

IMPACTOS DA VARIABILIDADE E DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A RECARGA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA EM BACIAS COM DADOS ESCASSOS

H.M.L. Chaves¹; A.C.L. de Albuquerque¹ & I. Mattos¹

Resumo – Apesar de muitos aquíferos e bacias hidrográficas de regiões tropicais estarem sendo afetadas por variabilidades e mudanças climáticas, a limitada informação climática e hidrogeológica nessas áreas tende a dificultar a aplicação de modelos hidrogeológicos e a estimativa da recarga da água subterrânea em cenários futuros. O objetivo desse trabalho foi o de identificar uma metodologia adequada para a estimativa dos impactos de variabilidade climática inter-anual e mudanças climáticas sobre a recarga difusa de bacias hidrográficas em áreas com limitação de dados hidrogeológicos. Para ilustrar o procedimento, o mesmo foi aplicado à bacia do Rio das Fêmeas (BA). A recarga da água subterrânea no período entre 1977 e 2006 foi estimada pelo método automático de deslocamento da curva de recessão de hidrógrafas, e os resultados foram satisfatórios quando comparados com outros estudos hidrogeológicos. Embora a temperatura anual e a precipitação da bacia apresentaram significativos aumentos e reduções no período estudado, respectivamente, a recarga calculada foi pouco afetada no período. Uma relação empírica obtida entre a precipitação mensal na bacia e a recarga mensal foi usada para estimar a recarga nos cenários futuros, usando previsões regionalizadas do modelo ETA. Embora as reduções esperadas de precipitação anual para o período 2070-2100 serem de 30% e 34% para os cenários B2 e A2 do IPCC, respectivamente, a recarga anual seria reduzida apenas entre 7 e 8%. Esta atenuação já havia sido reportada na literatura.

Palavras-chave: Água subterrânea, recarga, mudanças climáticas.

Abstract - Although many aquifers and basins of tropical regions are being affected by climate variability and climate change impacts, the limited climate and hydrogeologic information in those areas hinder application of groundwater models and the estimation of groundwater recharge under future scenarios. The objective of this work was to identify a suitable methodology for the estimation of the impacts of interannual climate variability and climate change on diffuse groundwater recharge in basins where detailed climate and hydrogeological information is lacking. In order to illustrate the procedure, it was applied to the Femeas river basin, a watershed in northeastern Brazil. Groundwater recharge in the period between 1977 and 2006 was estimated by an automated hydrograph recession-curve-displacement method, and the results compared well with those of other studies. Although yearly temperature and precipitation presented statistically significant increasing and decreasing trends in the period 1977-2006, respectively, groundwater recharge time series was considered stationary. An empirical relationship obtained between observed monthly precipitation and monthly recharge was used to estimate groundwater recharge in future scenarios, using downscaled ETA model outputs. Though the expected reductions in the basin annual rainfall were 30% and 34% in 2080 (B2 and A2 scenarios, respectively), annual

¹ Depto. de Eng. Florestal, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília-UnB. C.P. 04357, Brasília-DF 70.910-900. Telefax: (61) 3307-1433. E-mail: hchaves@unb.br

groundwater recharge would be reduced by only 7 and 8%. A similar attenuation has been reported in the literature.

Key-words: Groundwater, recharge, climate change.

1. INTRODUÇÃO

A recarga é um fator limitante para o uso sustentável da água subterrânea. Em curto prazo, a recarga pode ser afetada por variabilidades climáticas e, em longo prazo, por mudanças climáticas (Doll & Fiedler, 2008).

A estimativa da recarga da água subterrânea em aquíferos de regiões tropicais é um desafio, particularmente quando há escassez de dados hidrogeológicos. Entretanto, a recarga pode ser indiretamente calculada através de registros fluviométricos, usando-se métodos como o do escoamento de base (Arnold et al., 1995) ou do deslocamento da curva de recessão de hidrógrafas (Rutledge & Daniel, 1994). Pimentel et al. (1999), usando um método de separação de hidrogramas, encontrou uma recarga média de 250 mm ano⁻¹ para o aquífero Urucuia, no rio das Fêmeas.

A variabilidade climática afeta a recarga através da redução de volumes de precipitação, redução da frequência e volume de eventos intensos, aumento de temperatura ou uma combinação desses. Embora os aquíferos sejam sensíveis a mudanças na recarga, poucos trabalhos analisaram os impactos das mudanças climáticas em aquíferos (Sophocleous, 2004).

Avaliando o impacto das mudanças climáticas, relativas aos cenários A2 e B2 do IPCC, sobre a recarga dos aquíferos de regiões semi-áridas do mundo, Doll & Florke (2005) concluíram que uma redução média de 4,2% na precipitação anual causaria uma redução de 1,8% na recarga dos aquíferos em 2050.

Entretanto, de forma a se obter resultados consistentes de recarga de água subterrânea em cenários futuros, a informação climática produzida por modelos de circulação global (GCMs) deve ser regionalizada ao nível das bacias ou aquíferos de interesse, pois a resolução daqueles modelos é muito grosseira e porque seus resultados são pouco confiáveis em malhas mais finas (Wilby et al., 1999).

Os objetivos desse trabalho foram identificar eventuais variabilidades climáticas ocorridas nos últimos 30 anos na bacia do rio das Fêmeas (BA), bem como potenciais mudanças climáticas em função de futuros cenários de emissões de gases de efeito estufa, e identificar eventuais impactos da variabilidade / mudança climática sobre a recarga da água subterrânea na bacia, usando uma metodologia que permitisse a utilização dos limitados dados hidrológicos disponíveis.

2. METODOLOGIA

2.1 - Identificação da Variabilidade Climática e de Potenciais Mudanças Climáticas na Bacia

2.1.1 – Avaliação da Variabilidade Temporal da Precipitação, Temperatura e da Recarga de Água Subterrânea na Bacia de Estudo

A primeira etapa do trabalho foi a estimativa da variabilidade temporal da precipitação (P) e da temperatura (T) na bacia do rio das Fêmeas. A variabilidade climática foi avaliada através de análises estatísticas e gráficas, a partir das séries temporais de P e T, buscando-se a identificar a presença de tendências (*trends*) ou saltos (*shifts*) nas séries. No caso de valores apresentando aumentos ou reduções lineares, uma tendência linear simples em uma série anual y_t ($t = 1, \dots, N$) é expressa por:

$$y_t = a + b t \quad (1)$$

Onde: y_t são os valores da série; e a e b são parâmetros do modelo de regressão linear. Rejeitar a hipótese que $b = 0$ significa que há uma tendência linear na série (Salas, 1992). A hipótese que $b = 0$ é rejeitada se:

$$T_s = \left| \frac{r \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}} \right| > T_{1-\frac{\alpha}{2}, \nu} \quad (2)$$

Onde: r é o coeficiente de correlação entre as sequências y_t e os anos $1, \dots, N$ da série; e $T_{1-\alpha/2}$ é o valor tabelado da distribuição de Student; e ν é o quantil $1 - \alpha/2$ da distribuição com $\nu = N - 2$ graus de liberdade.

Para o teste da existência de saltos nas séries temporais, elas são divididas em duas sub-séries com tamanho N_1 e N_2 ($N_1 + N_2 = N$), com médias μ_1 e μ_2 , e desvios-padrão s_1 e s_2 , respectivamente. A hipótese $\mu_1 = \mu_2$ é rejeitada se $T_s > T_{1-\alpha/2}$. O teste T_s para saltos na série é dado por (Salas, 1992):

$$T_s = \frac{|\bar{y}_1 - \bar{y}_2|}{S \sqrt{\left[\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right]}} \quad (3)$$

O desvio-padrão conjunto (S) na equação (3) é dado pela seguinte equação:

$$S = \sqrt{\frac{(N_1-1)s_1^2 + (N_2-1)s_2^2}{N-2}} \quad (4)$$

As séries anuais de precipitação, temperatura e recarga (médias anuais) da bacia do rio das Fêmeas (N=30 anos) foram analisadas graficamente para tendências e saltos, e as equações (2) e (3) acima foram usadas para testar as hipóteses de variabilidade significativa nas séries.

2.1.2 – Identificação de Potenciais Mudanças Climáticas na Bacia do Rio das Fêmeas

A identificação de potenciais mudanças climáticas na bacia foi feita tomando-se os valores médios anuais de precipitação e temperatura observados em postos meteorológicos na bacia entre 1977 e 2006 (período-base), e comparando-os com os valores esperados para as mesmas variáveis nos cenários de A2 e B2 de emissões de gases estufa (IPCC, 2007), no período 2070-2100 (centrado em 2080). No caso da recarga da água subterrânea no período-base e futuro, ela foi calculada usando a metodologia descrita no item seguinte.

Para a estimativa das médias mensais de precipitação e temperatura nos cenários A2 e B2 em 2080, foram usados resultados do modelo regional de clima ETA (Black, 1994), que gera valores ponto-grade de P e T mensais em um *grid* de 40 x 40 km para toda a América do Sul (Marengo & Ambrizzi, 2006). Potenciais mudanças climáticas futuras foram identificadas através de análises gráficas e através do teste de *t* entre as médias anualizadas dos valores de P e T dos dois períodos/cenários. No teste, supôs-se que os coeficientes de variação das variáveis climáticas em 2080 são os mesmos das do período-base (1977-2006).

De forma a eliminar os vieses observados nos dados climáticos futuros, as predições do modelo regional ETA para as variáveis P e T mensais no período 1960-90 (linha de base) foram comparadas com os valores observados nas estações da bacia, no mesmo período (*hindcasting*). Correções lineares foram então feitas nas predições de P e T do modelo ETA, em 2080, onde os aumentos / reduções nos valores de P e T mensais corresponderam apenas ao sinal observado, retirando-s o viés.

No caso do teste de *t*, a hipótese de que as médias anuais de P e T da bacia são iguais nos dois períodos e cenários analisados é rejeitada se $t > t_{1-\alpha/2; v}$, onde $t_{1-\alpha/2; v}$ é o valor tabelado de Student para um nível de probabilidade α , e v são os graus de liberdade ($v = 2N - 2$), onde $N = 30$ anos. O estatístico *t* é dado pela seguinte equação (Salas, 1992):

$$t = \frac{|\bar{y}_1 - \bar{y}_2|}{\sqrt{\left[\frac{s_1^2}{n} + \frac{s_2^2}{m} \right]}} \quad (5)$$

Onde: y_1 e y_2 são as médias das variáveis nos períodos-base e futuro, respectivamente; s_1 e s_2 são os desvios-padrão dos períodos-base e futuro, respectivamente, e n e m são o número de anos das séries do período-base e futuro, respectivamente. No teste, supôs-se que os coeficientes de variação e número de anos das séries de P e T anual nos períodos-base e futuro seriam os mesmos.

2.2 Avaliação dos Impactos da Variabilidade Climática sobre a Recarga da Água Subterrânea

2.2.1 - Estimativa da Recarga da Água Subterrânea a partir de Registros Fluviométricos

Dentre os métodos usados na estimativa da recarga difusa da água subterrânea em bacias está o de Rorabaugh (1964), que foi automatizado por Rutledge & Daniel (1994). Este método calcula a recarga da água subterrânea a partir de cada pico da hidrógrafa, sendo a recarga anual o somatório da recarga de cada pico observado no ano.

Em função de sua simplicidade e por requerer apenas dados fluviométricos diários, o método de Rutledge & Daniel (1994) foi selecionado para o presente trabalho. Além disso, ele é mais fisicamente embasado que o método de estimativa de escoamento de base (Arnold et al., 1995). No método selecionado, a recarga da água subterrânea em um certo evento é dada por (Rorabaugh, 1964):

$$R = \frac{2(Q_2 - Q_1)K}{2,303} \quad (6)$$

Onde: R (m^3) é recarga no evento; Q_1 e Q_2 ($m^3 s^{-1}$) são os escoamentos de base em um tempo crítico extrapolado da recessão da hidrógrafa, antes e depois do pico, respectivamente; e K é o índice de recessão, dado por (Rorabaugh & Simons, 1966):

$$K = \frac{0,933 d^2 S}{T_r} \quad (7)$$

Onde: K (s^{-1}) é o índice de recessão; d (m) é a distância média entre o rio e o divisor de águas da bacia; S (adimensional) é o coeficiente de armazenamento do aquífero; T_r ($m^2 s^{-1}$) é o coeficiente de transmissividade. O tempo crítico, T_c (dias) é dado por (Rorabaugh, 1964):

$$T_c = \frac{0,2 d^2 S}{T_r} = 0,214 K \quad (8)$$

A Figura 1 abaixo apresenta graficamente o tempo crítico T_c e as outras variáveis usadas no método de Rorabaugh (1964).

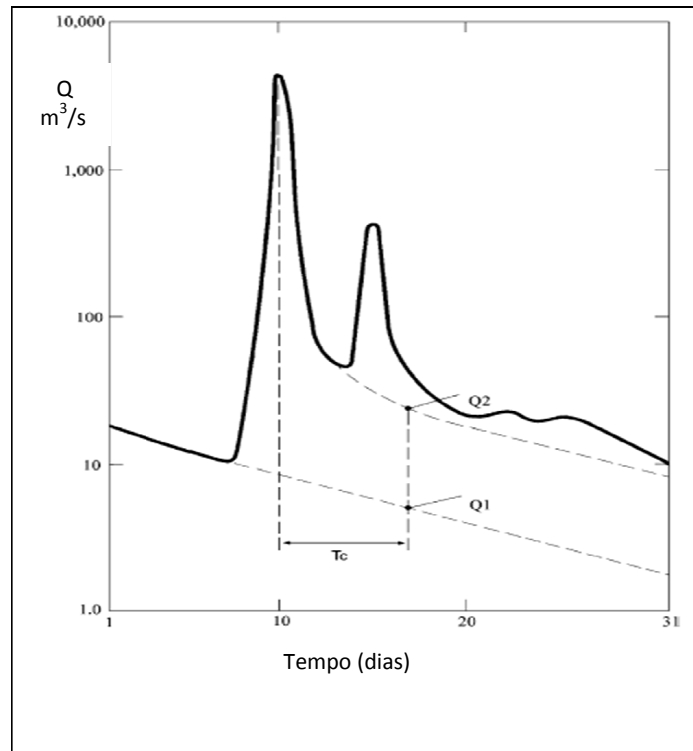


Figura 1. Hidrógrafa conceitual, mostrando as variáveis usadas no método selecionado. Modificado de Rutledge & Daniel (1994).

Uma etapa crítica no método selecionado é a extrapolação da descarga de base a partir de períodos de recessão até pontos no tempo fora dos períodos de recessão. Antes que o tempo crítico seja atingido, a seguinte equação é usada (Rutledge & Daniel, 1994).

$$dQ = \frac{C}{\sqrt{dt}} \quad (9)$$

Onde: dQ ($m^3 s^{-1}$) é a diferença entre a descarga de água subterrânea e aquela que deveria ter ocorrido no mesmo tempo se o evento de recarga não tivesse ocorrido; C é uma constante que depende da magnitude do evento de recarga, e dt (dias) é o tempo decorrido desde o evento de recarga. Depois do tempo crítico T_c , extrapolação linear é usada para o cálculo de Q (Rutledge & Daniel, 1994):

$$Q = Q_o \times 10^{-dt/K} \quad (10)$$

Onde: Q ($m^3 s^{-1}$) é a descarga de água subterrânea extrapolada para um tempo depois do tempo crítico; Q_o ($m^3 s^{-1}$) é a descarga de base extrapolada para um tempo depois do pico, conforme definido pela equação (8) e por superposição; e dt (dias) = tempo decorrido entre o tempo crítico e o dia em tela.

Dois programas computacionais desenvolvidos por Rutledge & Daniel (1994) foram usados. Na estimativa do índice de recessão K , foi usado o programa “Recess”, e para a recarga

subterrânea foi usado o programa “Rora”. Os dois programas foram aplicados aos registros de vazão diários da bacia do rio das Fêmeas no período entre 1977 e 2006 para a obtenção dos valores de K e da recarga anual.

Para fins de validação, as recargas médias anuais obtidas pelo método acima foram comparadas com as descargas de escoamento de base do rio das Fêmeas, calculadas através do seguinte filtro digital (Nathan & McMahon, 1990; Arnold & Allen, 1999):

$$q_t = \beta q_{t-1} + \left[\frac{1+\beta}{2(Q_t - Q_{t-1})} \right] \quad (11)$$

Onde: q_t ($m^3 s^{-1}$) é vazão filtrada no tempo t (1 dia); Q ($m^3 s^{-1}$) é a vazão original, e β é o parâmetro do filtro, tomado como 0,925 (Nathan & McMahon, 1995; Arnold et al., 1995). A descarga de base b_t é simplesmente

$$b_t = Q_t - q_t \quad (12)$$

2.2.2 – Avaliação dos Impactos de Mudanças Climáticas sobre a Recarga da Água Subterrânea

Buscando estimar os impactos das mudanças climáticas futuras sobre de recarga da água subterrânea na bacia, mesmo com a limitação nos dados hidrogeológicos, uma equação empírica, obtida entre os valores mensais de precipitação e de recarga calculados com a metodologia acima no período entre 1977 e 2006 ($N = 30$ anos), foi utilizada para calcular R para os cenários climáticos futuros.

Neste caso, supôs-se que a relação obtida entre P e R nos períodos base e futuro seria a mesma. Foi suposto também que não haveria mudanças significativas no uso do solo nem na evapo-transpiração da bacia no futuro.

2.3 Descrição da Bacia de Estudo

A bacia do rio das Fêmeas, usada como exemplo no presente estudo, localiza-se no noroeste do Estado da Bahia. A bacia, localizada entre os paralelos $11^{\circ}15'$ e $13^{\circ}30'$ S e os meridianos $43^{\circ}45'$ e $46^{\circ}30'$ W, tem uma área de 6.300 km^2 , uma altitude variando entre 600 e 1.000 m, topografia suave, e clima tropical sub-úmido. Latossolos profundos e bem drenados, de textura média, são o tipo de solo predominante (Nascimento et al., 2003).

A geologia dominante do aquífero é formada de arenitos profundos e porosos (grupo Urucuia), cuja espessura varia entre 80 a 150 m, sobrepostos a rochas calcárias, menos permeáveis (grupo Bambuí). As características físicas da bacia do rio das Fêmeas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características físicas da bacia do Rio das Fêmeas, incluindo a condutividade saturada do solo (K_s), a transmissividade (T_r), e capacidade de armazenamento (S) do aquífero Urucuia, densidade de drenagem (D_d) e tempo de concentração da bacia (t_c).

Área (km ²)	Classe de Solo dominante	Decliv. Média (%)	t_c ⁺ (h)	D_d (km ⁻¹)	Profund. Média aquífero (m)*	K_s (cm h ⁻¹)#	T_r (m ² d ⁻¹)*	S *
6.300	Latossolo	0,5%	30,0	0,29	50,0	15,2	1.500	2,0x10 ⁻⁴

+ Albuquerque (2009) * Nascimento et al. (2003) # Gaspar & Campos (2007).

A precipitação na bacia é concentrada no período entre outubro e abril, com uma média anual de 1.110 mm (Albuquerque, 2009). A temperatura média anual da bacia é de 24,5°C, e a evapotranspiração média anual é 1.373 mm (Mattos, 2009). Os dados climáticos usados no estudo foram as médias espacializadas das 3 estações meteorológicas existentes.

A vazão média anual no exutório da bacia é de 50 m³ s⁻¹, com pequena flutuação durante o ano, exceto por ocasião dos picos durante a estação chuvosa. O escoamento de base é o componente dominante da vazão, contribuindo com mais de 90% do escoamento total (Nascimento et al, 2003; Albuquerque, 2009).

Os tipos de uso do solo dominantes na bacia são a savana aberta, a agricultura intensiva e pastagem. A agricultura irrigada tem se tornado uma importante atividade na última década, utilizando água das fontes superficial e subterrânea. A bacia do rio das Fêmeas e os seus principais usos do solo são apresentados na Figura 2.

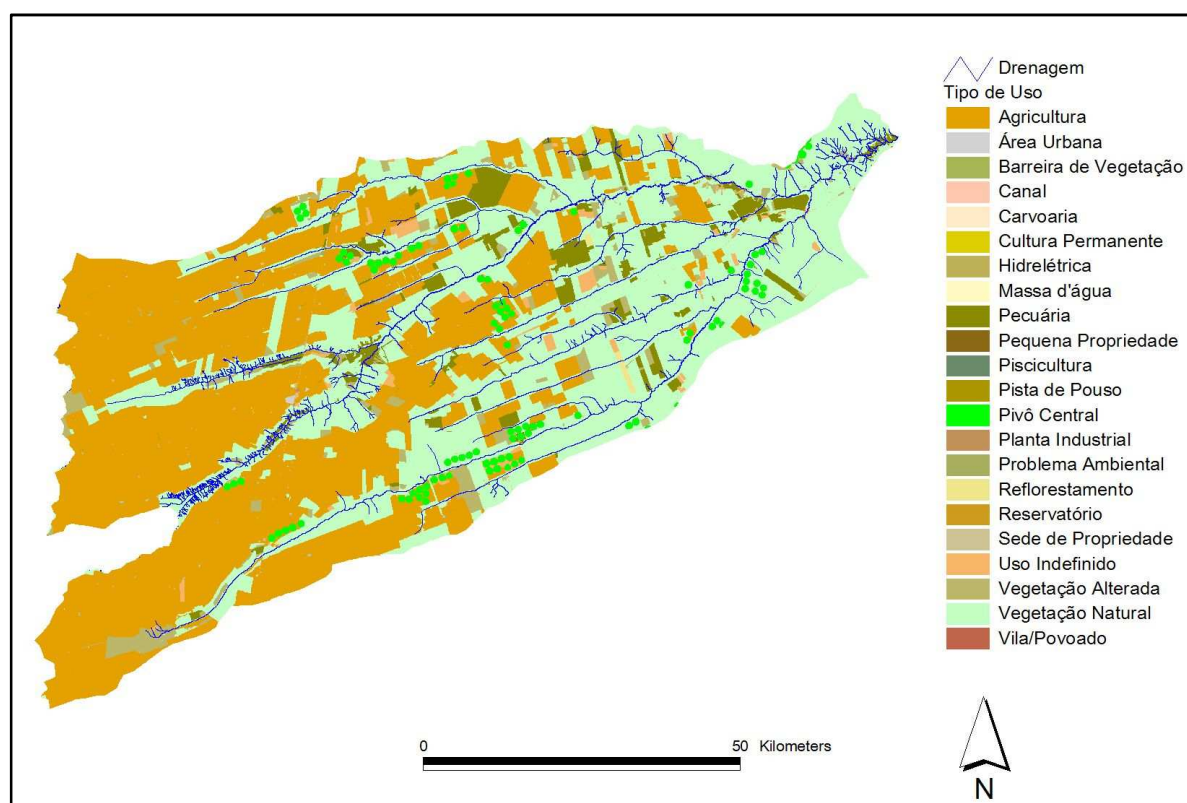


Figura 2. Bacia do rio das Fêmeas, indicando os principais tipos de uso do solo e a rede de drenagem.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Variabilidade Climática na Bacia do Rio das Fêmeas

A Figura 3 apresenta a variabilidade de precipitação e temperatura média anual para o período-base (1977-2006), na bacia do rio das Fêmeas.

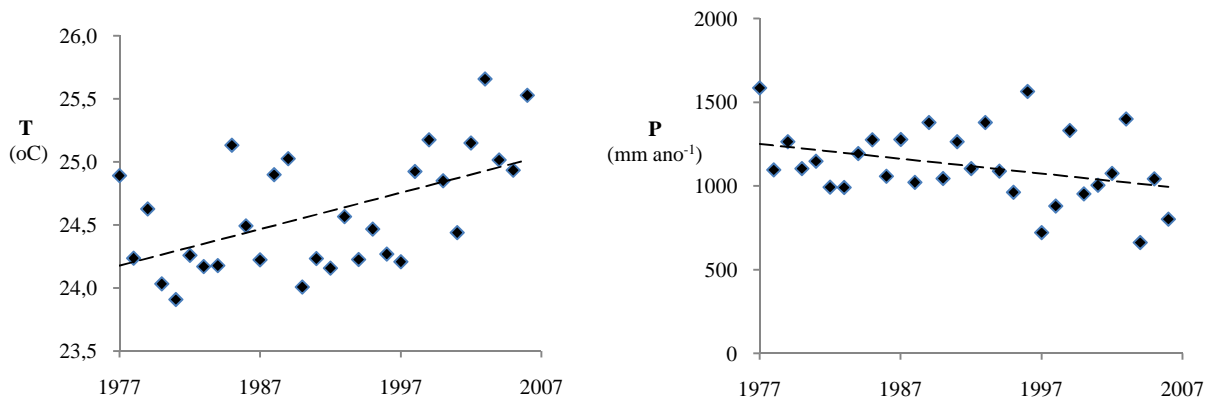


Figura 3. Variabilidade da temperatura e da precipitação anual na bacia do rio das Fêmeas, no período-base (1977 a 2006).

Observa-se na Figura 3 uma tendência linear de aumento na temperatura média anual, e uma tendência linear de redução da precipitação média anual na bacia, no período entre 1977 e 2006.

No caso da temperatura, o valor do estatístico T_s (equação 2) foi de 3,4, significativo a nível de 99% de probabilidade. No caso da precipitação, o valor de T_s foi de 1,98, significativo a nível de 95%, ambos indicando tendências significativas de variabilidade climática na bacia, no período-base.

A Figura 4 abaixo apresenta os valores de temperatura e precipitação mensal médios, nos períodos base (1977-2006), e futuro (2070-2100, centrado em 2080), este último para os cenários A2 e B2 do IPCC.

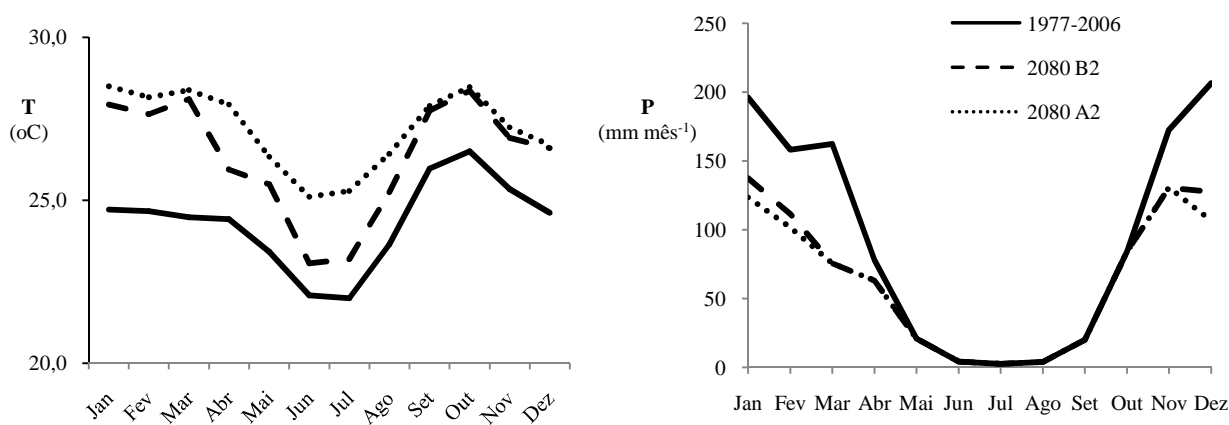


Figura 4. Temperatura e precipitação mensal média na bacia do rio das Fêmeas, observados no período entre 1977 e 2006, e valores esperados para 2080 (cenários A2 e B2 do IPCC).

A Figura 4 mostra que haveria um aumento significativo na temperatura média mensal entre o período atual e 2080, particularmente no cenário pessimista de emissões (A2). Pela mesma Figura, observa-se que haveria uma redução significativa na precipitação mensal na bacia entre o período-base e 2080, principalmente durante o período chuvoso.

A Tabela 2 abaixo apresenta as médias e desvios-padrão da precipitação e da temperatura anual para a bacia de estudo, nos período-base e nos cenários futuros, bem como os resultados dos testes de t (equação 5) entre as médias dos dois períodos estudados.

Tabela 2. Médias (E []), desvios-padrão (s []), valores do teste de t e a significância (%) dos valores de precipitação (P) e temperatura média (T) anual da bacia do rio das Fêmeas, entre o período-base e os cenários climáticos futuros.

Período/ Cenário	E [P] (mm)	s [P] (mm)	t (eq. 5)	Signific.	E [T] (°C)	s[T] (°C)	t (eq. 5)	Signific.
1977-2006	1.109,9	230,8	-	-	24,3	0,47	-	-
2080 B2	781,7	162,6	6,37	99%	26,4	0,51	16,3	99%
2080 A2	736,7	153,2	7,38	99%	27,2	0,53	22,4	99%

De acordo com a Tabela 2, as médias de P e T anual para a bacia do rio das Fêmeas no período-base diferem significativamente (em nível de 99% de probabilidade) das médias de P e T esperadas para o ano de 2080, em ambos os cenários A2 e B2.

Em termos de precipitação média anual, haveria em 2080 uma redução de 29,6% e 33,5% para os cenários B2 e A2, respectivamente. Já em termos de temperatura média anual, os aumentos seriam de 2,1°C e 2,9 °C para os cenários B2 e A2, respectivamente.

3.2. Recarga da Água Subterrânea no Período-Base (1977-2006) e sua Variabilidade

Os valores obtidos para o índice de recessão K e para o tempo crítico para a bacia, através do programa “Recess” (eqs. 7 e 8), e usados para o cálculo da recarga, foram 121,1 e 25,9 dias, respectivamente. Os valores médios mensais da precipitação e recarga difusa da água subterrânea da bacia no período-base, calculados pelo programa “Rora” (eq. 6), são apresentados na Tabela 3, juntamente com os valores médios de precipitação mensal.

Tabela 3. Precipitação (P) e recarga (R)* médias para o período entre 1977 e 2006, com os respectivos desvios-padrão (s []) e coeficientes de variação (CV [%]).

Mês	P (mm)	s [P] (mm)	CV [P] (%)	R* (mm)	s [R] (mm)	CV [R] (%)
Jan	196,1	122,2	62,3	31,9	16,9	52,9
Fev	158,3	83,4	52,7	25,0	18,0	71,9
Mar	162,3	104,2	64,2	26,0	12,5	48,2
Abr	78,1	56,9	72,8	24,7	9,2	37,2
Mai	20,8	35,8	171,8	13,1	11,8	90,1
Jun	4,3	10,9	256,0	10,6	11,0	103,8
Jul	2,6	8,2	319,0	9,3	10,9	117,8
Ago	4,0	8,7	216,5	9,9	10,6	107,2
Set	20,1	20,0	99,6	19,9	14,5	73,0
Out	84,2	51,4	61,1	23,7	12,3	52,0
Nov	172,6	73,8	42,7	27,1	10,0	37,1
Dez	206,6	102,5	49,6	32,4	18,0	55,5
Total	1.109,9			253,5		

* Calculada com o programa “Rora” (eq. 6).

De acordo com a Tabela 3, enquanto a precipitação média na bacia foi de 1.109,9 mm ano⁻¹ no período 1977-2006, a recarga média anual da água subterrânea foi de 253,5 mm ano⁻¹ (correspondendo a 22,8% de P). Os menores coeficientes de variação de R indicam que a variabilidade do processo de recarga é atenuada em relação à variabilidade de P. A pequena variabilidade das vazões mensais e anuais na bacia resulta dessa atenuação.

O valor médio do escoamento de base (descarga) estimado pelo filtro digital (eqs. 11 e 12) no período-base na bacia foi de 263,7 mm ano⁻¹, indicando que o valor da Tabela 2 é consistente. Além disso, Pimentel et al. (1999) e Schuster et al. (2002) obtiveram um valor muito próximo (250 mm ano⁻¹) para a descarga (escoamento de base) na bacia do rio das Fêmeas.

A Figura 5 apresenta a variabilidade da recarga anual da água subterrânea, calculada pelo programa “Rora”, a partir das recessões das hidrógrafas na bacia do rio das Fêmeas, no período-base (1977-2006).

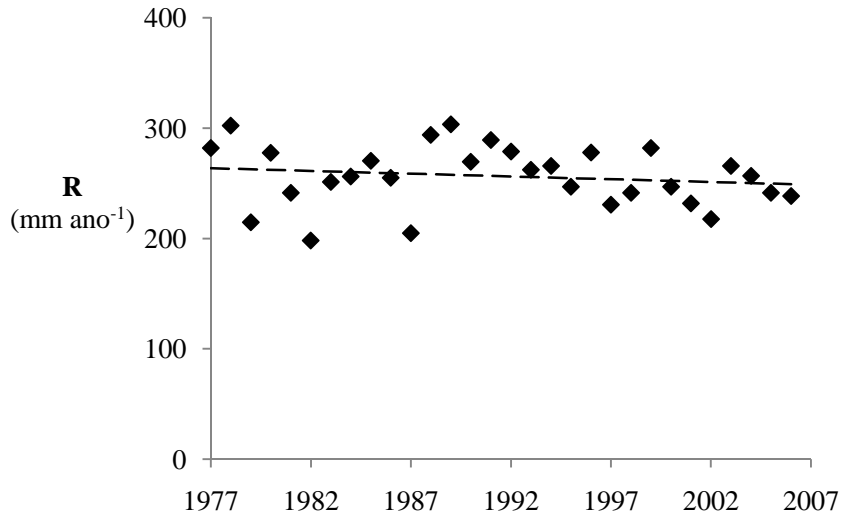


Figura 5. Variabilidade da recarga anual na bacia do rio das Fêmeas, no período-base (1977-2006).

Pela Figura 5, observa-se que a série temporal da recarga da água subterrânea na bacia é praticamente estacionária. O valor de T_c (eq. 2) obtido para a recarga foi de apenas 0,85 (não significativo), confirmando a não-estacionariedade da série.

A partir dos valores de P e R mensais médios, obtidos no período-base na bacia (Tabela 3), que representam médias de 30 anos, obteve-se uma relação empírica, que é apresentada na Figura 6.

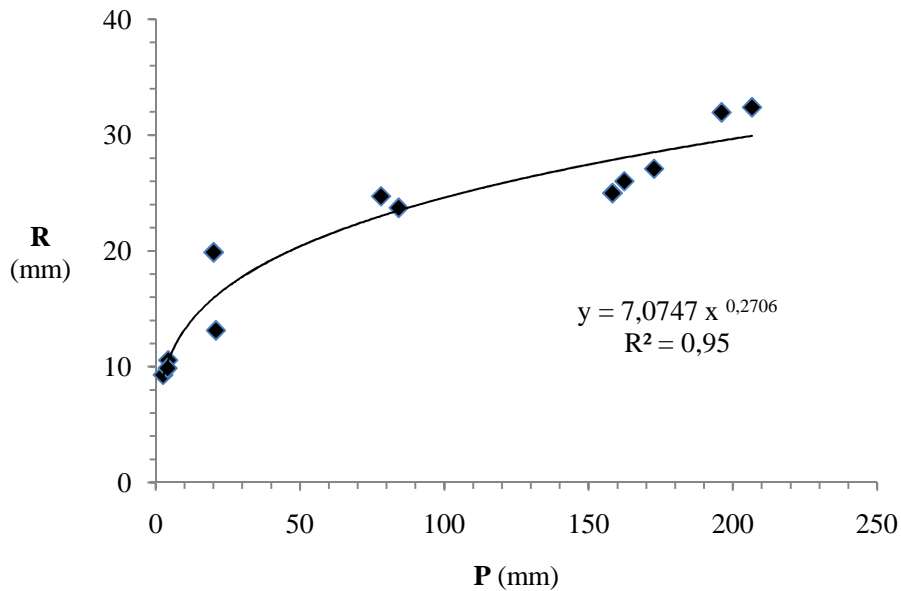


Figura 6. Relação entre P mensal e R mensal (médias) na bacia do rio das Fêmeas, no período-base (N= 30 anos).

A Figura 6 mostra que a relação empírica obtida entre P anual e R anual na bacia resultou em um bom ajuste ($R^2=0,95$), ao contrário da baixa correlação entre os valores médios anuais ($R^2=0,14$). Uma possível explicação para isso é a natureza sazonal da precipitação e da recarga, onde as variabilidades das duas variáveis são reduzidas.

3.3 Recarga da Água Subterrânea nos Cenários Climáticos Futuros

A partir da relação empírica obtida entre P e R mensal (Figura 6), e da precipitação média mensal prevista para os cenários A2 e B2 em 2080 (Figura 4), foram calculados os valores de recarga mensal médios para os cenários futuros. Neste caso, se supôs que a relação da Figura 6 permaneceria a mesma. A Figura 7 apresenta os valores esperados de recarga para os cenários climáticos futuros, bem como a recarga ocorrida no período-base (1977-2006), calculados através da relação empírica entre P e R.

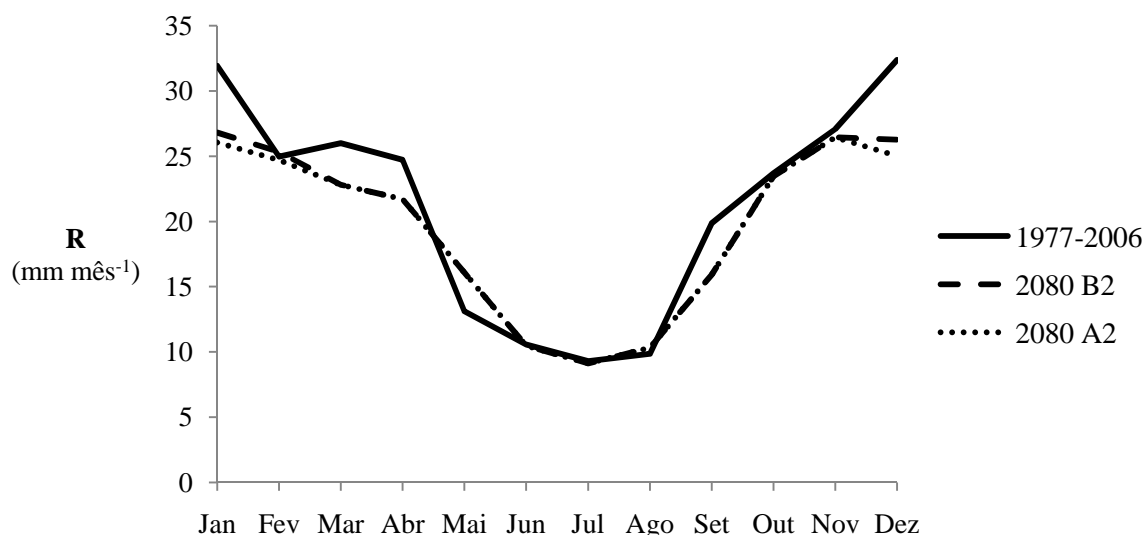


Figura 7. Valores de recarga mensal média da água subterrânea na bacia do rio das Fêmeas no período-base e nos cenários climáticos futuros.

De acordo com a Figura 7, haveria uma ligeira redução da recarga mensal na bacia do rio das Fêmeas nos cenários climáticos futuros, em relação ao período-base. Em termos anuais, a recarga média passaria de 253,5 mm no período-base para 234,8 mm no cenário B2 (7,4% de redução), e para 232,1 mm (8,4% de redução) no cenário A2, ambos em 2080.

A Tabela 4 apresenta os valores anualizados da recarga média mensal no período-base e nos cenários climáticos futuros, bem como o teste de t realizado com as médias anuais. No teste de t, supôs-se que os coeficientes de variação da recarga anual dos cenários climáticos futuros seriam os mesmos que o observado no período-base, ou seja, $CV[R] = 10,7\%$.

Tabela 4. Médias ($E [R]$), desvios-padrão ($s [R]$), valores do teste de t e a significância (%) entre as médias da recarga anual do período atual e cenários futuros da bacia do rio das Fêmeas.

Período/ Cenário	E [R] (mm)	s [R] (mm)	t (eq. 5)	Significância
1977-2006	253,5	27,4	-	-
2080 B2	234,8	25,1	2,76	99%
2080 A2	232,1	24,8	3,16	99%

Conforme indica a Tabela 4, apesar de serem pequenas as diferenças entre os valores de recarga anual nos cenários climáticos futuros e aqueles do período-base, elas são estatisticamente significativas a 99% de probabilidade. Considerando-se, entretanto, as diferenças observadas para os volumes de precipitação anual (Tabela 2), as reduções na recarga da água subterrânea seriam cerca de 3 vezes menores.

Uma relação semelhante à acima (3:1) foi obtida por Doll & Florke (2005), como uma média para diversas regiões semi-áridas do mundo, ou seja, uma redução esperada (média) de 4,2% na precipitação anual em 2050 causaria uma redução de apenas 1,8% na recarga de seus aquíferos.

A razão pela qual a recarga anual sofreu pequena variabilidade no período-base pode ter sido o fato de ela depender mais de eventos individuais (extremos) do que dos volumes precipitados mensais ou anuais (Sphocleous, 2004). A Tabela 5 indica que os dias com precipitação de volumes significativos foram a minoria dos eventos chuvosos na bacia, no período-base.

Tabela 5. Número de dias chuvosos (média anual), número de dias de eventos extremos e sua respectiva porcentagem, observados na bacia do rio das Fêmeas, no período-base (1977-2006).

Variável	No. dias	% do Total
Média de dias chuvosos no ano	73,6	100,0
No. de dias com $P > 10$ mm	32,1	43,6
No. de dias com $P > 25$ mm	12,9	17,5
No. de dias com $P > 50$ mm	3,2	4,3

Mesmo com o significativo aumento esperado para a temperatura média na bacia estudada nos cenários futuros (Figura 4), a evapo-transpiração potencial anual seria pouco afetada, em relação aos valores atuais. A Figura 8 abaixo apresenta os valores de ET_0 , calculados através da equação de Hargreaves & Samani (1985) para a bacia do rio das Fêmeas, no período-base e nos cenários climáticos futuros.

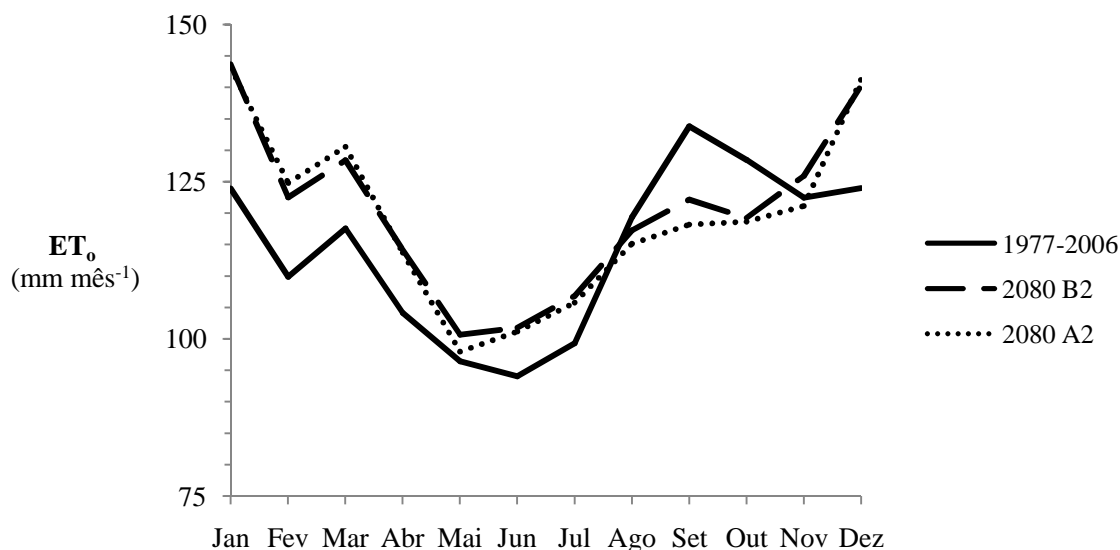


Figura 8. Evapo-transpiração potencial na bacia do rio das Fêmeas, no período-base e nos cenários climáticos futuros.

De acordo com a Figura 8, maiores valores de ET_0 nos primeiros meses do ano seriam parcialmente compensados por uma redução de ET_0 no 2º. semestre. Em termos anuais, as diferenças entre os valores de evapo-transpiração do período-base e os dos cenários futuros seriam inferiores a 5%, o que não afetaria significativamente a recarga naqueles cenários.

4. CONCLUSÕES

As principais conclusões do presente trabalho foram as seguintes:

- A recarga média da água subterrânea na bacia do rio das Fêmeas, calculada através de um método que utiliza dados fluviométricos, foi de $253,5 \text{ mm ano}^{-1}$, representando 22,8% da precipitação média anual na bacia. Resultados semelhantes de recarga são encontrados na literatura;
- Nos últimos 30 anos, houve uma tendência significativa de aumento na temperatura média da bacia, e uma tendência significativa de redução na precipitação média anual. Apesar disso, a recarga da água subterrânea apresentou uma pequena variação no período, indicando um importante potencial de atenuação de variabilidades climáticas;
- Considerando-se os cenários futuros de emissões de gases estufa, haveria em 2080 na bacia uma redução de 29,6% e 33,5% na precipitação média anual e um aumento na temperatura média anual de $2,1^\circ\text{C}$ e $2,9^\circ\text{C}$, para os cenários B2 e A2 do IPCC, respectivamente, em relação ao período-base (1977-2006). Apesar dessas significativas variações em P e T, a redução esperada para a recarga anual na bacia em 2080 seria de apenas 8,4% e 7,4% para os cenários A2 e B2, respectivamente;

- A evapo-transpiração potencial sofreria uma pequena variação (+5%) nos cenários climáticos futuros, em relação ao período-base, tendo assim pequena influência sobre a recarga futura;
- A facilidade de aplicação do método utilizado e a necessidade de poucos dados hidrológicos permite sua utilização em outras bacias e aquíferos onde as informações hidrogeológicas são escassas, como em regiões de nova fronteira agrícola.

5. REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A.C.L.S. 2009. Estimativa da recarga da bacia do rio das Fêmeas através de métodos manuais e automáticos. Dissertação de mestrado. EFL-FT-UnB, 101p.
- ARNOLD, J.G. & ALLEN, P.M. 1989. Automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from streamflow records. *J. Am. Water Res. Assoc.* 35(2):411-424.
- ARNOLD, J.G., ALLEN, P.M, MUTTIAH, R., & BERNHARDT, G. 1995. Automated base flow separation and recession analysis techniques. *Groundwater* 33(6):1110-1117.
- BLACK, T. L. 1994. The new NMC mesoscale ETA model: Description and forecast examples. *Weather and Forecasting*, 9:265-278.
- DOLL, P. & FIEDLER, K. 2008. Global-scale modeling of groundwater recharge. *Hydrol. Earth Sci.* 12, 863-885.
- DOLL, P. & FLORKE, M. 2005. Global-scale estimation of diffuse groundwater recharge: Model tuning to local data for semi-arid and arid regions and assessment of climate change impact. Frankfurt Hydrol. Paper, Un. Frankfurt at Main, 26 p.
- GASPAR, M.T.P & CAMPOS, J.E.G. 2007. The Urucua aquifer system. *Rev. Bras. Geosciencias*. 37:216-226 (in Portuguese).
- HARGREAVES, G.H. & SAMANI, Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Transactions of the ASAE* 1(2):96-99.
- HOLMAN, I.P. 2006. Climate change impacts on groundwater recharge-uncertainty, shortcomings, and the way forward? *Hydrogeology J.* 14:637-647.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007 – Synthesis Report*. Geneva, 74 p.
- MARENGO J. & AMBRIZZI, T. 2006. Use of regional climate models in impacts assessments and adaptations studies from continental to regional and local scales: The CREAS (Regional Climate Change Scenarios for South America) initiative in South America. *Proceedings of 8 ICSHMO, Foz do Iguaçu, Brazil*, pp 291-296.
- MATTOS, I. 2009. Estimativa da mudança climática na bacia do rio das Fêmeas através da regionalização de dados de modelos GCM. Dissertação de mestrado. Depto. de Agronomia-FAV-UnB, 2009, 90 p.
- NASCIMENTO, K.R.F. 2003. Conjunctive use of the surface and groundwater resources of the Femeas river basin. *Integrated management project of the activities developed in the Sao Francisco Basin. ANA/GEF/PNUMA/OEA*. Salvador, Brazil, 42 p. 2003.
- NATHAN, R.J. & MCMAHON, T.A. 1990. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession flow analyses. *Water Res. Research* 26(7):1465-1473.
- PIMENTEL, A. L.; AQUINO, R. F.; SILVA, R. C. A. & VIEIRA, C. M .B. (1999). Estimativa da recarga do aquífero Urucua na sub-bacia do rio das Fêmeas- Oeste da Bahia, utilizando a

separação de hidrogramas. 1º Congresso sobre Aproveitamento e Gestão de Recursos Hídricos em Países de Língua Portuguesa-ABES, Rio de Janeiro.

RORABAUGH, M.I. 1964. Estimating changes in bank storage and groundwater contribution to streamflow. *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Pub.* 63, p. 432-441.

RUTLEDGE, A.T. & DANIEL, C.C. 1994. Testing an automated method to estimate groundwater recharge from streamflow records. *Groundwater* 32(2):180-189.

SALAS, J. 1992. Analysis and modeling of hydrologic time series. In D. Maidment (ed.): *Handbook of Hydrology.*, McGraw-Hill, N. York, p. 19.1-19.72.

SCHUSTER, H.D.M., SILVA, F.F., TEIXEIRA, S.S., BATISTA, L.G.H., & FREITAS, W.A. 2002. Hydrogeologic studies of the Urucuia aquifer for groundwater licensing. *Proc. Braz. Groundwater Meeting*, 12 p.

SOPHOCLEOUS, M. 2004. Climate Change: Why Should Water Professionals Care? *Groundwater* 42(5):637.

WILBY, R.L., HAY, L.E. & LEAVESLEY, G.H. 1999. A comparison of downscaled and raw GCM output: implications for climate change scenarios in the San Juan River Basin, Colorado. *J. Hydrol.* 225, 67-91.

Agradecimentos:

Os autores agradecem o apoio financeiro do Projeto WPA-II/Unesco, e a gentileza da cessão dos dados climáticos regionalizados pelo Comitê Brasileiro de Mudanças Climáticas/MCT e CPTEC-INPE.