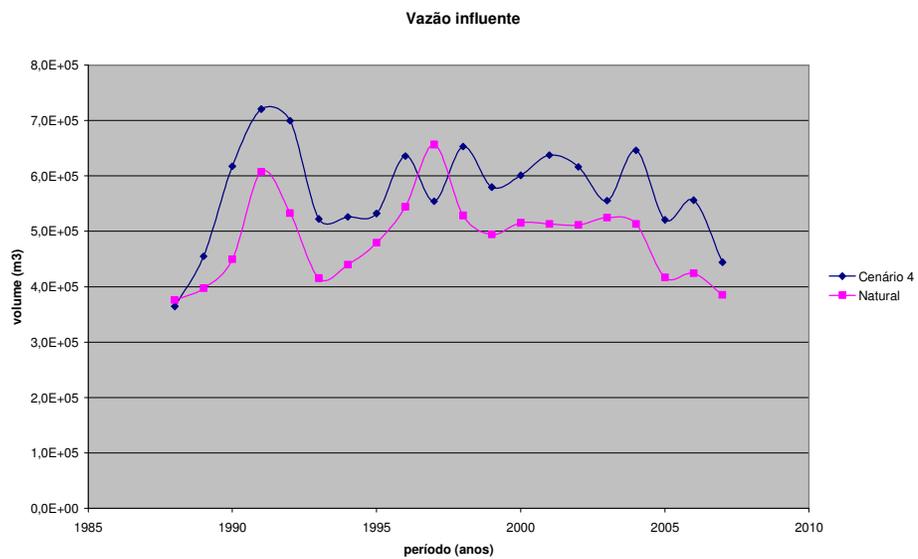


Figura 94 - Comparação entre a vazão influente do Cenário 4 e a da série de 20 anos, sem bombeamento.

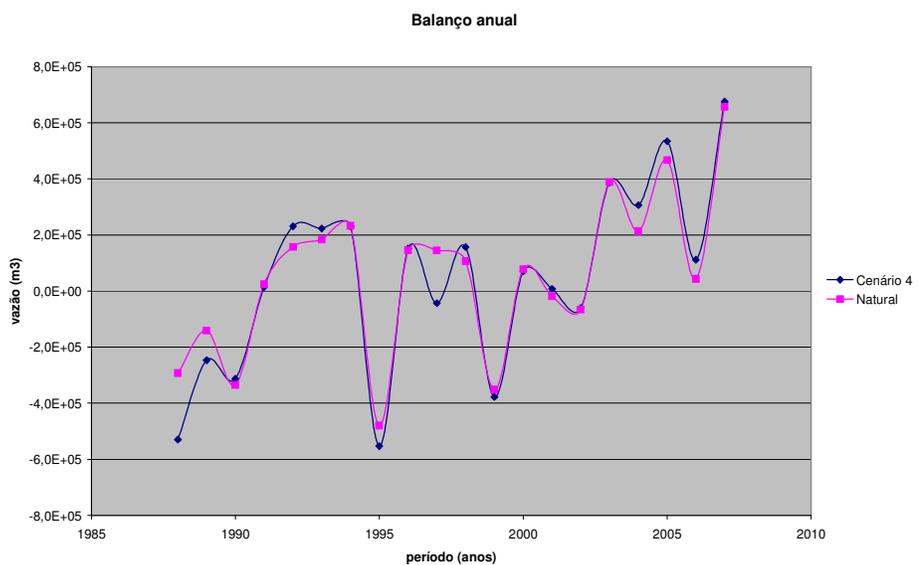


Figura 95 - Comparação entre o balanço anual do Cenário 4 e o da série de 20 anos, sem bombeamento.

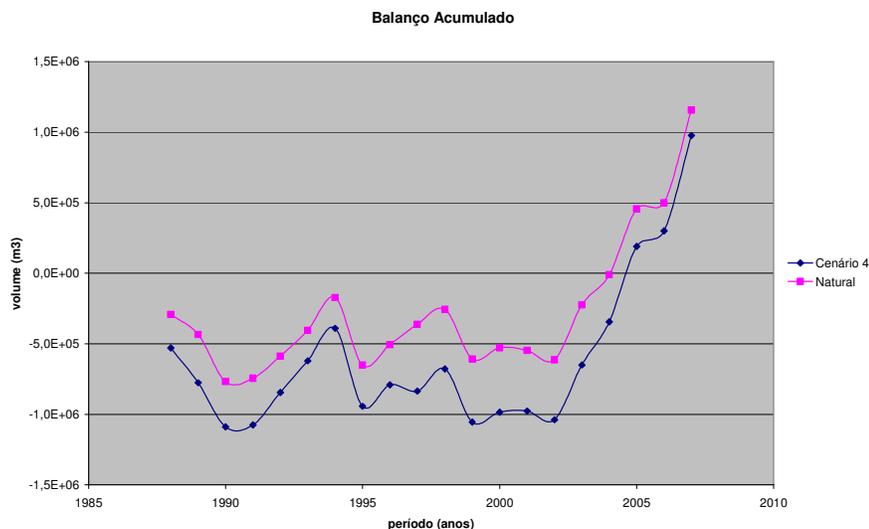


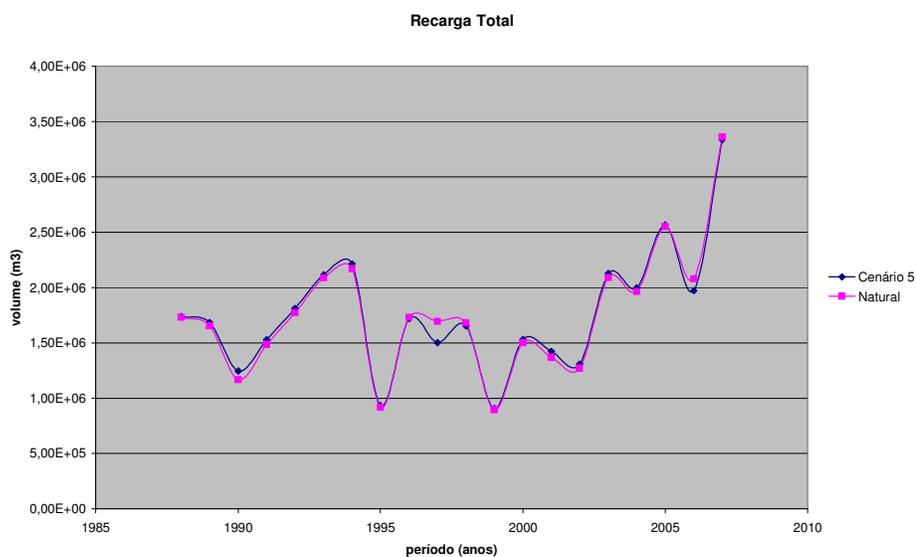
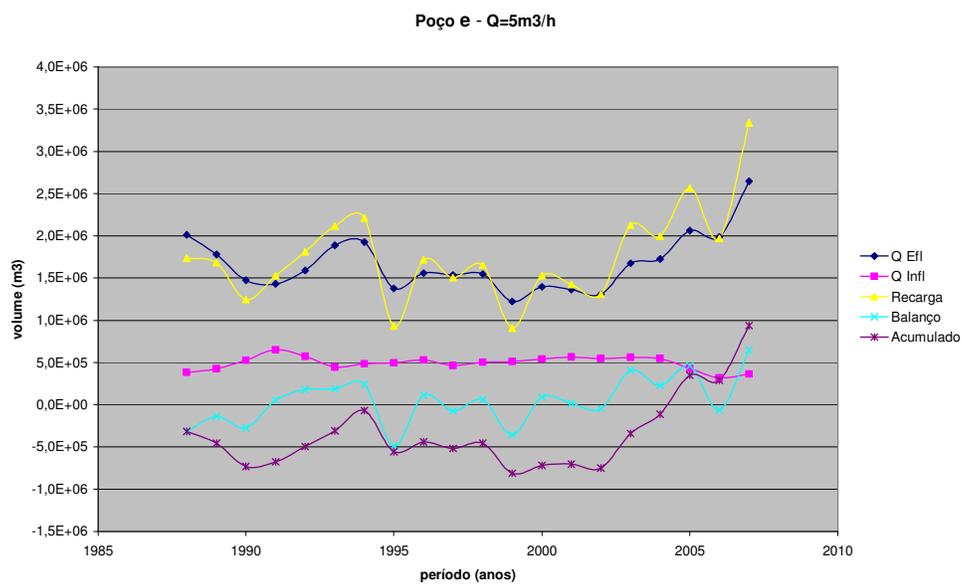
Figura 96 - Comparação entre o balanço acumulado do Cenário 4 e o da série de 20 anos, sem bombeamento.

7.5

Cenário 5: Vazão bombeada de 120 m³/d – 1 poço bombeando 5 m³/h próximo ao poço profundo (PP)

Este cenário corresponde a um único poço (poço **e** na Fig. 72), bombeando 5 m³/h, localizado próximo ao poço tubular profundo da Prefeitura de São José de Ubá. A vazão bombeada, portanto, é quatro vezes menor que a dos cenários 1, 2 e 3, e corresponde a um valor médio de vazão de exploração de poços que captam o cristalino no Estado do Rio de Janeiro (Barreto et al., 2001). O regime de bombeamento aplicado foi o mesmo dos cenários anteriores, ou seja, 24h/d, todos os dias do ano.

Na figura 97 foram traçadas as curvas do balanço de massa global e suas parcelas, relativas ao período de 20 anos. Na figura 98 é apresentada a comparação entre a recarga total do cenário e a da bacia sem bombeamento. Nota-se que a recarga foi praticamente a mesma em todo o período, apresentando valores ligeiramente maiores que a natural, com exceção de 1997, quando apresentou uma diferença significativa, e em 2006, quando foi ligeiramente menor.



Na Figura 99, nota-se que a diminuição da vazão efluente foi quase imperceptível quando comparada com a natural. A vazão influente (Fig. 100), por

outro lado foi maior em quase toda a série, com exceção de 1997 e dos dois últimos anos.

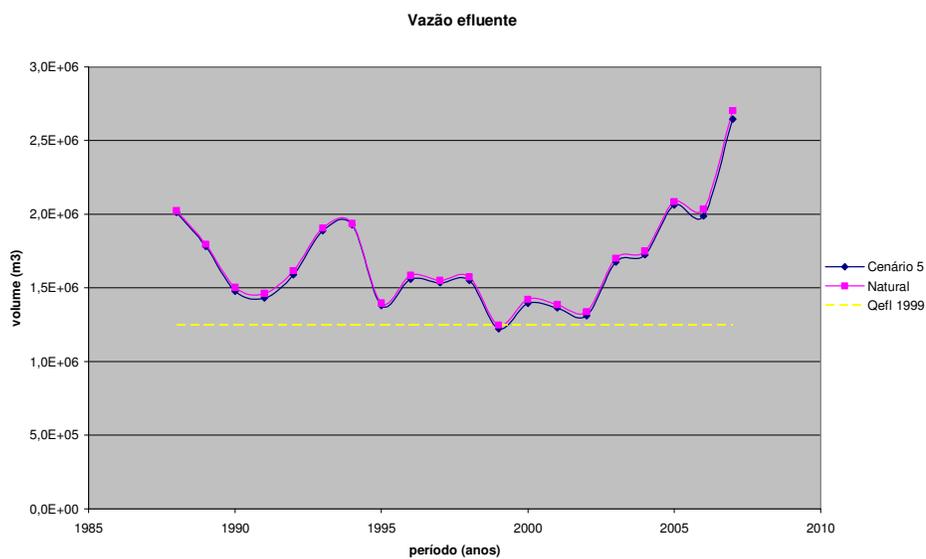


Figura 99 - Comparação entre a vazão efluente do Cenário 5 e a da série de 20 anos, sem bombeamento.

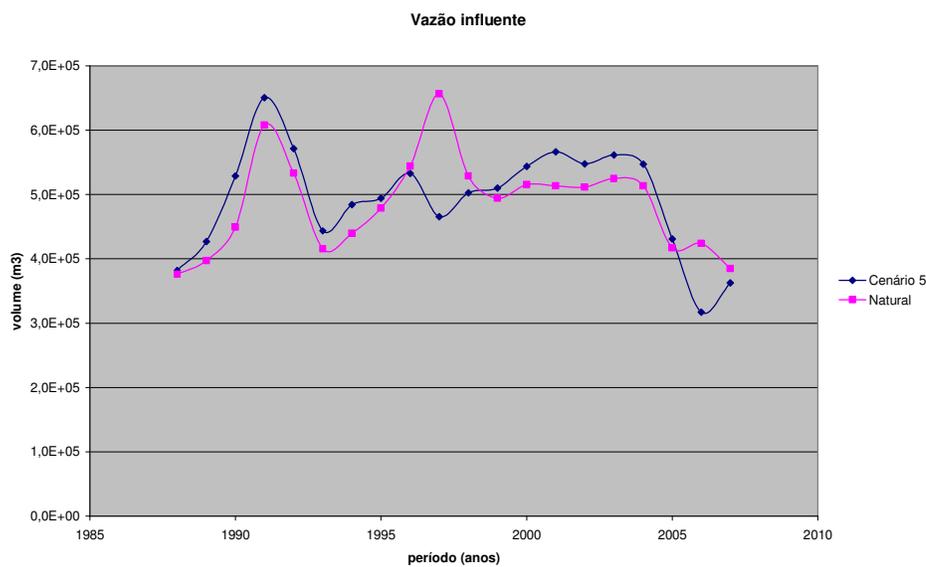


Figura 100 - Comparação entre a vazão influente do Cenário 5 e a da série de 20 anos, sem bombeamento (natural).

Na figura 101 é apresentado o balanço anual e na figura 102, o balanço acumulado. Novamente percebe-se que a vazão bombeada no cenário 5 não provocou grandes alterações no balanço anual em relação ao balanço da série sem bombeamento. O balanço acumulado é maior que o natural até quase a metade da série, sendo menor deste ponto em diante.

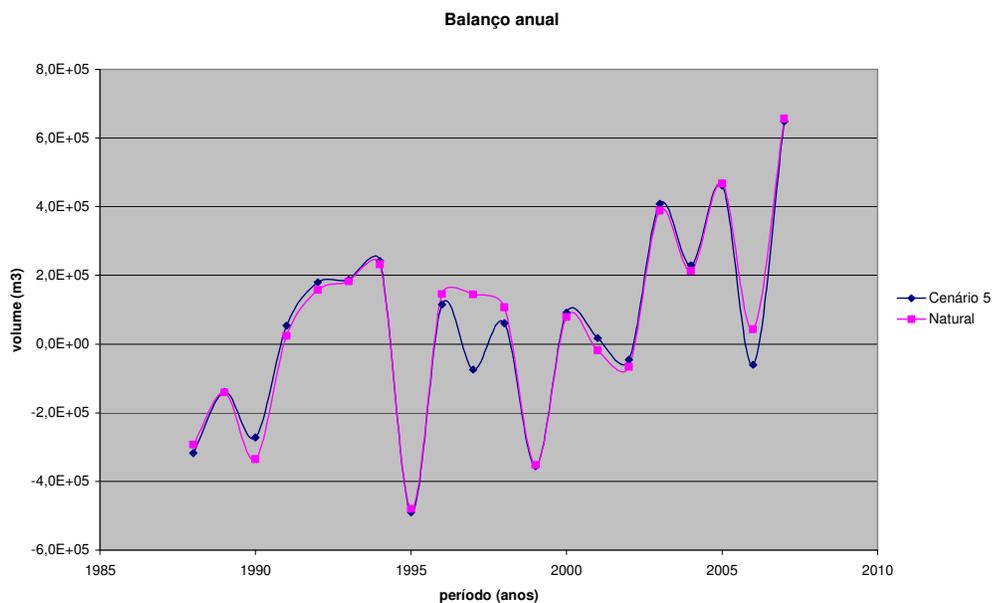


Figura 101 - Comparação entre o balanço anual do Cenário 5 e o da série de 20 anos, sem bombeamento.

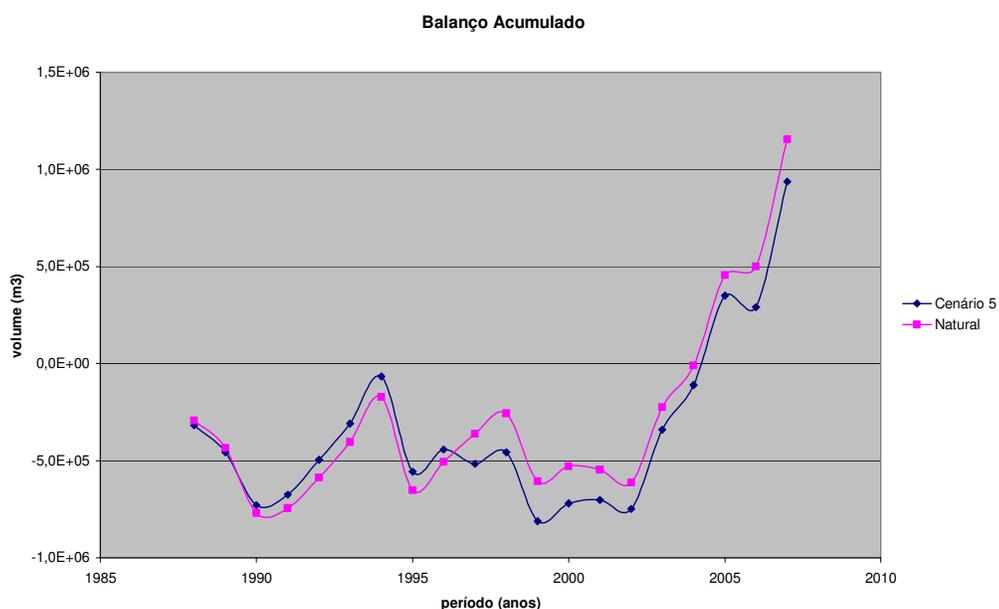


Figura 102 - Comparação entre o balanço acumulado do Cenário 5 e o da série de 20 anos, sem bombeamento.

7.6

Cenário 6: Vazão bombeada de 3456 m³/d – 6 poços bombeando 24m³/h

Neste cenário foi imposta uma vazão de bombeamento diária de 3456 m³/d, que ao final de 360 dias equivale, aproximadamente, ao volume total de vazão efluente da bacia do ano de 1999 (1,25 x 10⁶ m³). Foram utilizados todos os seis poços indicados na Figura 72, sendo a exploração distribuída pelos dois vales da bacia, com poços na sua porção média, à montante, e próximos ao exutório.

A Figura 103 corresponde ao balanço de massa global da bacia, com suas respectivas parcelas. Nota-se que houve uma mudança de ordem de grandeza do balanço acumulado, que chegou a -1,70 x 10⁷ m³. Na figura 104 é apresentada a comparação entre a recarga total resultante deste cenário e a recarga total sem bombeamento.

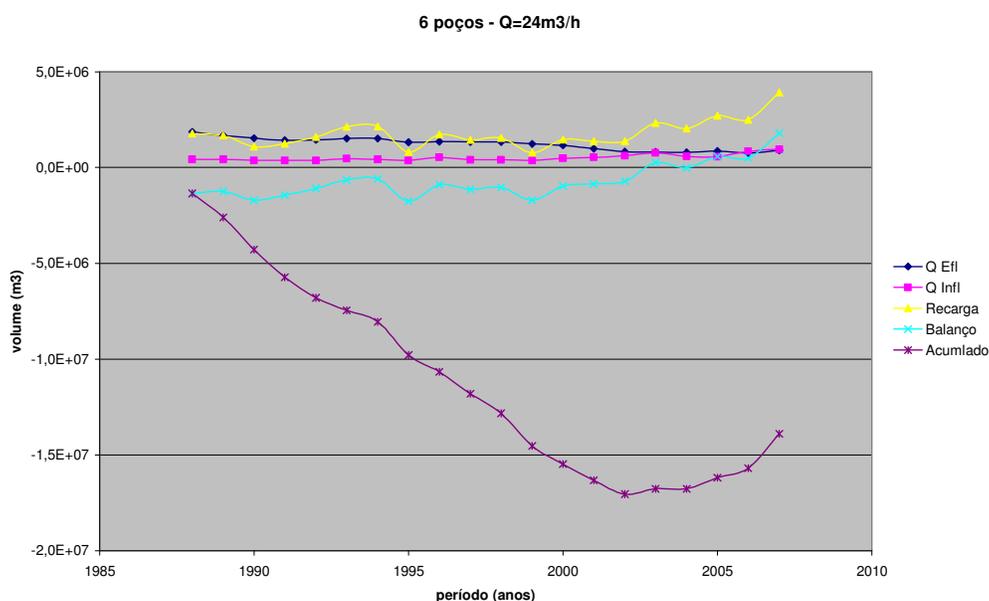


Figura 103 - Balanço global do Cenário 6

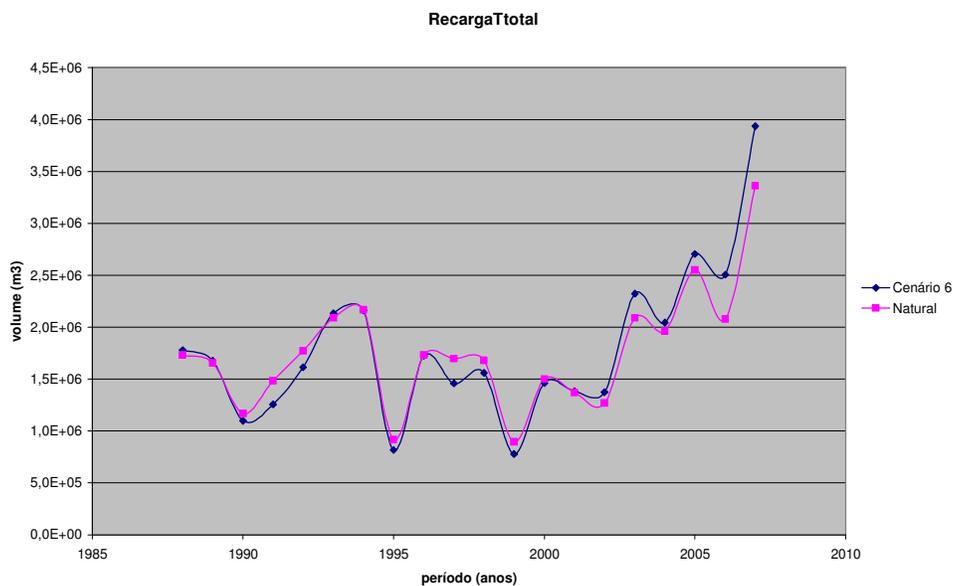


Figura 104 – Comparação entre a recarga total do Cenário 6 e a recarga da série de 20 anos sem bombeamento.

Nas figuras 105 e 106 são apresentadas as curvas de variação da vazão efluente e influente no período de 20 anos. A vazão efluente relativa ao ano de 1999 foi traçada como referência. Nota-se que a partir de 1995, os valores de vazão efluente são inferiores a $1,40 \times 10^6 \text{ m}^3$, e que em 1999 a vazão efluente do cenário 6 se equipara à natural. A partir de 1999 a vazão decai rapidamente para valores abaixo de $1,0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ e permanece neste patamar até o final da série.

As figuras 107 e 108 abaixo correspondem, respectivamente, à comparação entre o balanço anual e o acumulado do Cenário 6 e os da bacia em condições naturais. Nota-se que o balanço anual se mantém negativo, com valores bem inferiores aos computados para as condições naturais, até 2003, quando então se mantém positivo ou próximo de zero, sendo que a partir de 2005 ele apresenta valores superiores aos da bacia sem bombeamento.

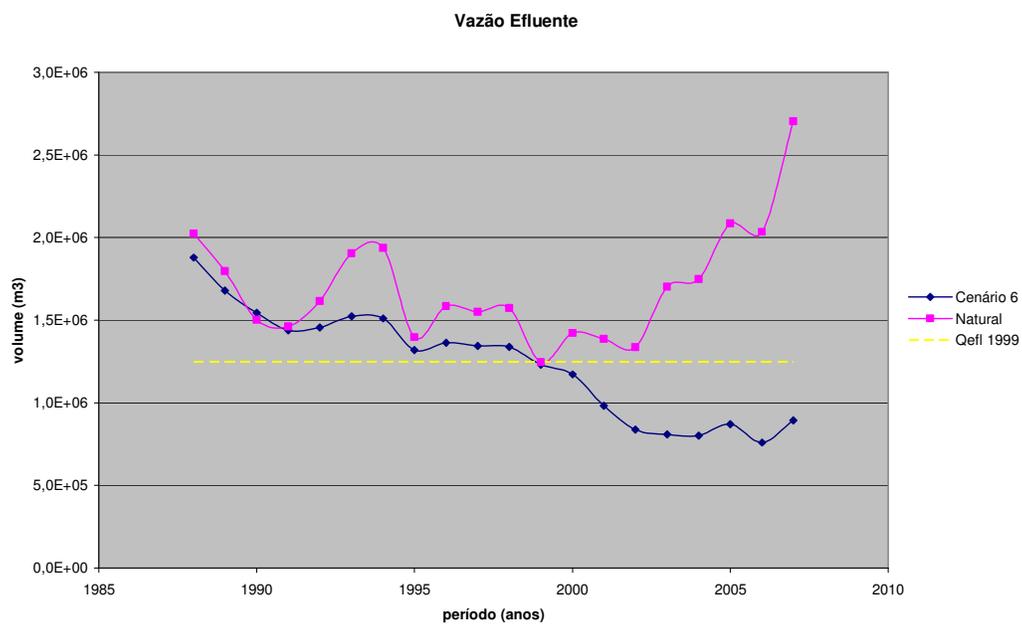


Figura 105 - Comparação entre a vazão efluente do Cenário 6 e a da série de 20 anos, sem bombeamento.

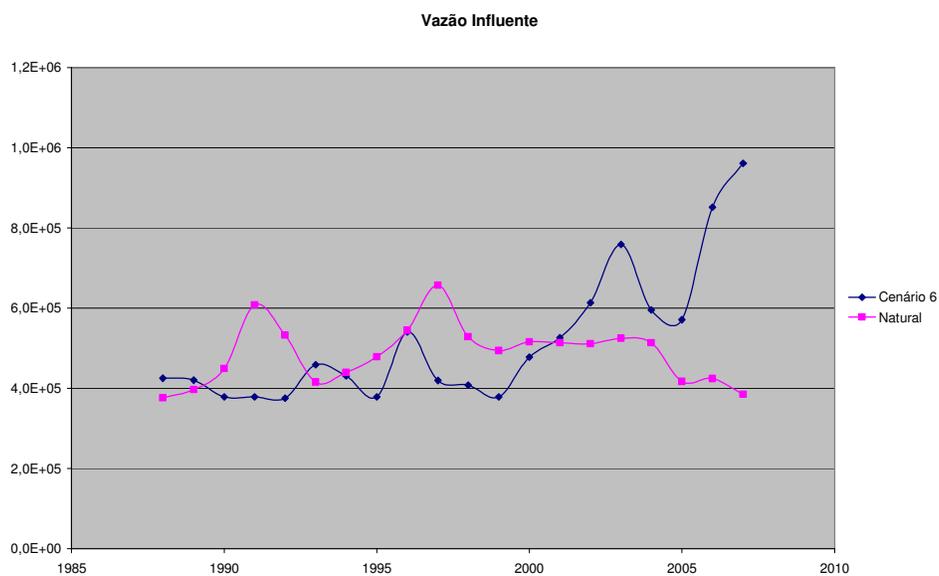


Figura 106 - Comparação entre a vazão influente do Cenário 6 e a da série de 20 anos, sem bombeamento.

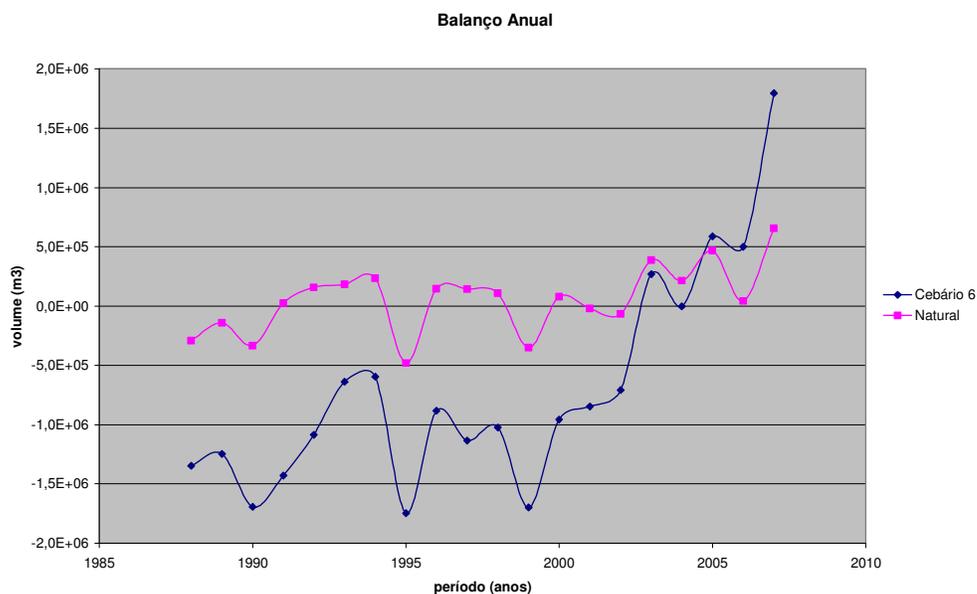


Figura 107 - Comparação entre o balanço anual do Cenário 6 e o da série de 20 anos, sem bombeamento.

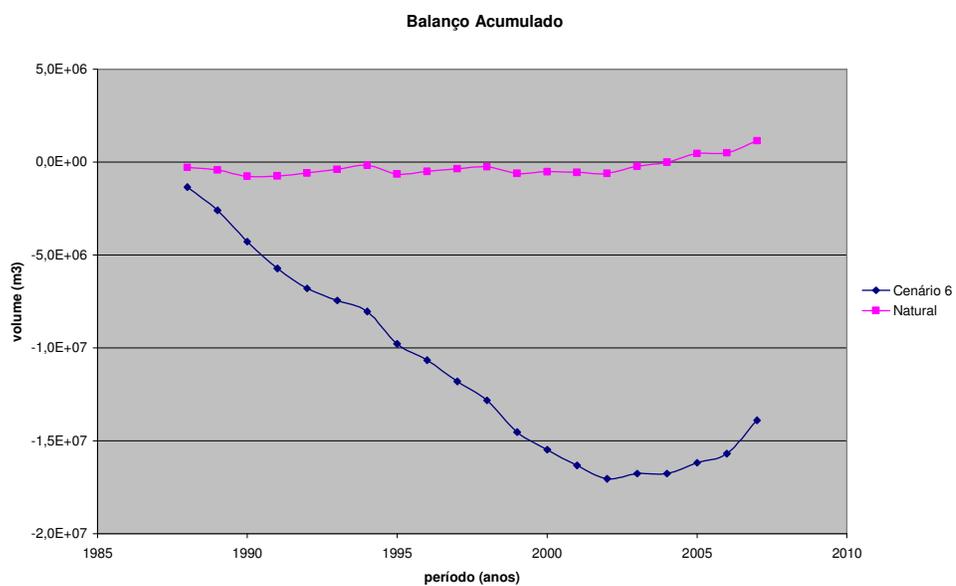


Figura 108 - Comparação entre o balanço acumulado do Cenário 6 e o da série de 20 anos, sem bombeamento.

O balanço acumulado decresce rapidamente, chegando a valores da ordem de 10^7 m^3 negativos, e só apresenta uma recuperação nos três últimos anos, indicando claramente que a vazão bombeada não é sustentada pela bacia.

7.7 Análise dos Resultados

Nenhum dos cenários descritos acima pode ser considerado sustentável, se o critério a ser seguido se basear em um limite inferior de vazão efluente, como proposto no Capítulo 6. Já vimos que a bacia naturalmente apresenta cenários de completo secamento dos seus córregos, e que um valor mínimo aceitável de volume de vazão anual de $1,40 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{ano}$ ainda deixaria de fora do critério de sustentabilidade os anos de 1999 e de 2002. Os cenários aqui apresentados, por outro lado, representam regimes intensos de bombeamento, onde os poços são explorados de forma ininterrupta.

Os resultados relativos aos cenários de 1 a 3, que representam apenas um poço bombeando $20 \text{ m}^3/\text{h}$, mostraram que esta vazão de bombeamento é suficiente para reduzir significativamente o volume de água escoado pelos canais. A figura 109 apresenta uma comparação entre as vazões efluentes resultantes dos três primeiros cenários.

O resultado de vazão efluente para os 3 cenários é muito semelhante, mas o cenário 1, em comparação com o 2 e o 3, foi o que apresentou o resultado mais favorável, tendo provocado a menor redução de volume desta vazão. Este resultado está relacionado com a localização mais distante do poço “e” em relação ao córrego do Barro Branco, em comparação com os poços “a” e “b”, e por seu cone de influência não chegar a atingir diretamente o rio, como é o caso dos Cenários 2 e 3. Nas figuras 110 a 112 são apresentados os cones de rebaixamento dos poços “e”, “b” e “a”, que correspondem respectivamente aos poços utilizados nos cenários 1, 2 e 3. O resultado é relativo ao estágio de tempo correspondente a outubro de 1997, que foi um ano com valores médios de precipitação e de recarga (1057 mm e 192 mm, respectivamente).

No Cenário 2 onde o poço “b” capta o rio mais à montante, a vazão efluente resultante é maior do que no Cenário 3, em que o poço está mais próximo da saída da bacia e, portanto, da estação fluviométrica.

No Cenário 3, o poço “a” capta a área de baixada com nível freático aflorante, ou seja, está localizado diretamente em uma área de descarga da bacia, tendo, portanto, um maior impacto na vazão efluente resultante, por estar divergindo de forma direta um volume de água que seria descarregado pelo rio. Outro aspecto do Cenário 3 é que a zona de fratura captada tem condutividade hidráulica menor que nos Cenários 1 e 2, fazendo com que o cone de rebaixamento do poço seja maior do que o dos outros dois cenários, sendo capaz de captar um maior volume de descarga. As figuras 113 e 114 representam a distribuição de carga hidráulica do estágio de tempo de 3631 dias, correspondente ao início de outubro do ano de 1997 da série histórica sem bombeamento.

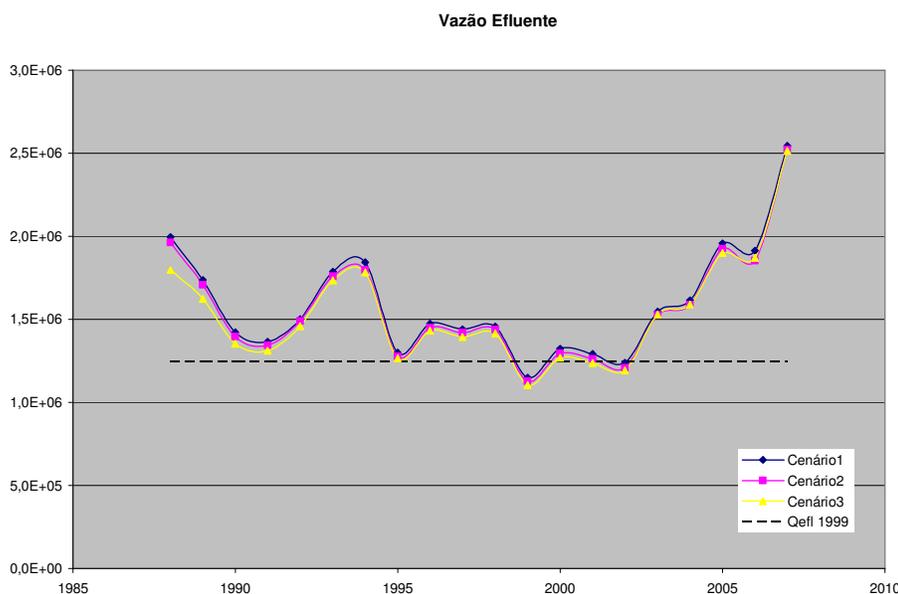


Figura 109 – Comparação dos volumes de vazão efluente, relativos aos Cenários 1, 2 e 3.

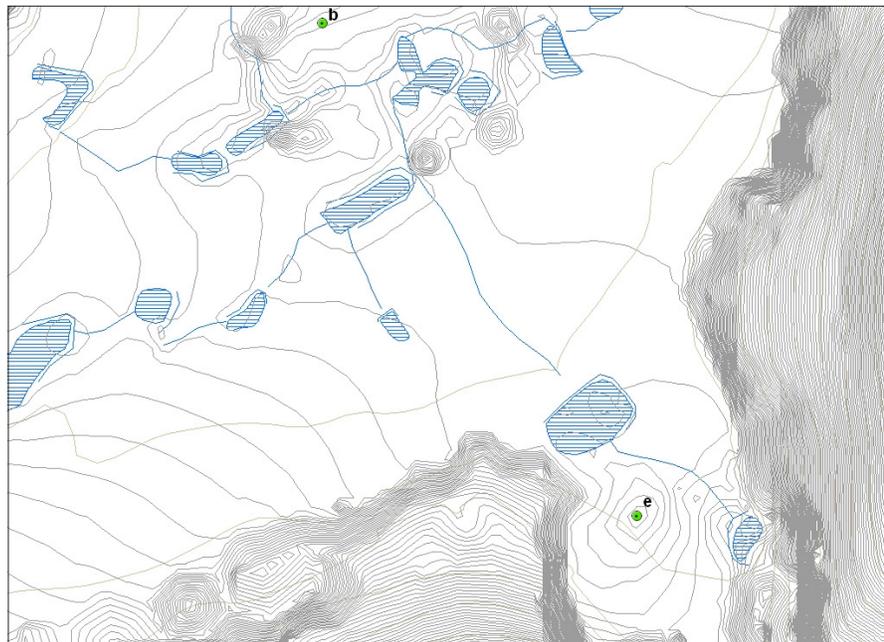


Figura 110 – Cone de rebaixamento do poço “e” (canto inferior direito). As isolinhas representam intervalos de 1 m de carga hidráulica.

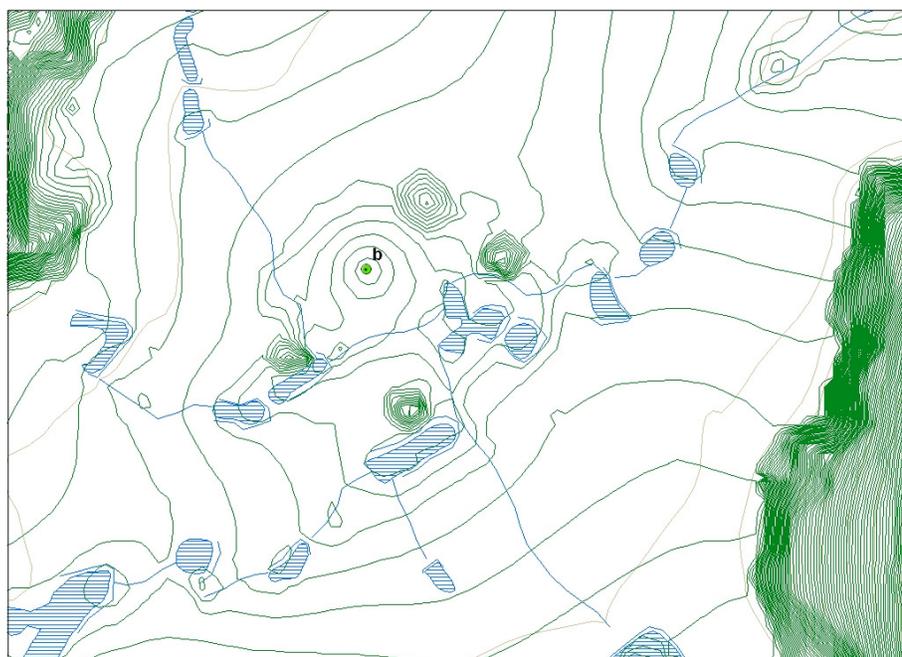


Figura 111 – Cone de rebaixamento do poço “b” captando o córrego Barro Branco. As isolinhas representam intervalos de 1 m de carga hidráulica.

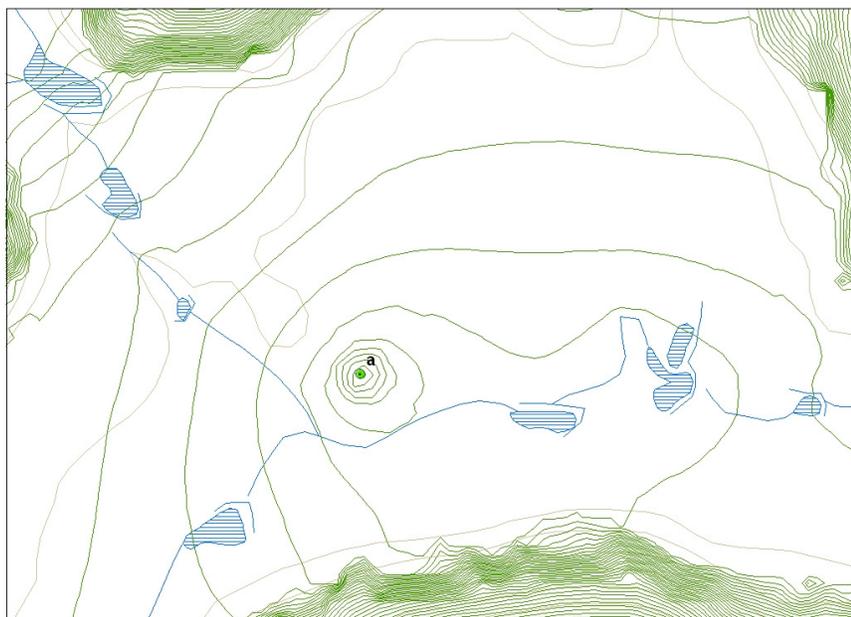


Figura 112 – Cone de rebaixamento do poço “a” captando o córrego Barro Branco. As isolinhas representam intervalos de 1 m de carga hidráulica.

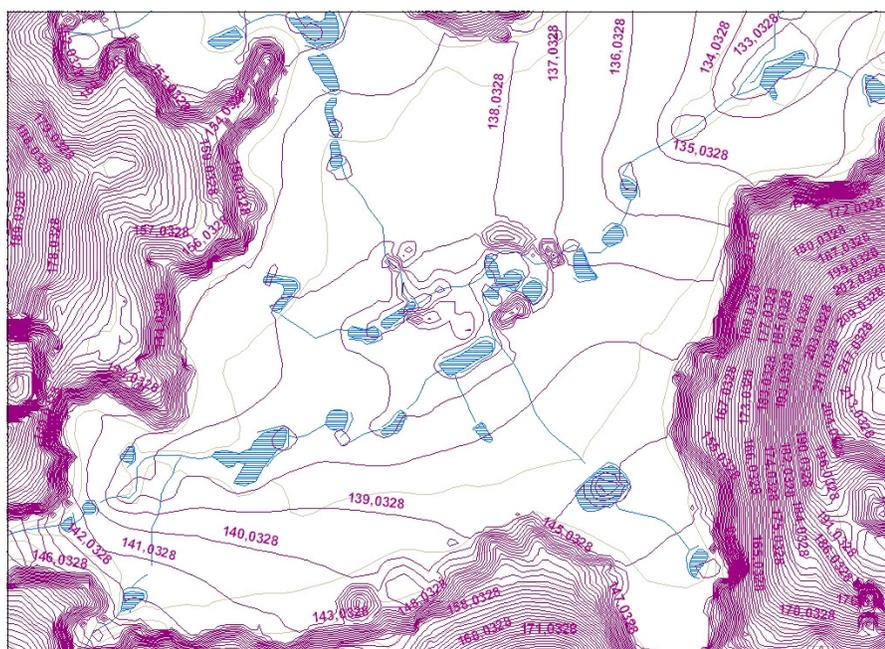


Figura 113 – Distribuição de carga hidráulica no vale principal, em condições “naturais”, onde estão situados os poços e e b – estágio de tempo de 3631 dias (outubro de 1997).

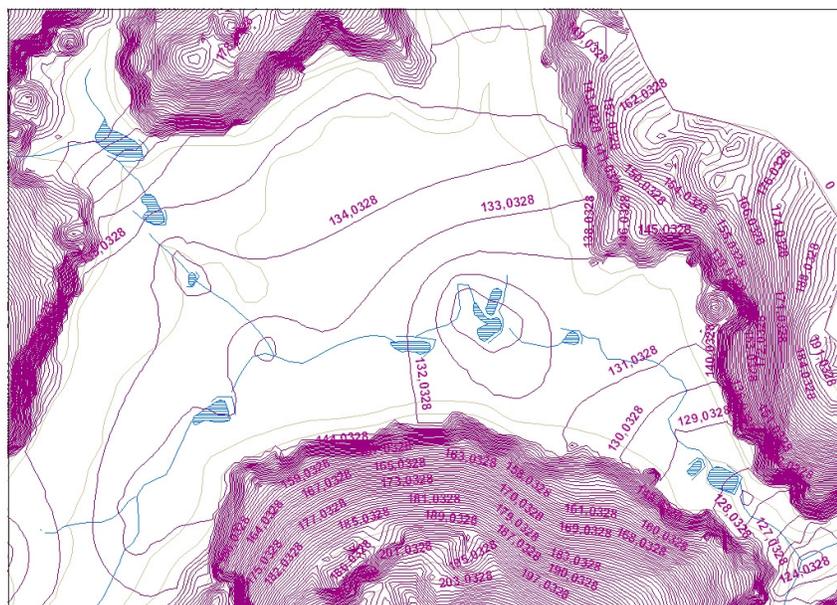


Figura 114 - Distribuição de carga hidráulica, em condições naturais, no vale principal à jusante, onde está situado o poço “a” – estágio de tempo de 3631 dias (outubro de 1997).

Os três primeiros cenários foram comparados também em relação ao balanço acumulado (Fig. 115). Observa-se, como esperado, que no caso do Cenário 1, a recarga induzida pelo bombeamento foi a menor de todas, já que não houve uma interferência direta entre o cone de rebaixamento do poço e o rio, e como resultado não houve um aumento de fluxo influente que compensasse o volume de água subtraído pelo poço. O Cenário 2 teve como resultado uma maior recarga indireta, tendo o seu cone de rebaixamento atingido diretamente o córrego Barro Branco, induzindo um maior volume de fluxo influente em suas imediações. Já o Cenário 3, que representa um bombeamento direto de uma área de descarga, apresenta um balanço acumulado pior que o do Cenário 2, na maior parte da série. Por ser um poço localizado diretamente em uma área de descarga, ele não induz a ocorrência de nova recarga.

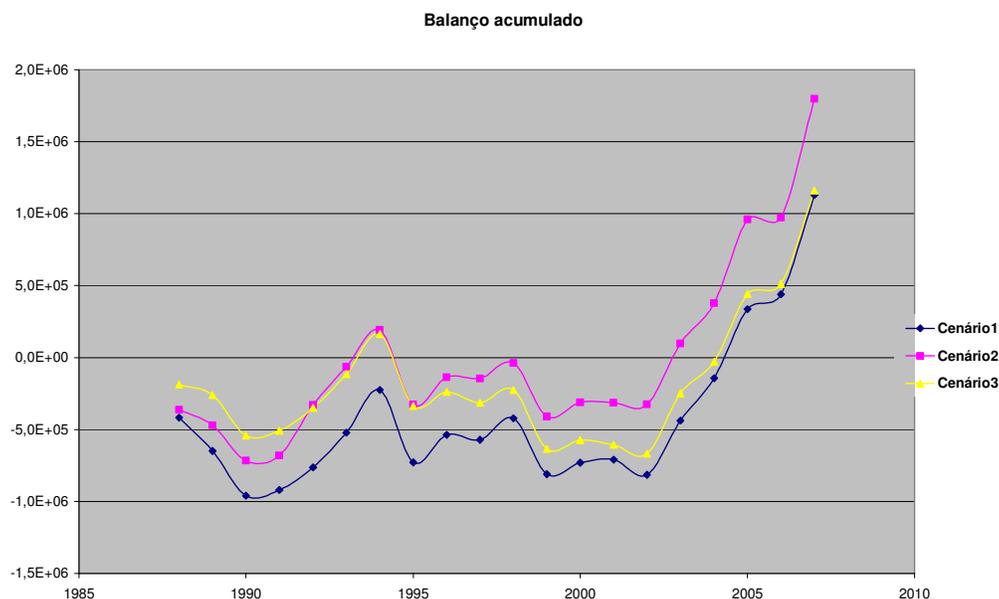


Figura 115 – Comparação dos resultados de balanço acumulado dos Cenários 1, 2 e 3.

O resultado do Cenário 4 demonstra que a bacia suporta uma vazão de bombeamento de 960 m³/d, mas a vazão efluente resultante fica abaixo da vazão de 1999 em boa parte da série, e abaixo de 1,40 x 10⁶ m³/ano na maior parte do período, sendo, portanto, insustentável se este volume for tomado como critério de sustentabilidade. Provavelmente uma extração deste nível corresponderia ao secamento dos córregos em boa parte da série.

Os resultados do Cenário 5 indicam que a vazão de bombeamento de 120 m³/d não tem como consequência nenhuma mudança significativa do volume escoado nos córregos da bacia, não alterando, portanto, o seu equilíbrio natural em épocas de seca. Em épocas de cheia o seu impacto é imperceptível, sendo um cenário sustentável. Vazões de exploração maiores podem ser testadas com regimes de bombeamento menos intensos, ou mesmo, com um planejamento que preveja a interrupção do bombeamento em épocas mais secas e captação e armazenamento de água em épocas mais úmidas.

O Cenário 6 representa uma condição extrema de extração de água subterrânea na bacia, e a sua simulação teve por objetivo a avaliação do impacto da extração de um volume correspondente a toda a descarga do ano mais seco da série no balanço de

massa da bacia e no comportamento da recarga indireta. Nota-se que de 2001 em diante há um aumento pronunciado da recarga total (Figura 116), em função do rebaixamento de carga hidráulica subterrânea, provocado pelo bombeamento, e do aumento da recarga indireta, ou fluxo influente (Figura 106). Apesar do valor de recarga total computado no cenário 6 chegar a valores superiores que os encontrados no cenário natural, o balanço acumulado e o nível de vazão efluente resultantes indicam claramente a não sustentabilidade do bombeamento. A simulação demonstrou que mesmo um cenário de exploração não sustentável pode resultar em valores de recarga total superiores aos encontrados na bacia em condições naturais.

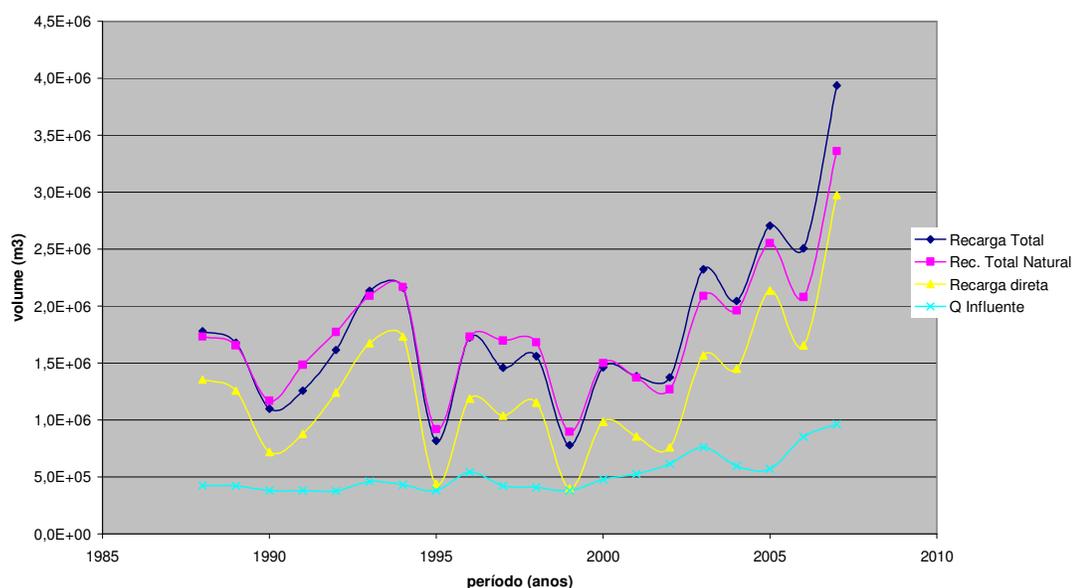


Figura 116 – Comportamento da recarga total e da vazão influente do cenário 6, da recarga total natural e da recarga direta.

A bacia de Barro Branco representa um sistema hidrológico frágil, onde os cursos d'água superficiais são alimentados exclusivamente pelo fluxo subterrâneo, e qualquer exploração de água subterrânea será sustentada pela captura da descarga destes cursos. A gestão de recursos hídricos na bacia deve passar pela decisão de que nível de vazão nos córregos é considerado sustentável e capaz de manter as lavouras de verão, tão dependentes destes corpos d'água. O modelo numérico de fluxo da micro-bacia de Barro Branco se mostrou uma ferramenta útil para auxiliar nesta

tomada de decisão, inclusive para avaliação da localização ótima de instalação de poços profundos.

Deve-se ter sempre em mente a limitação dos dados utilizados na construção do modelo, e a possibilidade de aquisição de novos dados hidrológicos e de fluxo subterrâneo, que permitam uma melhor calibração da dinâmica superficial/subterrânea.