

IMPACTO DA CAPTAÇÃO D' ÁGUA NUM LAGO: O CASO DA LAGOA DO BONFIM, RN - BRASIL

**Roberto Pereira¹; João Abner Guimarães Junior²; Gerson Cardoso da Silva Junior³
& Arthur Mattos⁴**

Resumo - O presente estudo compreende o desenvolvimento de um modelo computacional de balanço hídrico para simular o comportamento de um Lago submetido a diferentes vazões de captação d'água, possibilitando a avaliação dos impactos efetivos associados ao processo de esvaziamento do reservatório. A metodologia desenvolvida foi aplicada à questão da avaliação dos impactos provocados pelo Sistema Adutor Trairí, na Lagoa do Bonfim, maior reservatório do Estado do Rio Grande do Norte. O modelo computacional foi desenvolvido em duas etapas: 1) determinação dos saldos de fluxo, o qual engloba os fluxos subterrâneos de entrada e saída da lagoa e outros consumos antrópicos (exceto o bombeamento da adutora) de difícil determinação direta, simplificando a abordagem do problema; 2) cálculo dos rebaixamentos na lagoa associados com um determinado regime de vazões bombeadas. Os resultados mostraram que o volume captado para a Adutora foi responsável por 48% do rebaixamento do nível d'água na Lagoa do Bonfim no período de bombeamento, que foi de 1,17 m. O impacto seria muito maior se a vazão utilizada fosse, neste período, a prevista para o final do plano, o que implicaria num rebaixamento de 1,913 m, correspondendo a aumento de 71,3% em relação ao rebaixamento observado.

Palavras-chave - Lago, Impacto ambiental

¹ CEFET-RN, Fone (0xx84) 215.2636, Fax (0xx184) 221.4005, E-mail: bobdudu@digicom.br, Natal –RN, Brasil.

² UFRN/LARHISA/CT, Fone (0xx84) 215.3775, Fax (0xx84) 215.3703, E-mail: abner@ct.ufrn.br, Natal-RN, Brasil.

³ I. GEOCIÊNCIAS-UFRJ, I. do Fundão – Rio de Janeiro, CEP: 21.949-900. Fone/Fax: (0xx21) 590.8091, E-mail: Gerson@acd.ufrj.br, Rio de Janeiro-RJ, Brasil

⁴ UFRN/LARHISA/CT, Fone (0xx84) 215.3775, Fax (0xx84) 215.3703, E-mail: armattos@ct.ufrn.br, Natal-RN, Brasil.

INTRODUÇÃO

O presente estudo compreende o desenvolvimento de um modelo computacional de balanço hídrico para simular o comportamento de um Lago submetido a diferentes vazões de captação d'água, possibilitando a avaliação dos impactos efetivos associado ao processo de esvaziamento do reservatório, o qual pode ser expresso pela redução do nível da superfície do espelho d' água.

A metodologia desenvolvida foi aplicada à questão da avaliação dos impactos provocados pelo Sistema Adutor Trairí, denominado de Adutora Monsenhor Expedito, na Lagoa do Bonfim, ponto de captação do sistema.

A Lagoa do Bonfim, com uma área do espelho d'água de 9 km² e uma capacidade de acumulação de 83 milhões de m³, é o maior reservatório da região litorânea oriental do Estado do Rio Grande do Norte. Esta região possui seguintes características hidrometeorológicas: clima tropical úmido (As' na escala Köpper), pluviometria média (superior a 1.000 mm ocorrendo principalmente no período outono-inverno) e hidrografia pobre formada por rios perenes de pequeno porte.

A Lagoa do Bonfim integra um sistema lacustre formado por seis lagoas, sendo as outras cinco (Redonda, Urubu, Boa Água, Ferreira Grande e Carcará) menores, conectado pelo aquífero livre que é composto por rochas areno-argilosas da Formação Barreiras associadas com uma cobertura arenosa eólica, datadas, respectivamente do Terciário e Quaternário (Pereira et alii, 1996).

A Adutora Monsenhor Expedito, com 315 Km de extensão, abastece 20 municípios das regiões Trairi e Potengi do Estado do Rio Grande do Norte - Brasil. A primeira etapa do projeto encontra-se em funcionamento, com uma vazão de cerca de 240 L/s. No final do plano, no horizonte de projeto no ano 2016, a vazão deverá ser elevada para 430 L/s beneficiando uma população de 222.336 habitantes

O sistema adutor tem bombeado diretamente da Lagoa do Bonfim desde do início do funcionamento, em 01/08/98, até os dias atuais. Apesar de uma ligeira recuperação nos períodos chuvosos, a Lagoa do Bonfim tem sofrido rebaixamentos expressivos decorrentes da captação da adutora e do déficit hídrico que a região tem atravessado no período, indicando um quadro de possível comprometimento da disponibilidade hídrica local e das condições ambientais da área.

BALANÇO HÍDRICO DE LAGOS

O balanço hídrico é um modelo conceitual de avaliação quantitativa dos recursos hídricos de uma região, relacionando os processos intervenientes no ciclo hidrológico (UNESCO, 1981).

Analicamente, o balanço hídrico é expresso pela equação (1) diferencial geral da continuidade (Villela & Mattos, 1975), baseada no princípio da conservação da massa de um sistema aplicado a um volume de controle, relacionando a taxa de variação do armazenamento interno com o saldo de fluxo externo no volume de controle.

$$I - O = \frac{dS}{dt} \quad (1)$$

Onde: I (*input*) e O (*output*) são os totais de fluxos que entram e saem no volume de controle e ds/dt é a taxa de variação do armazenamento interno no volume de controle.

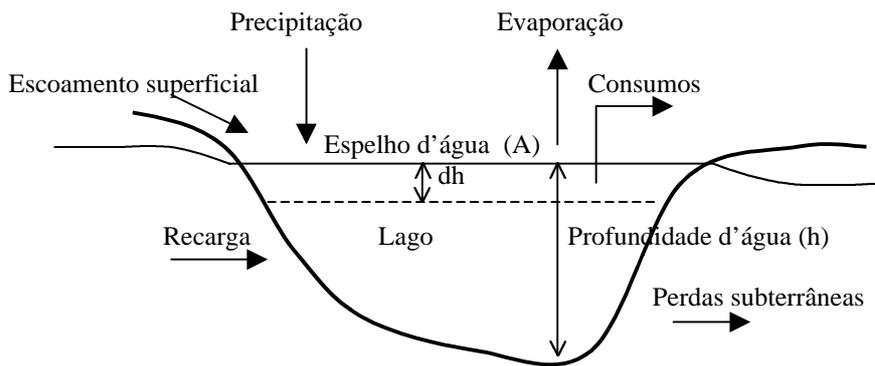


Figura 1 - Volume de controle do balanço hídrico de um lago

Na equação (2) geral do balanço hídrico de um lago os fluxos de entrada (I) compreendem: o escoamento superficial (Q_{escoa}), a recarga subterrânea do aquífero ($Q_{recarga}$) e as precipitações pluviais (P) sobre a área do espelho d'água (A). Os fluxos de saída (O) são constituídos pela perda d'água por evaporação no espelho, determinada pelo produto da taxa de evaporação (E) pela área do espelho d'água (A); as perdas subterrâneas do Lago (Q_{perdas}) e os consumo d'água ($Q_{consumos}$). A taxa de variação do armazenamento (ds/dt), em cada instante, pode ser avaliada pelo produto da área do espelho d'água (A) pela taxa de variação do nível d'água do lago (dh/dt).

$$\left(P.A + Q_{sup} + Q_{recarga} \right)_{entrada} - \left(E.A + Q_{perdas} + Q_{consumos} \right)_{saídas} = A \frac{dh}{dt} \quad (2)$$

A área do espelho (A) pode ser expressa como função da profundidade (h), conforme a equação (3).

$$A = k.h^\alpha \quad (3)$$

Onde: A é a área do espelho d'água do reservatório, em m²; h é a lâmina d'água, em m e k e α são os coeficientes da função de regressão cota-área.

Para as condições da Lagoa do Bonfim, o escoamento superficial direto pode ser desprezado, devido a não existência de uma rede de drenagem superficial direcionada para a Lagoa e o consumo d'água é expresso pela vazão bombeada pela adutora (Q_{bomba}) e outros usos relevantes (Q_{outros}), tais como a irrigação. Portanto, a equação (4) do balanço hídrico da Lagoa do Bonfim pode ser apresentada da seguinte forma:

$$\left(P.A + Q_{recarga} \right)_{entrada} - \left(E.A + Q_{perdas} + Q_{bomba} + Q_{outros} \right)_{saída} = A \cdot \frac{dh}{dt} \quad (4)$$

MODELO DE SIMULAÇÃO

Foi desenvolvido um modelo computacional de balanço hídrico mensal para simular o comportamento da Lagoa do Bonfim durante o período observado de exploração, novembro/98 até julho/99.

O modelo teve como base os saldos de fluxos do balanço hídrico considerados como independentes do bombeamento, os quais foram determinados, inicialmente, a partir dos dados observados.

Para isto, contou-se com informações diárias de variação do nível d'água da lagoa, e, principalmente, com os dados de uma estação hidrometeorológicas instalada às margens da referida lagoa, apresentando registros diários de precipitações pluviais, evaporação, velocidade e direção do vento, umidade relativa, temperatura do ar e pressão atmosférica.

ESTIMATIVA DO SALDO DE FLUXO

Os componentes do saldo de fluxo do balanço hídrico, definidos no contexto do estudo, constituem as recargas e as perdas subterrâneas da lagoa e os outros consumos antrópicos, os quais são apresentados na expressão (5).

$$Q_{saldo} = Q_{recarga} - (Q_{perda} + Q_{outras}) \quad (5)$$

Combinado-se as equações (4) e (5), tem-se:

$$Q_{saldo} = A \cdot \frac{dh}{dt} - p \cdot A + (E \cdot A + Q_{bomba}) \quad (6)$$

Discretizando-se a equação diferencial (6) pelo método das diferenças finitas, segundo um esquema progressivo no tempo, para uma área da superfície do espelho d'água média (\bar{A}), no intervalo de tempo (Dt) mensal, chega-se a seguinte expressão:

$$Q_{saldo}^t = \bar{A}(h^{t+1} - h^t - P^t + E^t) + Q_{bomba}^t \quad (7)$$

Onde: Q_{saldo}^t e Q_{bomba}^t são as vazões no mês atual (t), em m³/mês; h^t e h^{t+1} são as profundidades d'água no início do mês atual e subsequente, respectivamente, em m; P^t e E^t são, respectivamente, a precipitação pluvial e a evaporação no decorrer do mês atual, em m/mês. \bar{A} é a área média mensal do espelho d'água, em m², calculada a partir das áreas do espelho no início do mês atual e do mês subsequente.

$$\bar{A} = \frac{A^{t+1} + A^t}{2} \quad (8)$$

SIMULAÇÃO DA LAGOA DO BONFIM

O modelo de simulação determina as profundidades d'água na lagoa, no início de cada mês do período observado, a partir dos saldos de fluxo avaliados numa primeira etapa.

Substituindo-se na equação 6 a área A dada pela função (3) e desenvolvendo-se, chega-se a seguinte equação diferencial ordinária com relação à profundidade h .

$$\frac{dh}{dt} = P - E + \frac{Q_{saldo} - Q_{bomba}}{kh^a} \quad (9)$$

Onde a derivada é uma função direta da profundidade d'água.

$$\frac{dh}{dt} = f(h) \quad (10)$$

Sendo:

$$f(h) = P - E + \frac{Q_{saldo} - Q_{bomba}}{kh^a} \quad (11)$$

Onde: h é a profundidade d'água, em m; P e E são, respectivamente, a precipitação pluviométrica e a evaporação, em m/mês; Q_{saldo} e Q_{bomba} são, respectivamente, o saldo de fluxo e a vazão bombeada, em m³/mês e k e a são os coeficientes da função de regressão cota-área.

Resolvendo-se, passo a passo, a equação diferencial com o auxílio do método de Runge-Kutta de 4ª ordem, para um intervalo de tempo " Δt " mensal, chega-se:

$$h^{t+1} = h^t + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (12)$$

Sendo :

$$\begin{aligned} k_1 &= f(h^t) \\ k_2 &= f\left(h^t + \frac{k_1}{2}\right) \\ k_3 &= f\left(h^t + \frac{k_2}{2}\right) \\ k_4 &= f(h^t + k_3) \end{aligned} \quad (13)$$

Onde: h^t e h^{t+1} são, respectivamente, as profundidades d'água, no início do mês atual e subsequente, em m.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da metodologia proposta aplicada a Lagoa do Bonfim, envolvendo todos os componentes do balanço hídricos, estão apresentados em quadros a seguir. Os saldos de fluxo do balanço hídrico mensal da lagoa, para as condições reais, foram determinados com o auxílio do Quadro 1 e o Quadro 2 mostra os rebaixamentos mensais da Lagoa do Bonfim sem o efeito do bombeamento do sistema adutor.

Ainda, para avaliar a sustentabilidade hídrica da lagoa frente as demandas futuras da adutora, o modelo de simulação foi aplicado, no mesmo período estudado, para a vazão máxima de projeto no final do plano de 430 l/s ou 1.114.560 m³/mês. O Quadro 3 mostra os resultados desta simulação.

Quadro 1 – Saldo de Fluxo do balanço hídrico da Lagoa do Bonfim

Data T	Prof. h _t (m)	Volume V _t (m ³)	Área A _t (m ²)	Precipitação P mm/mês	Evaporação		Retiradas		
					E _t mm/mês	0,75xE _t mm/mês	Vazão bombeada (m ³ /mês)	Saldo de Fluxo (m ³ /mês)	Total (m ³ /mês)
01/11/98	41,769	74.551.857	8.202.451	12,4	210,1	157,6	409.595	120.079	529.674
01/12/98	41,565	72.842.258	8.052.952	19,8	231,9	173,9	450.808	457.032	907.840
01/01/99	41,306	70.707.738	7.865.269	5,7	214,5	160,9	372.949	297.247	670.196
01/02/99	41,073	68.829.952	7.699.189	97,4	199,1	149,3	431.938	100.803	532.741
01/03/99	40,955	67.899.576	7.616.555	42,8	207,1	155,3	326.238	32.547	358.785
01/04/99	40,800	66.689.434	7.508.722	138,6	201,2	150,9	693.617	- 416.892	276.725
01/05/99	40,753	66.320.554	7.475.771	234,9	149,3	112,0	568.949	- 241.528	327.421
01/06/99	40,829	66.915.352	7.528.883	102,3	160,6	120,5	539.737	- 168.004	371.733
01/07/99	40,764	66.407.381	7.483.531	43,5	189,8	142,4	666.131	- 137.320	528.811
01/08/99	40,599	65.144.417	7.370.457						
Diferença	1,170	9.407.440	Soma	697,4	1.763,6	1.322,7	4.459.962	43.964	4.503.926

Quadro 2 – Simulação operacional da Lagoa do Bonfim sem bombeamento

Data t	Prof. h _t (m)	Volume V _t (m ³)	Área A _t (m ²)	Precipitação P mm/mês	Evaporação		Retiradas		
					E _t mm/mês	0,75xE _t mm/mês	Vazão bombeada (m ³ /mês)	Saldo de Fluxo (m ³ /mês)	Total (m ³ /mês)
01/11/98	41,769	74.551.857	8.202.451	12,4	210,1	157,6		120.079	120.079
01/12/98	41,614	73.249.263	8.088.608	19,8	231,9	173,9		457.032	457.032
01/01/99	41,410	71.557.037	7.940.084	5,7	214,5	160,9		297.247	297.247
01/02/99	41,223	70.038.095	7.806.149	97,4	199,1	149,3		100.803	100.803
01/03/99	41,161	69.533.117	7.761.489	42,8	207,1	155,3		32.547	32.547
01/04/99	41,048	68.631.325	7.681.567	138,6	201,2	150,9		- 416.892	- 416.892
01/05/99	41,088	68.953.558	7.710.150	234,9	149,3	112,0		- 241.528	- 241.528
01/06/99	41,237	70.149.353	7.815.980	102,3	160,6	120,5		- 168.004	- 168.004
01/07/99	41,240	70.175.476	7.818.287	43,5	189,8	142,4		- 137.320	- 137.320
01/08/99	41,162	69.542.727	7.762.339						
Diferença	0,607	5.009.130	Soma	697,4	1.763,6	1.322,7	-	43.964	43.964

Quadro 3 – Simulação operacional da Lagoa do Bonfim para a vazão de final do plano

Data t	Prof. h_t (m)	Volume V_t (m ³)	Área A_t (m ²)	Precipitação P mm/mês	Evaporação		Retiradas		
					E_t mm/mês	$0,75 \times E_t$ mm/mês	CAERN (m ³ /mês)	Saldo de Fluxo (m ³ /mês)	Total (m ³ /mês)
01/11/98	41,769	74.551.857	8.202.451	12,4	210,1	157,6	1.114.560	120.079	1.234.639
01/12/98	41,481	72.141.756	7.991.486	19,8	231,9	173,9	1.114.560	457.032	1.571.592
01/01/99	41,139	69.357.416	7.745.934	5,7	214,5	160,9	1.114.560	297.247	1.411.807
01/02/99	40,809	66.761.556	7.515.160	97,4	199,1	149,3	1.114.560	100.803	1.215.363
01/03/99	40,601	65.159.689	7.371.827	42,8	207,1	155,3	1.114.560	32.547	1.147.107
01/04/99	40,340	63.192.669	7.194.817	138,6	201,2	150,9	1.114.560	(416.892)	697.668
01/05/99	40,234	62.406.941	7.123.793	234,9	149,3	112,0	1.114.560	(241.528)	873.032
01/06/99	40,234	62.409.616	7.124.035	102,3	160,6	120,5	1.114.560	(168.004)	946.556
01/07/99	40,087	61.334.644	7.026.565	43,5	189,8	142,4	1.114.560	(137.320)	977.240
01/08/99	39,856	59.670.325	6.874.956						
Diferença	1,913	14.881.531	Soma	697,4	1.763,6	1.322,7	10.031.040	43.964	10.075.004

Os coeficientes das funções de regressão cota-área e cota-volume, apresentados em seguida, foram determinadas a partir dos dados do levantamento batimétrico realizado por COSTA(1997).

Coeficientes da função de regressão cota-área: $A = k_1 \cdot h^\alpha$

$$k_1 = 6,466720$$

$$\alpha = 3,765459$$

$$\text{Coeficiente de correlação} = 0,988580$$

Coeficientes da função de regressão cota-volume: $V = k_2 \cdot h^\beta$

$$K_2 = 1,496567$$

$$\beta = 4,748954$$

$$\text{Coeficiente de correlação} = 0,998692$$

O Quadro 4, seguinte, apresenta uma síntese comparativa dos resultados encontrados nas diversas condições de bombeamento estudadas para a Lagoa do Bonfim.

Quadro 4 – Síntese das condições de bombeamento na Lagoa do Bonfim

Condição de bombeamento	Volume da Lagoa no final do período		Desnível m	Variação de volume m ³	Volume bombeado	
	m ³	% ¹			m ³	% ²
Sem	69.542.727	93,3	0,607	5.009.130	0	0
Real	65.144.417	87,4	1,170	9.407.440	4.459.962	47,4
Final do plano	59.670.325	80,0	1,913	14.481.531	10.031.040	69,3

¹ % relativa ao volume da lagoa no início do bombeamento (74.551.857 m³)

² % relativa a variação de volume da lagoa no período.

CONCLUSÕES

O modelo simplificou a abordagem do problema englobando no saldo de fluxo os componentes do balanço hídrico de difícil determinação direta, tais como os fluxos subterrâneos de entrada e saída da Lagoa do Bonfim e outros consumos. Entretanto, para a aplicação desta metodologia requer dados mínimos de monitoramento da pluviometria, evaporação e nível d'água.

O volume captado para a Adutora foi responsável por 48% do rebaixamento do nível d'água na Lagoa do Bonfim no período de bombeamento, que foi de 1,17 m, mostrando, portanto, que a captação é um fator muito impactante no sistema lacustre.

O impacto devido ao bombeamento seria muito maior se a vazão utilizada fosse, neste período, a prevista para o final do plano, o que implicaria num rebaixamento de 1,913 m, correspondendo a aumento de 71,3% em relação ao rebaixamento observado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte (CEFET), a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COSTA - Consultoria e Serviços Técnicos e Ambientais Ltda/SERHID - 1997. Estudos da Disponibilidade Hídrica da Lagoa do Bonfim.
- PEREIRA, R. et alii 1996. Carta Geotécnica do Município de Nísia Floresta - Rn. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA, 2, São Carlos, 1996. Boletim..., ABGE, p.233-239.

- UNESCO 1981. Methods of Computation of the Water Balance of Large Lakes and Reservoirs. Fontenoy, Paris. 122 p.
- VILLELA, S.M.; MATTOS, A. 1975. Hidrologia Aplicada. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil. 245 p.