

MODELO DE QUALIDADE DE ÁGUAS SUPERFICIAIS PARA SIMULAÇÃO DE SALINIDADE EM RESERVATÓRIOS DE CLIMA SEMIÁRIDO

Victor Costa Porto^{1*}; *Francisco de Assis de Souza Filho*²; *Cleiton da Silva Silveira*³; *Renan Vieira Rocha*¹; *Victor Edney Dajtenko Lemos*⁴

Resumo - Este trabalho tem como objetivo analisar o impacto da variabilidade climática na concentração de sais em reservatórios de clima semiárido a partir do desenvolvimento de um modelo zero dimensional de qualidade de águas superficiais para reservatórios. O modelo é baseado na resolução simultânea das equações de balanço de massa hídrica e balanço de massa de sais. Para resolver as equações de balanço foram utilizadas capacidade máxima, série histórica de vazões afluentes, cota-área-volume e evaporação que foram obtidos junto a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos Do Ceará (COGERH), foi utilizada concentração afluente constante e teórica de 100 mg/L. O modelo elaborado simulou a evolução temporal da concentração de sais para os reservatórios da Bacia do Alto Jaguaribe no Estado do Ceará para um período de 100 anos (1912-2012). Os resultados mostraram que a salinidade varia inversamente com o volume, aumentando drasticamente durante os períodos de estiagem. Concluiu-se que o processo de alocação e operação de hidro sistemas deve levar em conta parâmetros de qualidade da água, visto o impacto da variação da quantidade de água armazenada sobre esta e o agravamento de ambas durante períodos de estiagem.

Palavras-Chave - Variabilidade Climática; Modelo de Qualidade de Água; Salinidade.

SURFACE WATER QUALITY MODEL FOR SALINITY SIMULATION IN SEMI-ARID CLIMATE RESERVOIRS

Abstract – This paper aims to analyze the impact of climate variability on the concentration of salts in semi - arid climate reservoirs by developing a zero-dimensional model of surface water quality for reservoirs. The model is based on the simultaneous resolution of water and salinity mass balances equations. To solve the balance equations, maximum capacity, historical series of affluent flows, quota-area-volume and evaporation data, that were obtained from the State Water Resources Management Company (COGERH), were used. A constant and theoretical affluent concentration of 100 mg /L was considered. The elaborated model simulated the temporal evolution of the salt concentration for the reservoirs of the Upper Jaguaribe Basin in the State of Ceará for a period of 100 years (1912-2012). The results showed that the salinity varies inversely with the volume, increasing drastically during drought periods. It was concluded that the process of allocation and operation of hydro systems should take into account parameters of water quality, considering the impact of the variation of the amount of water stored on it and the aggravation of both during periods of drought.

Keywords – Climate Variability, Water Quality Model, Salinity.

¹ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal do Ceará (UFC), renanvierochoa@gmail.com; victorporto@gmail.com

² Dr. Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará (DEHA-UFC), assis@ufc.br

³ Dr. Professor do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (IEDS-UNILAB), cleitonsilveira@unilab.edu.br

⁴ Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC), dajtenko@gmail.com

* Autor correspondente

INTRODUÇÃO

O Nordeste do Brasil (NEB) apresenta clima semiárido caracterizado por grande variabilidade temporal e espacial de precipitações. Historicamente, o Ceará é marcado por grandes prejuízos associados a eventos climáticos extremos, como cheias e secas. Pequenas oscilações, associadas às condições climáticas, provocam significativos impactos sociais e econômicos sobre a região (Souza Filho e Moura, 2006). A precipitação no Ceará possui grande variabilidade sazonal, onde 75% dos totais das chuvas ocorrem em quatro meses (fevereiro, março, abril e maio) e uma quase total ausência de precipitação no segundo semestre. Esta característica é governada em grande parte pela migração norte/sul da zona de convergência intertropical (ZCIT) ao longo do ano.

Devido a essa variabilidade sazonal adicionada a variabilidade interanual com anos em que precipita 1000 mm em Fortaleza-CE e anos em que a precipitação atinge 1800 mm (Silveira, 2014), o Estado do Ceará criou uma grande rede reservatórios espalhada por todo seu território (Campos e Studart, 2003).

Um dos intuitos dessa construção foi o armazenamento temporário das águas fluviais, uma medida de controle do escoamento superficial, que contribui para o retardo e amortecimento dos picos de vazão, de forma a minimizar os problemas das enchentes, à jusante da barragem. Além disso, permite o transporte temporal sazonal e interanual de água da estação chuvosa para a estação seca e ainda, o transporte de água entre anos úmidos e secos. Aumentando a disponibilidade de água para os períodos de seca.

Em virtude desse controle de volume de água o Ceará adota como instrumento de gestão a outorga pelo uso da água e alocação negociada. A alocação sazonal da água é realizada por um processo de discussão pública, tendo em conta seus múltiplos usos e os conflitos envolvidos.

Apesar do instrumento de outorga prever o controle quali-quantitativo da água, não há um mecanismo capaz de avaliar a qualidade da água. Atualmente, para alocação e operação de hidrossistemas a Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) utiliza simulações de esvaziamento de reservatórios, que consideram vazões zero e horizontes de planejamento entre 6 e 18 meses (Ribeiro, 2011), contudo os parâmetros de qualidade de água não são avaliados.

Dentre os problemas relacionados à qualidade da água está o aumento da concentração de sais que torna parte da água disponível imprópria para a agricultura e consumo humano e também causa a elevação do custo de tratamento. Podendo, assim, trazer prejuízos socioeconômicos para a região.

Neste contexto, torna-se importante a utilização de ferramentas como a modelagem matemática de concentração de substâncias a fim de auxiliar na gestão não somente da quantidade, mas também da qualidade dos recursos hídricos.

Assim, este trabalho tem como objetivo analisar o impacto da variabilidade climática na qualidade da água de reservatórios de clima semiárido a partir do desenvolvimento de um modelo zero dimensional de qualidade de águas superficiais para reservatórios capaz de simular a concentração de sais.

METODOLOGIA

Área de estudo e dados

A área estudada consiste nos 18 principais reservatórios da bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe, pertencente ao semiárido cearense. A bacia está localizada no sudoeste do Estado, drena uma área de 25,656 km² e tem o Orós como seu maior reservatório.

Os reservatórios do Alto Jaguaribe modelados neste estudo podem ser resumidamente apresentados de montante à jusante da esquerda para a direita conforme o esquema mostrado na Figura 1.

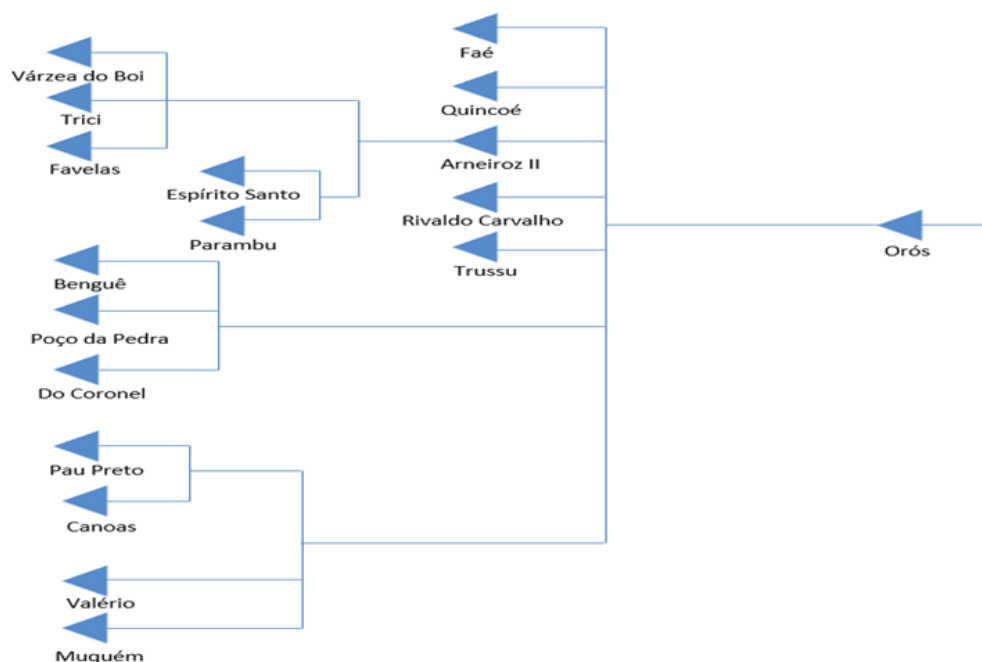


Figura 1- Esquema dos Reservatórios da Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe

Para cada um destes reservatórios, foram necessários para o desenvolvimento do modelo de qualidade da água dados de capacidade máxima, série histórica de vazões afluentes, cota-área-volume e evaporação que foram obtidos junto a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) com exceção dos valores de taxa de evaporação mensal média que foram obtidos pelas normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A série histórica de vazões afluentes utilizada contém os dados mensais consistidos do período de janeiro de 1912 a dezembro de 2011 totalizando 101 anos. Para os reservatórios que não apresentavam a série histórica de vazões completa, estimou-se os valores que faltavam por meio de uma regressão linear com base na série histórica do reservatório Orós, o maior e o mais importante dos reservatórios estudados.

Não foram encontrados dados do reservatório Espírito Santo e a regressão linear do reservatório Parambu não apresentou resultados adequados. Assim, estes dois reservatórios não foram modelados.

Desenvolvimento do Modelo

O modelo desenvolvido tem dimensão zero, ou seja, não leva em consideração a influência da localização de um ponto amostrado em relação ao reservatório, logo considera que a concentração de uma substância seja a mesma para qualquer ponto do reservatório estudado, em outras palavras, considera o reservatório como um ponto e a concentração de substâncias como uma propriedade deste ponto.

Para isto, o modelo foi baseado na equação de balanço de massa para reator perfeitamente agitado proposta por Chapra (1997):

$$\frac{dM}{dt} = W - \frac{M}{V} * (Q_{out} + kV + v_s A_s) \quad (1)$$

Onde M é a massa da substância modelada, t é o intervalo de tempo, W é a carga de substância que entra no reator durante o intervalo, V é o volume de água no reator, Q_{out} é a vazão de água retirada do reator, k é o coeficiente de reação de primeira ordem, v_s é a velocidade de sedimentação e A_s é a área superficial do reator.

A modelagem de sais em reservatórios pode ser feita considerando que estes possuem comportamento conservativo, ou seja, não tem sua massa alterada por processos químicos e biológicos naturais, assim o balanço de massa é realizado de forma semelhante à equação 1, porém desconsiderando a parcela devido à reação química (kV). Ademais, a parcela decorrente da sedimentação ($vsAs$) pode ser desconsiderada em razão das baixas velocidades de sedimentação e o efeito da resuspensão.

Devido à falta de dados sobre as cargas de fósforo e de sais, estas foram consideradas como o produto entre a vazão afluyente ao reservatório e uma concentração de fósforo estimada.

Por causa das características típicas do clima semiárido, os reservatórios estudados possuem alta variação temporal dos volumes armazenados. Assim é necessário, também, a simulação dos volumes de água armazenada através da equação do balanço hídrico dada por:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - EVAP - Q_{out} - P_i \quad (2)$$

Em que V é o volume de água armazenado no reservatório, Q_{in} é a vazão afluyente ao reservatório, $EVAP$ é o volume evaporado durante o intervalo, Q_{out} é a vazão total efluente do reservatório e P_i são as perdas por infiltração.

A evaporação foi determinada como o produto entre a taxa de evaporação mensal média das normais climatológicas, ou lâmina d'água evaporada, e área superficial do reservatório determinada a partir da cota-área-volume como função do volume armazenado. As perdas por infiltração (percolação) foram descartadas, uma vez que são insignificantes em relação aos outros fatores.

Levando em consideração estas simplificações, a modelagem das concentrações sais neste trabalho foi realizada através das equações do balanço hídrico e do balanço de massa conforme:

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - eA_s(V) - Q_{out} \quad (3)$$

$$\frac{dS}{dt} = Q_{in}c_{afllu} - \frac{S}{V} * Q_{out} \quad (4)$$

Em que a equação 3 representa o balanço hídrico com V o volume de água armazenado em hm^3 , Q_{in} é a vazão afluyente em $hm^3/mês$, e e é a lâmina d'água evaporada em $hm/mês$, A_s , a área superficial em hm^2 e Q_{out} , a vazão efluente em $hm^3/mês$. A equação 4 representa o balanço de massa de sais, S é a massa de sais em Ton , c_{afllu} é a concentração de substância modelada no afluyente em Ton/hm^3 e vs é a velocidade de sedimentação em $hm/mês$.

Parâmetros Estimados

Para a resolução das equações, foram necessários estimar alguns parâmetros. O volume inicial dos reservatórios, referente ao início da série foi considerado 50% da capacidade máxima. A área superficial dos reservatórios foi estimada por regressão polinomial de terceiro grau do volume do reservatório.

Considerou-se a vazão efluente (Q_{out}) como a soma da retirada operacional (R) com o volume total vertido no intervalo ($Vert$). As retiradas operacionais R foram consideradas iguais à vazão regularizada associada à 90% de garantia da demanda (Q_{90}), ou seja, que em apenas 10% dos meses da série histórica, a demanda não seria totalmente atendida por esta vazão. Estas vazões foram obtidas conforme metodologia e software elaborados por CID (2014). Adotou-se também um volume morto de 10% da capacidade máxima do reservatório, a partir do qual não haveriam mais retiradas, a fim de evitar que o volume do reservatório seque completamente.

A concentração natural afluyente (c_{afllu}) de sais foi assumida constante e igual a $100 \text{ Ton}/hm^3$ em todos os intervalos e reservatórios modelados, servindo assim como um valor de referência,

permitindo a sua comparação com as concentrações modeladas. Verifica-se que a unidade toneladas por hectômetros cúbicos (Ton/hm³) é equivalente à usual de miligramas por litro (mg/L).

Resolução das Equações

O modelo desenvolvido resolve o sistema das equações diferenciais 3 e 4, simultaneamente, para encontrar o valor de volume de água e de massa de fósforo e de sais no final de cada intervalo, a partir de condições de contorno relativas ao início do intervalo. A resolução das equações se deu pelo método numérico Runge-Kutta de quarta ordem, método que estima o valor de uma função a partir do valor de sua derivada em 4 pontos de um intervalo (Chapra e Canale, 2006), conforme:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dy}{dx} = f(x, y) \\ k_1 = f(x_i, y_i) \\ k_2 = f(x_i + \frac{h}{2}, y_i + k_1 \frac{h}{2}) \\ k_3 = f(x_i + \frac{h}{2}, y_i + k_2 \frac{h}{2}) \\ k_4 = f(x_i + h, y_i + k_3 h) \\ y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)h \end{array} \right. \quad (6)$$

Em que, h é o tamanho do passo, y_i é o valor da função no início do passo, y_{i+1} é o valor estimado da função no final do passo, k₁ é o valor da equação diferencial no início do passo, k₂ é o valor da equação diferencial na metade do passo no ponto estimado por uma extrapolação linear de inclinação k₁, k₃ é o valor da equação diferencial na metade do passo no ponto estimado por uma extrapolação linear de inclinação k₂ e k₄ é o valor da equação diferencial no final do passo, no ponto estimado por uma extrapolação linear de inclinação k₃.

Neste trabalho foram considerados intervalo (t) de 1 mês e passo (h) igual a 0,1 mês, assim, são realizados 10 passos para cada mês modelado. A utilização de vários passos contribui para o aumento de precisão do método

A resolução do sistema se dá inicialmente pela equação do balanço hídrico, uma vez que independe das demais. Os vertimentos são retirados ao final de cada passo, quando o volume estimado pelo passo for maior que o volume máximo do reservatório, e então são divididos pelo tamanho do passo (para obter a taxa em hm³/mês) e somados com a vazão efluente para obter o novo valor de vazão efluente. É necessário, também, corrigir a inclinação do volume no passo, visto que o volume final mudou de valor, devido a retirada do que foi vertido.

Estas equações foram resolvidas mensalmente para todos os meses da série histórica para cada reservatório modelado. A concentração ao final do intervalo é obtida pela razão entre a massa de substância modelada, resultante do balanço de massa, e o volume de água do reservatório, resultante do balanço hídrico.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados é realizada com foco no reservatório Orós, visto ser o maior e o mais importante, porém os outros reservatórios obtiveram resultados semelhantes.

A evolução temporal dos volumes de água armazenado pelos reservatórios, obtida pela resolução da equação do balanço hídrico, juntamente com a evolução da concentração de sais resultante do balanço hídrico em conjunto com o de massa de sais é mostrada para o reservatório Orós para toda a série histórica na Figura 2.

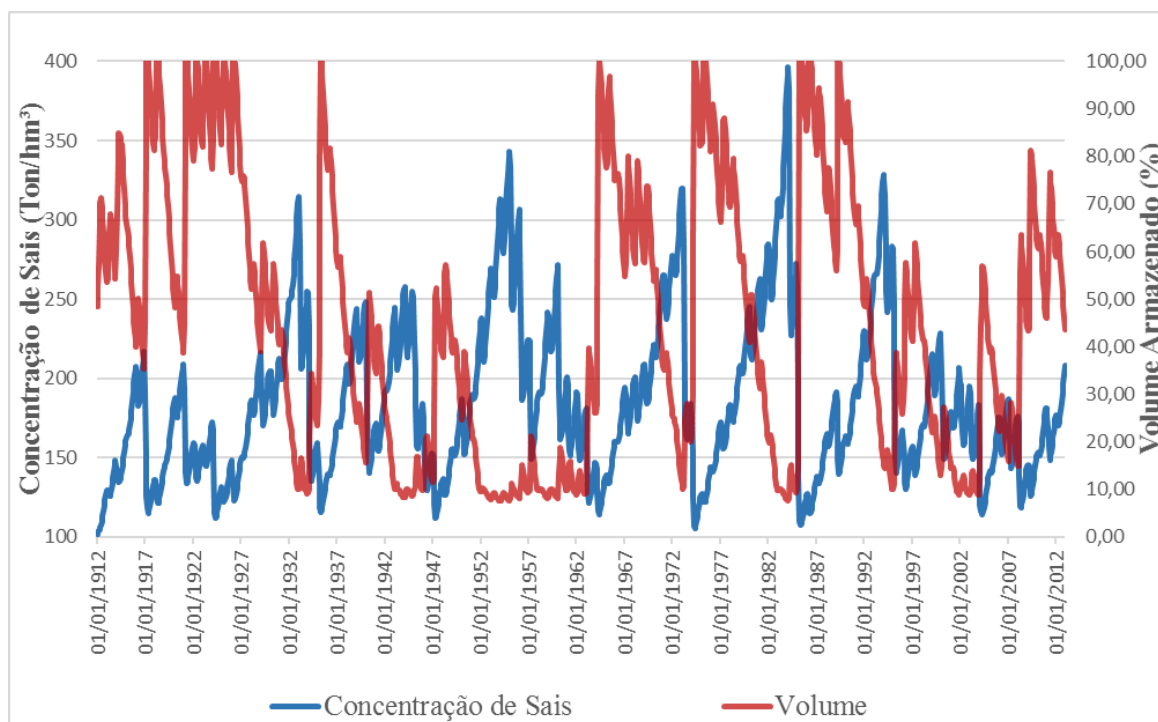


Figura 2 - Comparação entre as Evoluções Temporais de Volume e de Sais para o Reservatório Orós.

Observa-se que existe grande variação no volume deste reservatório ao longo do período modelado, além da alternância entre períodos de cheias e secas, fenômenos que podem ser explicados pela variabilidade climática típica do clima semiárido, este fato se repetiu também para todos os outros reservatórios modelados.

Verifica-se que quanto menor for o volume armazenado, maior é a concentração de sais. Assim, há um significativo aumento de salinidade durante os períodos secos.

Este resultado pode ser explicado visto que o aumento de volume é decorrente de períodos de maior vazão afluyente e como a concentração afluyente natural é sempre menor que a concentração de sais no reservatório, períodos com maior vazão afluyente significam em entrada de água de melhor qualidade que a armazenada o que leva à diminuição das concentrações, enquanto nos períodos secos, sem vazão afluyente, o efeito da evaporação tende à aumentar cada vez mais a concentração de sais e não há entrada de água de melhor qualidade, visto as baixíssimas vazões afluentes nestes períodos.

Observa-se que há sempre aumento da concentração de sais em relação à concentração natural afluyente considerada, uma vez que as concentrações de sais obtidas pelo modelo são sempre maiores que 100 Ton/hm³, o que se repetiu para todos os reservatórios analisados conforme mostrado na Tabela 1 seguinte, o que pode ser explicado pelo efeito da evaporação que diminui o volume de água armazenado sem causar nenhuma diminuição de massa de sais, logo os reservatórios atuam de forma a aumentar a salinidade e têm efeito negativo para a qualidade da água levando em consideração este parâmetro.

Reservatório	Concentração Máxima (Ton/hm ³)	Concentração Mínima (Ton/hm ³)	Concentração Média (Ton/hm ³)
Arneiroz II	240,03	100,00	134,55
Benguê	506,60	100,00	138,98
Canoas	187,92	100,00	118,29
Do Coronel	518,45	100,00	186,53
Faé	233,31	100,00	128,65
Favelas	357,94	100,00	150,94
Muquém	363,13	100,00	148,63
Orós	396,58	100,00	184,69
Pau Preto	601,54	100,00	168,37
Poço da Pedra	652,74	100,00	238,41
Quincoé	349,06	100,00	137,34
Rivaldo de Carvalho	454,98	100,00	165,63
Trici	234,77	100,00	129,49
Trussu	376,91	100,00	161,66
Valério	766,06	100,00	241,47
Várzea do Boi	715,66	100,00	228,96

Tabela 1- Concentrações de Sais Máximas, Mínimas e Médias para os Reservatórios do Alto Jaguaribe.

Verifica-se que o reservatório Orós obteve concentração máxima de cerca de 4 vezes a concentração afluyente natural, alguns reservatórios modelados apresentaram máximas de mais de 7 vezes este parâmetro. O que mostra o quão significativo é o aumento da salinidade durante os períodos secos.

CONCLUSÃO

Foram modelados 16 dos 18 principais reservatórios da bacia do Alto Jaguaribe no Estado do Ceará e em todos foram obtidos resultados similares.

O modelo desenvolvido por este estudo foi baseado no modelo de reator perfeitamente agitado exposto por Chapra (1997), porém com adição da equação do balanço de massa hídrica, assim o modelo de Chapra em que o volume é constante e a evaporação é anulada pela precipitação é um caso particular do modelo desenvolvido.

Apesar de todas as simplificações realizadas, os resultados mostraram a influência da variabilidade climática e das altas taxas de evaporação na qualidade da água dos reservatórios estudados.

Foi verificado que a salinidade varia indiretamente com o volume, logo aumenta consideravelmente em períodos de seca. Assim, concluiu-se que o efeito reservatório é sempre negativo com relação à salinidade.

Mostrou-se que quanto menor for o volume armazenado, maior é a concentração de sais havendo um significativo aumento de salinidade durante os períodos secos. Assim, é necessário que o processo de alocação e operação de hidro sistemas deve levar em conta parâmetros de qualidade

da água, visto o impacto da variação da quantidade de água armazenada sobre esta e o agravamento de ambas durante períodos de estiagem.

O modelo e a metodologia, apresentados neste trabalho, podem ser aplicados em outras regiões, em especial as de alta evaporação, para a modelagem de saís levando em consideração variações temporais de volume. Recomenda-se a aplicação deste modelo utilizando dados reais de concentração afluentes de saís, a fim de comparação de resultados.

REFERÊNCIAS

CAMPOS, N; STUDART, T.; Gestão das águas: princípios e práticas. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2003.

CHAPRA, S. C.; Surface Water-Quality Modeling. McGraw-Hill, New York. 1997. 844 p.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P.; Numerical Methods for Engineers. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2006.

CID, D. A. C.; SOUZA FILHO, F. A.; AQUINO, S. H. S. Sistema de suporte à tomada de decisão em operação de reservatórios para alocação negociada, 2014.

RIBEIRO, D. C. M.; Modelo de previsão de vazão aplicado ao nordeste brasileiro utilizando a informação climática para auxiliar a operação de hidrossistemas. Fortaleza, p. 189. 2011.

SILVEIRA, C. S.; Modelagem Integrada De Meteorologia e Recursos Hídricos Em Múltiplas Escalas Temporais e Espaciais: Aplicação No Ceará e no Setor Hidroelétrico Brasileiro. Tese (Doutorado Acadêmico em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE, p. 352. 2014.

SOUZA FILHO, F. A. ; MOURA, Antonio Divino.; Introdução. In: Francisco de Assis de Souza Filho; Antonio Divino Moura. (Org.). Memórias do Seminário Natureza e Sociedade nos Semi-Áridos. Fortaleza: Banco do Nordeste, 2006, v. , p. 11-13.