

Um Método Paramétrico de Avaliação do Potencial de Salinização de Reservatórios Aplicado a Regiões Semi-Áridas

Francisco de Assis de Souza Filho

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
assisfilho@secrel.com.br

José Nilson B. Campos

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – UFC
nilson@funceme.br

Recebido: 02/10/02 revisado: 04/11/04 aceito: 23/06/05

RESUMO

O artigo apresenta um modelo de avaliação do potencial de salinização de águas em reservatórios superficiais do Semi-Árido brasileiro. O modelo estima a concentração de sais em reservatórios para as condições de estado de equilíbrio. As estimativas foram procedidas utilizando simulação Monte Carlo. Os reservatórios são caracterizados por parâmetros da equação do balanço hídrico na forma adimensional do método do Diagrama Triangular de Regularização. O modelo de salinização foi testado com os dados do açude Pereira de Miranda, na bacia do rio Curu no estado do Ceará. Como resultado da pesquisa construiu-se o diagrama da salinidade de reservatórios que permite estimar a concentração de sais a que tendem os reservatórios quando os mesmos são operados com uma regra fixa de retirada durante um longo período de tempo.

Palavras-chave: operação de reservatórios; salinização de reservatórios; qualidade das águas.

INTRODUÇÃO

A salinização constitui-se em um dos principais problemas da qualidade da água em reservatórios de regiões semi-áridas. Esse problema cresce em importância no Semi-Árido brasileiro onde os rios são intermitentes e de alta variabilidade intra e interanual e a taxa de evaporação atinge cerca de três vezes e meia a pluviosidade. Para conviver com esse regime climático, os nordestinos usam como estratégia manter grandes estoques de água em reservatórios superficiais, que podem ocasionar um processo de concentração de sais.

A salinização dos reservatórios está associada, direta ou indiretamente, aos dois maiores depósitos de sais encontrados na natureza, quais sejam: os oceanos, que através do transporte de aerossóis fornecem sais aos continentes; e os solos que, em função de processos geoquímicos, produzem sais que são transportados aos reservatórios através dos escoamentos superficiais e subsuperficiais.

Açudes como o Cedro, o Favelas e o Pompeu Sobrinho, no Estado do Ceará, são exemplos de reservatórios de águas de elevados teores de salinidade. Vale lembrar que em 1993, quando Fortaleza esteve próxima ao colapso no abastecimento de

água, a cidade foi abastecida por cerca de 45 dias com as águas do Pompeu Sobrinho. O alto teor de salinidade tornava a água inadequada para consumo humano.

Depois desse episódio, algumas questões voltaram à tona: Será que a salinização desses açudes foi decorrente de má operação? Será que o teor de sal das águas de seus rios formadores explicam o atual nível de salinização?

O artigo apresenta uma metodologia para estimar o potencial de salinização de reservatórios no Semi-Árido, utilizando os parâmetros da equação adimensional do balanço hídrico proposta por Campos(1986). Foram desenvolvidos diagramas que permitem estimar o potencial de salinização de reservatórios para retiradas com garantias de 80 e 90%, em função dos seguintes adimensionais: coeficiente de variação dos deflúvios anuais; fator adimensional de evaporação e fator adimensional de capacidade.

ESTUDOS ANTERIORES

A salinização do solo e da água são problemas comuns em regiões áridas e semi-áridas em todo o planeta Ghassemi et al. (1995); impactando diver-

tos centros populacionais e áreas agrícolas. Paine (2003) apresenta uma detalhada revisão bibliográfica sobre o processo de salinização. Exemplos deste fato podem ser relatados para a Austrália em Macumber (1969); Hillman (1981) e Schofield and Ruprecht (1989); no Oriente Médio, Vengosh and Ben-Zvi (1994) e Marie et al. (2001); na África em Kirchner et al. (1997) e Valenza et al. (2000); na Ásia em Smith (1992), Chen et al. (1997), Funakawa et al. (2000) e Wang et al. (2000); na América do Sul em Gilboa (1977); na América do Norte Nightingale (1974), Miller et al. (1981), Dutton et al. (1989); Hendry and Buckland (1990) Richter and Kreitler (1993); e na Índia em Prakash et al. (1983).

A salinização dos solos diminui a produtividade das plantas, aumenta o escoamento superficial, a erosão do solo e contribui para o processo de desertificação, Banin et al. (1995). A salinização da água degrada a qualidade e limita o uso na irrigação, requer tratamentos para o uso urbano e industrial, perturba o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos e a pesca, ao exigir a existência nos rios e lagos de espécies de peixes e plantas mais tolerantes à concentração mais elevada de salinidade. Umali (1993) analisa os impactos do processo de salinização associados ao processo de irrigação.

A análise da garantia de abastecimento associada a modelos de operação de reservatórios foi realizada na Bacia do rio Brazos no Texas, Estados Unidos por Wurbs et al. (1995) e Karama (1993).

No Ceará, a primeira campanha sistemática para coleta de dados de qualidade de águas em açudes foi procedida pelo Engenheiro Agrônomo do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) Antônio Sérgio Ferreira no período de 1981 a 1984. Os dados do DNOCS foram usados posteriormente em estudos de pesquisa como o de Barros (1994), Souza Filho (1997) e Franco (2000).

De acordo com os modelos teóricos existentes a concentração de sais na precipitação atmosférica decresce com a distância entre o local da precipitação e o oceano. Conway (citado por Santiago, 1984) propôs a seguinte equação para descrever as concentrações de cloretos

$$C_p = A e^{B \cdot d} \quad (1)$$

Sendo C_p a concentração de cloretos na precipitação, A e B constantes que dependem da região e d a distância entre o local da precipitação e o oceano.

Santiago (1984) utilizando os dados da bacia do Curu achou os valores de $A = 5,29 \text{ mg/l}$ e $B = 0,019 \text{ km}^{-1}$ para as constantes da equação de Conway. Pereira e Souza Filho (1997) utilizando técnicas de geoprocessamento, desenvolveram um mapa para a concentração de cloretos nas precipitações da bacia do Curu utilizando a formulação de Conway com as constantes de Santiago.

Souza Filho (1997) expandiu a parametrização da equação do balanço hídrico de Campos (1986, 1996) para o balanço de sais com vistas ao desenvolvimento de um modelo para previsão de salinização dos reservatórios do Semi-árido. O modelo foi aplicado aos reservatórios do Semi-árido e foi o precursor do modelo do presente artigo.

Uma pesquisa recente desenvolvida na Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) tratou a questão de um modo mais abrangente, para identificar as causas da salinização do açude Favelas. Para tanto, foi analisado paralelamente o comportamento do açude Trici – construído em uma região de formação geológica semelhante à do Favela. (Sales Neto, 2002)

Os autores concluíram que um conjunto de fatores contribuíram para que o Favelas atingisse o atual nível de salinidade. Primeiramente, a pequena profundidade dos solos da bacia que permitiam o encharcamento dos solos na estação úmida possibilitando a solubilidade dos sais minerais primários os quais são conduzidos ao reservatório pelos escoamentos superficiais e subsuperficiais. Dois outros fatores, comentados a seguir, foram: baixa frequência de sangria e o elevado grau de antropização da bacia hidrográfica.

Ressalte-se que o açude Trici, construído no mesmo tipo de formação que o Favelas, apresenta um grau de salinidade bem menor. Assim, os autores procuraram identificar as diferenças entre o Trici e o Favelas para identificarem outras causas de salinização desse açude. Os autores relacionaram as seguintes causas: 1) O grau de renovação das águas por sangria – enquanto a Trici sangrou duas vezes em oito anos, o Favelas sangrou apenas uma vez em onze anos.; 2) O maior grau de atividade antrópica na bacia do Favelas resultando em maior área de solo exposto e, indiretamente favorecendo a uma maior velocidade de extração de cátions e ânions dos solos. (Sales Neto, op.cit.)

Observou-se ao proceder a revisão de estudos anteriores sobre o tema que não havia disponível um método paramétrico para uma avaliação rápida do potencial de salinização dos reservatórios do semi-árido brasileiro. A metodologia apresentada

supre essa lacuna na literatura de gerenciamento de recursos hídricos.

O MODELO PARAMÉTRICO

A modelagem foi elaborada em cinco etapas, a saber:

- i. o levantamento de dados e informações com vistas ao conhecimento do processo de salinização;
- ii. a definição e formulação do problema;
- iii. a modelagem matemática;
- iv. a verificação do modelo;
- v. a aplicação e interpretação dos resultados.

O reservatório Pereira de Miranda foi selecionado como o referencial para a presente análise pelos seguintes motivos: i) disponibilidade de vários estudos anteriores apresentando dados físico-químicos; ii) existência de perfis de condutividade elétrica realizados pela FUNCEME e IBAMA que indicam que este reservatório é bastante misturado (condição usada na modelagem).

Atributos do modelo

O modelo foi desenvolvido para produzir uma nova ferramenta de análise do processo de salinização de reservatório superficial em escala de tempo de longo horizonte (500 anos). Assim utilizou-se o modelo mutuamente exclusivo proposto por Moran (1954) e modificado por Campos (1986) para as condições do Semi-Árido brasileiro. O modelo aplica-se a reservatórios bem misturados, de características polimíticas, típicos de regiões tropicais.

A análise dos dados existentes mostrou que para o balanço plurianual de sais no reservatório, as variáveis de maior significado são as massas de sais afluentes, a variação dos sais no reservatório e as retiradas de sais. As retiradas de sais podem ocorrer de forma controlada (vazão regularizada) e de forma não controlada (vertimentos). Sendo estas as variáveis que devem ser modeladas de forma mais acurada no modelo.

O modelo desenvolvido pode ser útil para subsidiar o processo de dimensionamento de reservatórios de caráter inter-anuais, associando as dimensões do mesmo à tendência de salinização. O modelo também pode ser usado para orientar a operação dos reservatórios existentes através do entendimento sistematizado do processo de salinização.

No desenvolvimento do modelo, optou-se por um equacionamento simples e de uso genérico, sem procurar descrever características específicas de algum tipo de sal. Para este fim construiu-se o modelo para íons e propriedades conservativas na faixa de domínio dos pH que ocorrem nos reservatórios. Adicionalmente, construíram-se curvas paramétricas para mostrar o comportamento de tendência da salinização dos reservatórios, bem como diagramas que descrevem e quantificam a salinização a partir de alguns parâmetros.

Estrutura do modelo

O modelo foi desenvolvido em dois módulos: o primeiro calcula o volume anual regularizado com a garantia desejada e determina os totais dos volumes regularizados, vertidos e evaporados pelo reservatório; o segundo módulo realiza o balanço de sais.

Concluída a implementação destes dois módulos calcula-se a evolução das concentrações no reservatório.

O estimador do potencial de salinização do reservatório

O potencial de salinização foi estimado em condições de longo tempo – série sintética de 500 anos. Como estimador desse potencial utilizou-se a relação entre a concentração de sais na água de sangria, no final da série simulada, e a concentração de sais nas águas do rio em condições naturais. Devido à variabilidade das concentrações de sais nos últimos anos das séries, optou-se por estimar a concentração de longo termo pela média da concentração de sais nos últimos 50 anos da simulação. Tem-se então:

$$Psr = \frac{C_{\infty}}{C_0} \quad (2)$$

sendo que C_{∞} denota a concentração média das águas, de longo termo, referida aos últimos 50 anos da simulação e C_0 denota a concentração de sais nas águas do rio em condições naturais.

A conservação da massa líquida

O balanço hídrico nos reservatórios foi realizado utilizando a metodologia do Diagrama Triangular de Regularização – DTR (Campos, 1996). O método consiste na geração de séries sintéticas de

deflúvios, seguida pela operação simulada dos reservatórios, obedecendo regras preestabelecidas. O modelo realiza o balanço hídrico anual no reservatório dividindo o ano em duas estações: uma úmida, na qual ocorre toda a afluência e vertimento; e uma seca na qual ocorre toda a retirada por regularização e evaporação.

As séries de volumes anuais afluentes aos reservatórios foram obtidas a partir da geração de séries sintéticas Markovianas de 500 anos de extensão. Utilizou-se na geração a função de probabilidade de gama de dois parâmetros.

O balanço hídrico do reservatório é descrito pela equação:

$$z_{t+1} = z_t + i_t - m - f_E \left(\frac{z_{t+1}^{2/3} + z_t^{2/3}}{2} \right) - m - s_t \quad (3)$$

onde f_E representa o fator adimensional de evaporação, z o volume acumulado adimensional (Z/μ), i o deflúvio adimensional (I/μ), m a retirada adimensional (M/μ), s a sangria adimensional (S/μ), e μ o volume médio afluente anual ao reservatório.

A operação do reservatório deve contemplar: i) a capacidade do reservatório (K) é expressa pelo fator adimensional de capacidade, denotado por f_K que é igual à razão entre a capacidade e o volume afluente médio anual. ($f_K = K/\mu$); ii) a retirada do reservatório é estimada para garantias anuais de 80 e 90%.

A conservação da massa de sais

A conservação da massa de sais, ou balanço de sais, em um reservatório pode ser descrito pela Equação 4.

$$\text{Acumulação} = \text{Carga} \pm \text{Transporte} \pm \text{Reações} \quad (4)$$

Para fins de simplificação, o modelo trabalha com os valores totais dos constituintes dissolvidos no reservatório e assim fica restrito a simular íons conservativos ou de propriedades conservativas no reservatório.

A Figura 1 apresenta esquematicamente o fluxo de entrada e saída de sais no reservatório. Supondo-se que o reservatório apresenta-se totalmente misturado, o balanço de sais pode ser representado pela Equação 5.

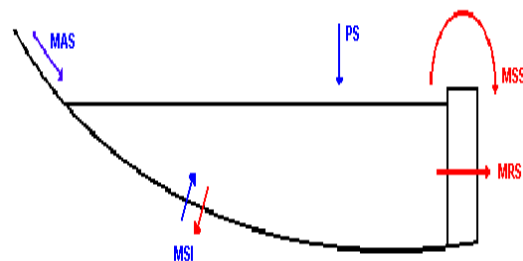


Figura 1 - Representação esquemática do balanço de sais em um reservatório

$$MSR_{t+1} = MSR_t + MAS_t - MES_t \pm MSI_t \quad (5)$$

onde MSR_{t+1} e MSR_t representam a massa de sais no reservatório nos tempos $t+1$ e t respectivamente; MAS_t denota a massa de sais afluente ao reservatório no tempo t ; MSE_t denota a massa de sais efluentes do reservatório durante o período t e MSI_t representa a troca de sais do reservatório com o lençol freático; PS denota a precipitação de sais no lago; MRS representa a massa de sais retirada do reservatório pela regularização e MSS denota a massa de sais retiradas do reservatório através do sangradouro.

A massa de sais afluente ao reservatório é composta por duas partes: a massa afluente através dos deflúvios e a massa precipitada em forma de aerossóis. Os volumes de água afluentes em forma de deflúvio são significativamente superiores aos volumes em forma de precipitação sobre o lago. Assim, na grande maioria dos casos, o analista pode desconsiderar os sais afluentes em forma de aerossóis. Ademais, caso o analista queira considerar os sais trazidos em forma de aerossóis, poderá aplicar um fator de correção na concentração de sais nos deflúvios.

Por sua vez, os sais efluem do reservatório em três partes: nas águas extravasadas pelo vertedouro (sangria); nas águas retiradas para fins utilitários (vazão regularizada) e nas águas evaporadas. Nesse caso, os sais efluentes no processo de evaporação são significativamente inferiores aos sais efluentes em termos de vazão regularizada e sangria, podendo ser desconsiderados.

Considere-se também que os reservatórios do Semi-Árido são assentes sobre solo cristalino, não havendo perdas para as águas subterrâneas, portanto o termo relativo às trocas de sais com o lençol é desprezível.

Assim, a Equação 5 pode ser simplificada, em função dos termos de maior significado em um balanço de sais plurianual, na seguinte equação:

$$MSR_{t+1} = MSR_t + MAST - MSS_t - MRS_t \quad (6)$$

sendo $MASt$ a massa de sais afluente em forma de deflúvio, MSS_t a massa efluente em forma de sangria e MRS_t a massa efluente em forma de vazão regularizada.

As equações 3 e 6 formam o sistema utilizado na construção do modelo. As massas de sais afluente ao reservatório são consideradas a partir da equação dimensional: $MASt = \delta V_A$ onde V_A é a vazão afluente em uma dada estação e δ e β são parâmetros a serem ajustados. Para efeito deste trabalho considerou-se $\beta=1$ e δ igual a concentração média dos sais das águas afluentes aos reservatórios (C_A).

Ao se adotar o valor $\beta=1$, como constante, e δ igual a concentração média dos deflúvios, a afluência de sais ao reservatório fica representada pelo seu valor médio ao longo do tempo.

OS DIAGRAMAS DE SALINIZAÇÃO DE RESERVATÓRIOS (DSR)

As simulações dos balanços de sais dos reservatórios foram agrupadas de modo a formar conjuntos gráficos denominados Diagrama de Salinização de Reservatórios denotados por DSR.

Para se construir os diagramas utilizou-se o método de simulação Monte Carlo, segundo a mesma lógica e procedimento utilizados na construção dos diagramas triangulares de regularização (Campos, 1996).

Foram construídos dois DSR's para as garantias de 80 e 90% respectivamente (Figuras 2 e 3).

Cada diagrama é formado por cinco gráficos cartesianos, referentes aos distintos valores dos coeficientes de variação dos deflúvios anuais. Os gráficos cartesianos têm com eixos os valores de f_E e f_K e apresentam as isolinhas dos valores do potencial de salinização dos reservatórios (PSR). Dessa forma, a isolinha 1,40 representa um valor de PSR de 1,40. Isto é, em um reservatório com essa característica, a concentração de sais nos vertimentos, medida após um longo tempo de operação do reservatório, é, em média, cerca de 1,4 vezes a concentração do rio em condições naturais.

A título de ilustração, para se obter o potencial de salinização de reservatório com $C_v = 1,0$, $f_E = 0,20$ e $f_K = 2,4$ quando o reservatório é operado com 80% de garantia procede-se da seguinte maneira: seleciona-se na Figura 2 (DSR para 80% de garantia) o gráfico cartesiano referente a $C_v = 1$; traça-se do eixo das abcissas uma vertical a partir do valor 0,20; do eixo das ordenadas traça-se uma horizontal a partir do valor 2,4. O ponto de intercessão se dará próximo à isolinha 1,2.

Os DSRs cobriram o seguinte campo de parâmetros: C_v : 0,4; 0,7; 1,0; 1,2 e 1,4; - f_E : 0,1 a 0,5; f_K : 1,0 a 3,0

Além das análises de observações diretas nos eixos cartesianos – influência da capacidade, da evaporação e do coeficiente de variação no potencial de salinização, os DSRs permitem as seguintes análises: influência do incremento da capacidade do reservatório no potencial de salinização – pode ser estimado pelo espaçamento das isolinhas de PSR medidas na vertical – linhas mais juntas significam maior gradiente do potencial de salinização por capacidade do reservatório; influência do incremento do fator adimensional de evaporação no potencial de salinização – pode ser estimado pelo espaçamento das isolinhas de P_{SR} medidas na horizontal – linhas mais juntas significam maior gradiente do potencial de salinização em relação ao fator adimensional de evaporação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O DSR mostra-se uma importante ferramenta para a análise do processo de salinização em reservatórios superficiais. Através do DSR pode-se proceder a análise dos fatores morfométricos e climáticos mais importantes no processo de salinização dos reservatórios.

A título de ilustração apresentam-se as seguintes avaliações feitas pelo DSR:

1. influência da capacidade dos reservatórios no potencial de salinização;
2. influência do fator adimensional de evaporação no potencial de salinização e
3. influência do coeficiente de variação no potencial de salinização.

Adicionalmente, apresenta-se uma aplicação do modelo ao reservatório Pereira de Miranda. A Tabela 1 apresenta as principais características do reservatório Pereira de Miranda.

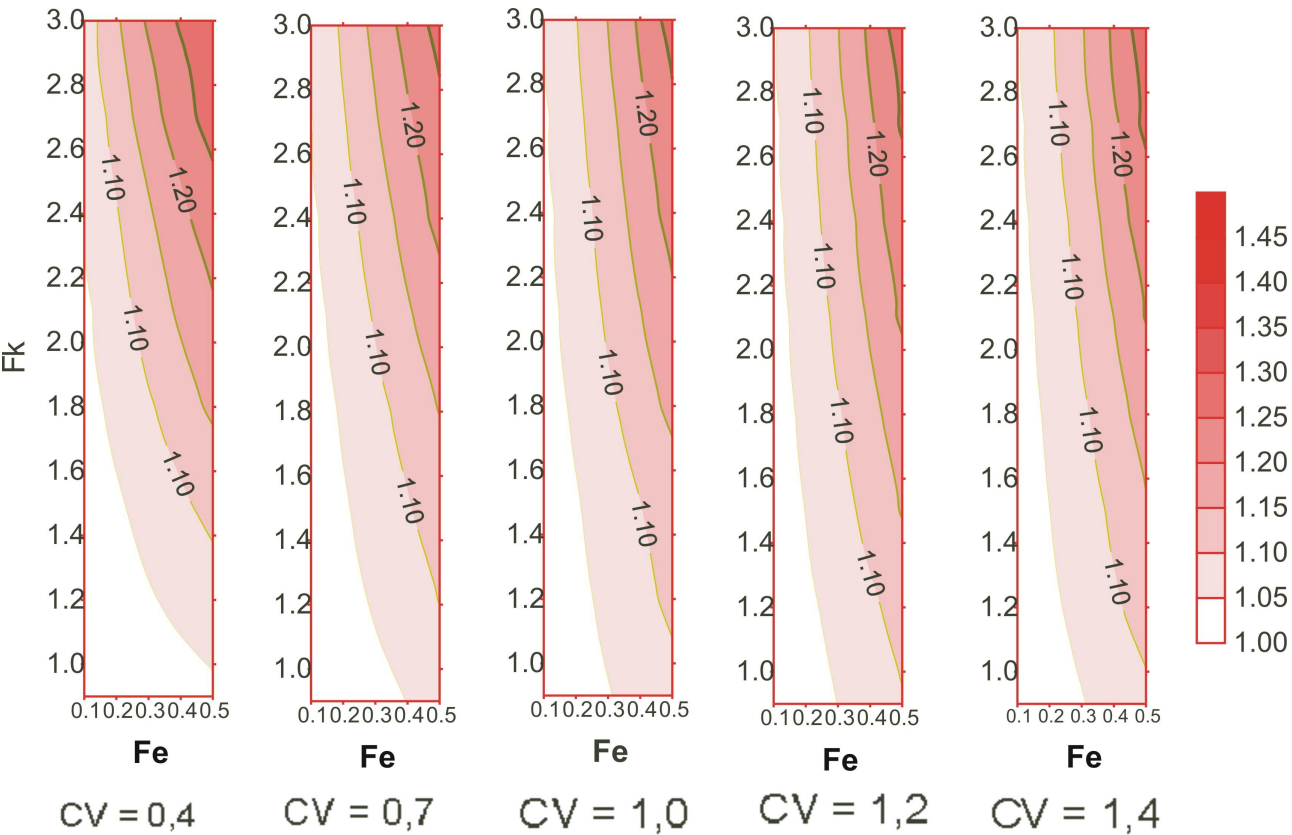


Figura 2 – Diagrama de Salinização de Reservatório(DSR) para vazão regularizada com 80% de garantia anual – isolinhas do potencial de salinização P_{sr} .

Tabela 1 – Dados dos Reservatórios Pereira de Miranda

Município	Pentecoste/Ceará
Rio barrado	CANINDÉ
Bacia hidrográfica (km ²)	3.262,97
Capacidade (hm ³)	395,63
Vazão regularizada (m ³ /s)	3,50
Altura máxima (m)	29,40

Concentração de sais x capacidade dos reservatórios

O potencial de salinização dos reservatórios cresce com o incremento do fator adimensional de capacidade. Por exemplo, para uma garantia de 80%, $C_v = 1,4$ $f_E = 0,20$ (Figura 2), o P_{sr} passa de um valor inferior a 1,05 para um valor de 1,10 quando o f_k passa de 1 para 3. Para $C_v = 0,4$, mantidas as demais condições constantes, o valor de P_{sr} passaria de um valor inferior a 1,05 para 1,15.

Assim conclui-se que a sensibilidade do potencial de salinização relativa à variação do fator

adimensional de capacidade é menor para maiores valores do coeficiente de variação dos deflúvios.

Ademais, pode-se concluir que o agravamento da salinidade com o incremento dos reservatórios não é tão grave para reservatórios operados com 80% de garantia.

Concentração de sais x fator adimensional de evaporação

O poder de concentração dos reservatórios aumenta com o fator adimensional de evaporação, fato empiricamente esperado. Assim, para uma garantia de 80%, $C_v = 0,4$ e $f_k = 2,0$, quando o f_E passa de 0,10 para 0,50 o potencial de salinização passa de um valor inferior a 1,05 para um valor ligeiramente superior a 1,15. Para $C_v = 1,4$, mantidos os demais parâmetros, o potencial de salinização passa de um valor inferior a 1,05 para um valor ligeiramente inferior a 1,20.

Conclui-se que o efeito do fator adimensional de evaporação (variando de 0,10 a 0,50) no po-

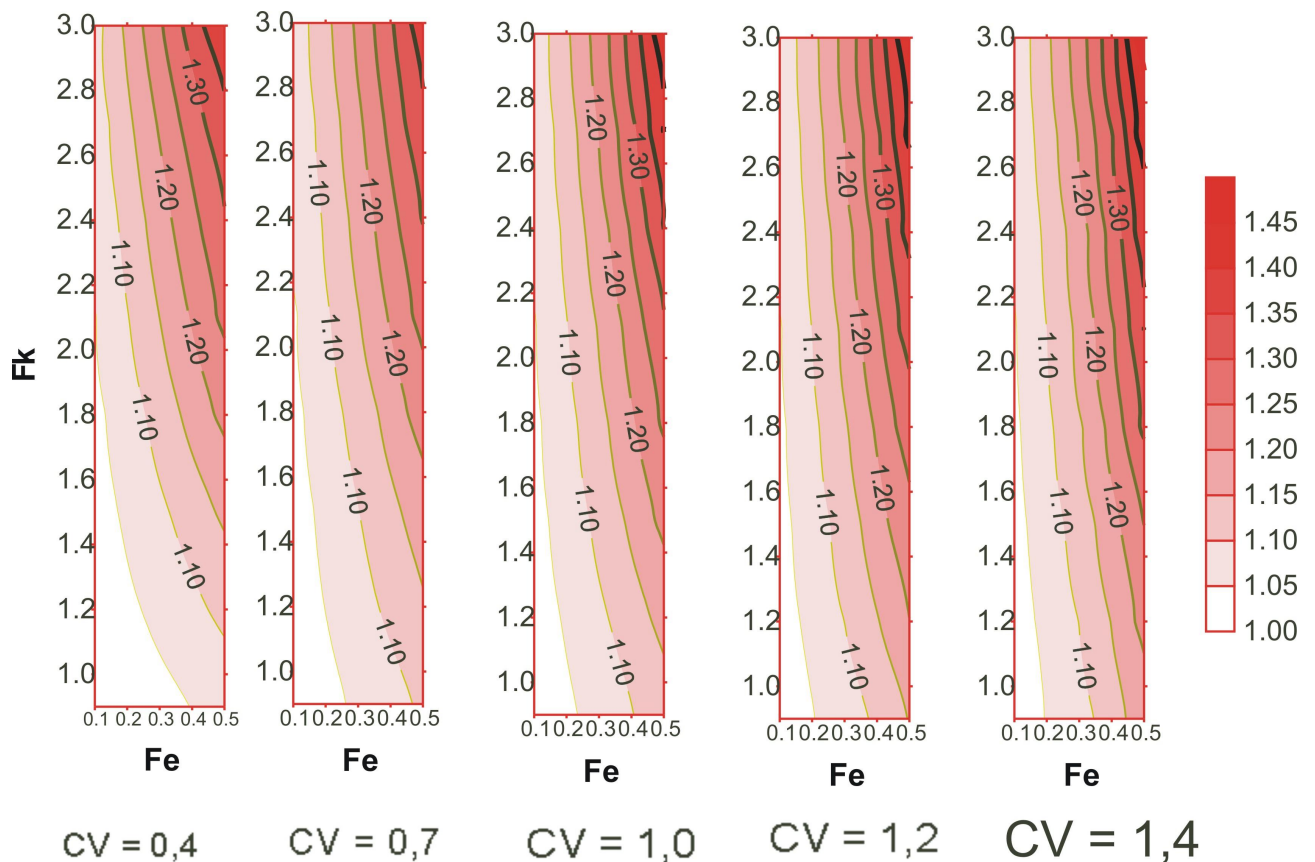


Figura 3 – Diagrama de Salinização de Reservatório(DSR) para vazão regularizada com 90% de garantia anual –isolinhas de salinização Psr.

tencial de salinização, dentro da faixa de validade do DSR é mais importante do que o fator adimensional de capacidade.(variando de 1 a 3). Contudo, não há grande sensibilidade da variação do PSR em relação ao f_E quando o C_v cresce.

Fazendo-se a mesma análise anterior para uma garantia de 90%, observa-se uma maior influência do coeficiente de variação. Enquanto que para $C_v = 0,4$ o PSR varia de 1,05 para 1,25, para $C_v = 1,4$ o PSR varia de 1,05 a um valor ligeiramente superior a 1,30.

O coeficiente de variação e o potencial de salinização de reservatórios

O comportamento do potencial de salinização em relação ao coeficiente de variação é um pouco mais complexo. A análise pode ser procedida em duas situações: 1) valores baixos de f_k e 2) valores elevados de f_k .

Para valores de f_k próximos a um, observe-se (parte inferior dos gráficos de C_v) que quando se caminha de $C_v = 0,4$ para $C_v = 1,4$ há uma suave aproximação das isolinhas de Psr mais elevadas do eixo das abscissas. Significa que quando C_v cresce, mantidas as demais condições constantes, o valor de P_{SR} tende a diminuir.

No outro extremo da curva, f_k próximo a três, há um afastamento quase imperceptível. Significa que para valores de f_k em torno de 3 a influência de C_v é nula ou levemente negativa(maiores C_v menores Psr).

Exemplo de aplicação do modelo

Aplicou-se o DSR ao reservatório Pereira de Miranda, na bacia do rio Curu, Ceará para o ânion Cl^- . Os dados básicos utilizados (f_E , f_k e C_A) são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Aplicação do DSR ao reservatório Pereira de Miranda

Nome do Reservatório	Pereira de Miranda
f_k	1,92
f_E	0,21
C_A (mg/l)	45
Concentração do vertimento obtida d DSR	51
Concentração Vertimento-Obtida do DSR	76
Ano do final da Construção	1956

Com os valores de f_E e f_k encontra-se o valor do PSR igual a 1,13 que para um CA igual a 45 leva a uma concentração do vertimento igual a 51 mg/l. O reservatório Pereira de Miranda em 23/06/84 apresentava uma concentração de Cl de 93 mg/l e um volume armazenado de 250,9hm³, 65% da capacidade máxima. Supondo uma afluência, com a concentração C_A , igual a 45 mg/l, se o reservatório recebesse um volume de água para enchê-lo, chegaria ao nível do sangradouro com uma concentração de 76mg/l ($0,65 \times 93 + 0,35 \times 45$). (Seria o máximo valor na sangria daquele ano). Esse teor tenderia a diminuir ao longo do ano caso o reservatório continuasse sangrando.

Aplicações a outros reservatórios

Para avaliar, qualitativamente, o comportamento do DSR aplicou-se o mesmo a três reservatórios bem tradicionais por seus níveis de salinização: O Banabuiú com águas de boa qualidade; o Joaquim Távora, com águas de qualidade sofrível e o Cedro tradicional por poucos vertimentos e águas salinas.

Tabela 3 - Aplicação do DSR a três reservatórios no Ceará.

Nome do Reservatório	f_k	f_E	PSR
Banabuiú	2,41	0,07	1,02
Joaquim Távora	3,2	0,30	1,20
Cedro	4,9	0,32	1,35

Os resultados, Tabela 3, estão compatíveis com o conhecimento empírico que se tem sobre os mesmos: Banabuiú com baixo potencial de salinização; o Joaquim Távora com médio potencial de salinização e o Cedro com um elevado potencial.

CONCLUSÕES

O artigo apresentou as etapas de construção de um modelo de estimação do potencial de salinização em reservatórios superficiais. Apresentou-se também um diagrama de salinização de reservatórios (DSR) que permite analisar os riscos de salinização de reservatórios em função de parâmetros adimensionais característicos do reservatório, como: o coeficiente de variação dos deflúvios anuais; o fator adimensional de evaporação, o fator adimensional de capacidade e a garantia no fornecimento de água.

A análise do DSR permitiu concluir que o potencial de salinização dos reservatórios – medido pela razão entre a concentração de sais na água nos períodos de sangria de longo termo dividido pela concentração de sais da água do rio – apresenta as seguintes características:

O fator adimensional de capacidade apresenta influência significativa no potencial de salinização, que passa, por exemplo de 1,2 para 2,2 quando f_k varia de 1 para 3.

O potencial de salinização dos reservatórios cresce quando cresce o coeficiente de variação dos deflúvios anuais. Esse fato decorre do maior percentual de sangria dos reservatórios com C_v elevados mantidas as demais condições constantes.

Os reservatórios operados com maiores garantias têm maior potencialidade de salinização. O fato decorre da menor frequência de esvaziamento dos reservatórios e consequentemente menor renovação dos estoques de água.

Maiores valores do fator adimensional de evaporação ocasionam maiores potenciais de salinização.

Há um decaimento exponencial do Potencial de Salinização do Reservatório (P_s) com sua frequência de sangria.

Reservatórios com baixa variabilidade dos deflúvios, para um mesmo fator adimensional de capacidade, apresentam maior poder de salinização.

Os resultados da aplicação mostram uma consistência qualitativa entre o modelo e os conhecimentos empíricos da Região. Diante da carência de dados de qualidade ainda existentes o modelo pode ser considerado com uma boa ferramenta para o dimensionamento de reservatórios superficiais no Nordeste Semi-Árido.

SIMBOLOGIA

α - Fator de forma da bacia hidráulica do reservatório

μ - Volume afluente médio anual ao reservatório
 $\{X\}$ - Valor esperado da grandeza X
A - Área da superfície do lago
 C_0 - Concentração de sais nos rios em condições naturais
 C_∞ - Concentração de sais de longo horizonte, estimada pela média dos últimos 50 anos da simulação
 C_V - Coeficiente de variação dos volumes afluentes anuais ao reservatório
E - Lâmina evaporada do reservatório durante a estação seca
 f_E - Fator adimensional de evaporação
 f_K - Fator adimensional de capacidade
 f_M - Fator adimensional de retirada
G - Garantia anual do fornecimento de água
h - Altura de água no reservatório em relação ao ponto mais profundo
K - Capacidade do reservatório
M - Volume anual regularizado pelo reservatório
 M_{90} - Volume anual regularizado pelo reservatório com uma garantia de 90%.
PE - Percentual do deflúvio afluente médio anual evaporado a partir do lago
 P_{SR} - Potencial de salinização dos reservatórios
VA - Volume afluente ao reservatório
VE - Volume evaporado do reservatório
VR - Volume efetivamente retirado do reservatórios para fins utilitários.
VS - Volume sangrado do reservatório
Z - Estoque de água no reservatório

REFERÊNCIAS

- BANIN, A., AND A. FISH, *Secondary Desertification Due To Salinization Of Intensively Irrigated Lands: The Israeli Experience*, ENVIRON. MONIT. ASSESS., 37, 17–37, 1995.
- BARROS, F.F. (1994). *Qualidade da Água e Balanço de Sais em Reservatórios Superficiais na Bacia do Curu*. Tese de Mestrado universidade Federal do Ceará. 78pp.b
- CAMPOS J. N. B. (1986). *A Procedure for Reservoir Sizing on Intermittent Rivers Under High Evaporation Rate* Dissertação de Doutorado. Colorado State University. Fort Collins, Co..
- CAMPOS J. N. B. (1996). *Dimensionamento de Reservatórios: o Método do Diagrama Triangular de Regularização*. Edições UFC.
- CHEN, H., Y. ZHANG, X. WANG, Z. REN, AND L. LI, *Salt-Water Intrusion In The Lower Reaches Of The Weihe River, Shandong Province, China*, HYDROGEOL. J., 5(3), 82– 88, 1997.
- DUTTON, A. R., B. C. RICHTER, AND C. W. KREITLER, *BRINE Discharge And Salinization, Concho River Watershed, West Texas*, GROUND WATER, 27(3), 375– 383, 1989.
- FRANCO, S.R. (2000) . *Estudos probabilísticos de concentrações de cloretos no açude Caxitoré usando o Método de Monte Carlo*. 65 p. Dissertação(Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Ce,
- FUNAKAWA, S., R. SUZUKI, E. KARBOZOVA, T. KOSAKI, AND N. ISHIDA, *Saltaffected Soils Under Rice-Based Irrigation Agriculture In Southern Kazakhstan*, GEODERMA, 97, 61– 85, 2000.
- GHASSEMI, F., A. J. JAKEMAN, AND H. A. NIX, *Salinization Of Land And Water Resources*, 526 PP., CAB INT., WALLINGFORD, U.K., 1995.
- GILBOA, Y., *The Salinization In The Alluvial Aquifers Of The Coast Of Peru*, BOL. SOC. GEOL. PERU, 57/58, 35– 58, 1977.
- HENDRY, M. J., AND G. D. BUCKLAND, *Causes Of Soil Salinization, 1, A Basin In Southern Alberta, Canada*, GROUND WATER, 28(3), 385– 393, 1990.
- HILLMAN, R. M., *Land And Stream Salinity In Western Australia, In Land And Stream Salinity: Developments In Agricultural Engineering*, VOL. 2, EDITED BY J. W. HOLMES AND T. TALSMAN, PP. 11 –18, ELSEVIER SCI., NEW YORK, 1981.
- KARAMA, A.S. “Analyses Of Reservoir Reability Constrained By Natural Salt Pollution”, TESE DE DOUTORADO. TEXAS A&M UNIVERSITY, COLLEGE SATATION, TX.
- KIRCHNER, J., J. H. MOOLMAN, AND A. G. Reynders, *Causes And Management Of Salinity In The Breede River Valley*, SOUTH AFRICA, HYDROGEOL. J., 5(1), 98–108, 1997.
- MACUMBER, P. G., *Interrelationship Between Physiography, Hydrology, Sedimentation, And Salinization Of The Loddon River Plains*, AUSTRALIA, J. HYDROL., 7, 39–57, 1969.
- MARIE, A., AND A. VENGOSH, *Sources Of Salinity In Ground Water From Jericho Area*, JORDAN VALLEY, GROUND WATER, 39(2), 240–248, 2001.
- MILLER, M. R., P. L. BROWN, J. J. DONOVAN, R. N. BERGATINO, J. L. SONDEREGGER, AND F. A. SCHMIDT, *Saline Seep Development And Control In The North American Great Plains-Hydrogeological Aspects, In Land And Stream Salinity: Developments In Agricultural Engineering*, VOL. 2, EDITED BY J. W.
- MORAN, P.A. P. (1954) *A Probability Theory of Dams and Storage Systems. Australian Journal of Applied Science. Vol.5*

- NIGHTINGALE, H. I., *Soil And Ground-Water Salinization Beneath Diversified Irrigated Agriculture*, SOIL SCI., 118(6), 365– 373, 1974.
- PEREIRA, P.M. E SOUZA FILHO, F.A. . *Cartografia do Transporte de Aerossóis de Cloreto no Estado do Ceará utilizando técnica de geoprocessamento*. In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos Recife, 1979.
- PRAKASH, V. A., AND D. K. CHADHA, *Genetic Causes Of Salinization Of Groundwater in Haryana*, INDIA, BULL. INDIAN GEOL. ASSOC., 16(1), 99, 1983.
- RICHTER, B. C., AND C. W. KREITLER, *Geochemical Techniques For Identifying Sources Of Ground-Water Salinization*, EDITED BY K. C. SMOLEY, 258 PP., CRC PRESS, BOCA RATON, FLA., 1993.
- SALES NETO, P. (COORD.) (2002). *Projeto Salinidade: Estudo da Salinidade em pequenas bacias hidrográficas*. FUNCEME. Fortaleza, 2002
- SANTIAGO, M.M.F. (1984). *Mecanismos de Salinização em Regiões Semi-Áridas: Estudo dos Açudes Pereira de Miranda e Caxitoré no Ceará..* Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 176 pp
- SCHOFIELD, N. J., AND J. K. RUPRECHT, *Regional Analysis Of Stream Salinisation In Southwest Western Australia*, J. HYDROGEOL., 112, 19– 39, 1989.
- SMITH, D. R., *Salinization In Uzbekistan*, POST-SOVIET GEOGR, 33, 21– 33, 1992.
- SOUZA FILHO, F.A. (1997) *Modelo de Previsão do Processo de Salinização de Reservatórios..* In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Associação Brasileira de Recursos Hídricos Recife, 1979.
- UMALI, D.L. "Irrigation-induced Salinity: A Growing Problem for Development and the Enviromental". Word Bank Tecnical Papaer N 215. 1993.
- VALENZA, A., J. C. GRILLOT, AND J. DAZY, *Influence Of Groundwater On The Degradation Of Irrigated Soils In A Semi-Arid Region, The Inner Delta Of The Niger River*, MALI, HYDROGEOL. J., 8, 417– 429, 2000.
- VENGOSH, A., AND A. BEN-ZVI, *Formation Of A Salt Plume In The Coastal Plain Aquifer Of Israel: The Be'er Toviyya Region*, J. HYDROL., 160, 21–52, 1994.
- WANG, B., H. QIU, Q. XU, X. ZHENG, AND G. LIU, "The Mechanism Of Groundwater Salinization And Its Control In The Yaoba Oasis", INNER MONGOLIA, ACTA GEOL. SIN., 74(2), 362– 369, 2000.
- WURBS, R.A; KAMARA, A.S; "Salinity and Water-Supply Reliability". J. Water Resources Planning and Management. pag 352. Set/oct. 1995.
- PAINE, J. G., *Determining Salinization Extent, Identifying Salinity Sources, And Estimating Chloride Mass Using Surface, Borehole, And Airborne Electromagnetic Induction Methods*, WATER RESOUR. RES., 39(3), 1059, DOI:10.1029/2001WR000710, 2003.

A Model to Evaluate the Salinization Potential of Surface Reservoirs in Semi-arid Regions

ABSTRACT

The paper presents a model to evaluate the salinization potential of surface reservoirs in semi-arid regions. The model was developed using Monte Carlo simulation and the dimensionless reservoir budget equation of the Triangular Regulation Diagram. The model was applied to the Pereira de Miranda Reservoir in Curu River Basin in the state of Ceara and consists of diagrams that allow estimating long-term trends in reservoir salinization.

Key-words: Reservoirs operation; salinization reservoirs; water quality.