

AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DO AJUSTE DO *TANK-MODEL* CONSIDERANDO DIFERENTES VAZÕES

Cinthia Maria de Abreu Claudino¹
Maria Ingridy Lacerda Diniz²
Andresa de Oliveira Silva³
Thiago de Sá Sena⁴

RESUMO

Compreender o comportamento das bacias hidrográficas é de grande importância, sendo a vazão um dos dados que melhor descrevem esse comportamento. No entanto, muitas regiões do Brasil não possuem uma série histórica consistente de dados de vazão. Para garantir que os estudos hidrológicos possuam uma série consistente, são empregados os modelos hidrológicos de chuva-vazão. Dentre diversos modelos, o Tank Model é bastante empregado, e estima a vazão por meio dos dados de precipitação e uma representação da bacia em forma de tanques. Ainda, é de grande importância analisar a precisão nessas estimativas, para isso pode ser feita a avaliação estatística do ajuste do modelo. Contudo, este estudo objetiva a aplicação de um modelo chuva-vazão conceitual, Tank Model, de modo a investigar o desempenho deste modelo em distintos eventos de vazão. Para isso foram empregados dados hipotéticos de precipitação e dados de vazão em nove eventos distintos, em um período de 24 meses. Na obtenção dos valores dos parâmetros foi empregado as equações do modelo e o método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), a avaliação do modelo foi feita a partir do cálculo do Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (COE). Os resultados encontrados mostram que o Tank Model na maioria dos casos apresentou desempenho insuficiente, apresentando um bom desempenho apenas para o primeiro evento de vazão. Esse baixo desempenho foi atribuído as limitações do método GRG. No mais, a partir do estudo foi possível comprovar a importância da aplicação da modelagem hidrológica junto a métodos de análise estatística.

Palavras-chave: Modelo chuva-vazão; Tank Model; Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe.

INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial, assim se faz necessário compreender sobre sua disposição em diferentes partes do ciclo hidrológico, bem como conhecer dados sobre o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica. A compreensão sobre a bacia hidrográfica é importante tanto para planejamento e gestão, garantindo o acesso a água, como também para planejamento e implantação de obras hidráulicas (PEREIRA et al., 2016).

¹ Mestranda do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental-UFPB, cinthiamariaac@gmail.com;

² Mestranda do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental-UFPB, ingridydiniz1225@gmail.com;

³ Pós-graduanda em Segurança no Trabalho-FIP, andresaoliveira0311@gmail.com;

⁴ Mestrando do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - UFCG, tg.777@hotmail.com.

Dentre os dados que servem para entender a bacia hidrográfica, um de grande importância é a vazão, pois a partir dela é possível compreender sobre a disponibilidade e planejar dos usos múltiplos dos recursos hídricos, assim como as vazões mínimas servem para avaliar capacidade de recebimento de efluentes, vazões médias para dimensionar reservatórios e vazões máximas para projetar sistemas de segurança de barragens (CELESTE et al., 2014).

A obtenção de dados hidrometeorológicos no Brasil se iniciou desde o século XIX, e atualmente o país possui uma Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) coordenada pela Agência Nacional de Águas (ANA). Esse sistema que abriga 4.641 pontos de monitoramento no país, sendo 1.874 para medições como níveis, vazões, qualidade da água e transporte de sedimentos e outros parâmetros relacionados aos rios; E outros 2.767 postos que monitoram principalmente as chuvas (ANA, 2007).

Apesar da existência de monitoramento, muitas regiões do país ainda não possuem é notável a carência de registros históricos de séries hidrológicas. A falta de uma série hidrológica consistente se dá por possuir registros com a existência de falhas e/ou de séries curtas. No entanto a existência de uma série consistente é imprescindível, e a sua falta pode levar a inviabilidade de estudos hidrológicos. No Brasil, um dos dados de grande carência de séries hidrológicas consistentes são os dados de vazões. (MENDES et al., 2007; CELESTE et al., 2014).

Com intuito de viabilizar certos estudos hidrológicos, mesmo com o cenário de limitação de dados, têm-se desenvolvido e otimizado nos últimos anos inúmeros modelos hidrológicos. (PEREIRA et al., 2016). Tucci (1998) estabelece que os modelos hidrológicos são ferramentas empregadas para retratar os processos que ocorrem na bacia hidrográfica, bem como antever efeitos das diferentes ocorrências no tocante aos valores observados.

Assim através da modelagem hidrológica é possível verificar a consistência das séries de dados obtidas a partir das observações hidrológicas nas bacias hidrográficas (dados observados), para através desses dados realizar o processo de calibração dos modelos, de modo que esses possam gerar dados sintéticos consistentes e homogêneos em bacias que não possuem monitoramento (SANTOS, 2009).

Dentre os diversos modelos hidrológicos um de grande utilização são os modelos chuva-vazão que têm por objetivo determinar a vazão de um rio a partir da precipitação incidente na bacia hidrográfica, na qual o rio está inserido. Uma vez que as séries de chuva são normalmente mais longas do que as de vazão, os modelos chuva-vazão conseguem resolver essa problemática preenchendo as falhas e alongando as séries de dados (CELESTE et al., 2014).

A maioria dos modelos chuva-vazão desenvolvidos são da categoria conceitual, onde é necessário profundo entendimento dos processos hidrológicos envolvidos e das características físicas da bacia hidrográfica. Deste modo o principal dado de entrada é o montante precipitado na bacia em um intervalo de tempo considerado, assim quanto maior o número de registros na série de precipitação e sua melhor distribuição espacial na bacia, mais simples e mais preciso será o emprego do método. Porém, a modelagem do processo chuva-vazão é um problema não-linear que possui algumas imprecisões envolvidas, mas diversos estudos já abordaram várias aproximações para resolvê-lo (MENDES *et al.*, 2007; CELESTE *et al.*, 2014).

Atualmente existem diversos modelos hidrológicos de chuva-vazão, no entanto um bastante recomendado, por gerar bons resultados, é o Tank Model (Modelo de Tanques). Esse modelo tem sido empregado em estudos hidrológicos com os mais diversos fins, tais como no estudo de cheias, no preenchimento de falhas de séries hidrológicas e na avaliação das disponibilidades hídricas de bacias hidrográficas (PEREIRA *et al.*, 2016).

O Tank Model, foi um modelo desenvolvido no Japão, este simula o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica por meio de um conjunto de tanques em série, onde o armazenamento do primeiro tanque é determinado pela chuva e o armazenamento dos demais tanques é determinado pela infiltração do tanque superior. Uma das grandes vantagens do modelo é ele apresentar uma estrutura simples se comparado aos demais, além de ser de implementação fácil e ser o mais indicado para análise de períodos mais longos como o mês (SINGH e WOOLHISER, 2002; LARA e KOBIYAMA, 2012).

Um dos problemas, do uso de modelos hidrológicos é a indispensabilidade de definir parâmetros que não podem ser aferidos em campo (SANTOS *et al.*, 2011). Embora o Tank Model seja simples, envolve um alto grau de incerteza associado a dificuldade de calibrá-lo devido à falta de regras na obtenção dos parâmetros de ajuste. Todavia bons ajustes dependem da habilidade do modelador e/ou de técnicas de autocalibração (NUNES *et al.*, 2014).

Entende-se por calibração o ajuste dos parâmetros do modelo hidrológico, com o objetivo de se ter uma discrepância mínima entre os valores observados em campo e as previsões do modelo matemático, ou seja, uma tentativa de minimizar os desvios e erros mínimo cometidos na estimativa do modelo. Além disso, atualmente problemas de calibração têm sido tratados como problemas de otimização, assim os erros e desvios dos modelos também podem ser relacionados em termos de eficiência deste (BRAVO *et al.*, 2007).

Entretanto, a calibração de modelos hidrológicos é uma tarefa difícil, pois necessita que o pesquisador tenha um vasto entendimento sobre o comportamento do modelo e parâmetros empregados. Além do conhecimento do modelo, a escolha da técnica também influencia muito

na coalização, a técnica de calibração tentativa e erro pode apresentar problemas quanto ao tendência de valores, bem como o ajuste automático pode apresentar limitações quanto a solução com mínimos locais, solução matemática com parâmetros distantes da realidade física, limitações das funções objetiva, entre outros (COLLISCHONN e TUCCI, 2003; MENDES *et al.*, 2007).

Contudo, este estudo objetiva a aplicação de um modelo chuva-vazão conceitual, Tank Model, de modo a investigar o desempenho deste modelo em distintos eventos de vazão. .

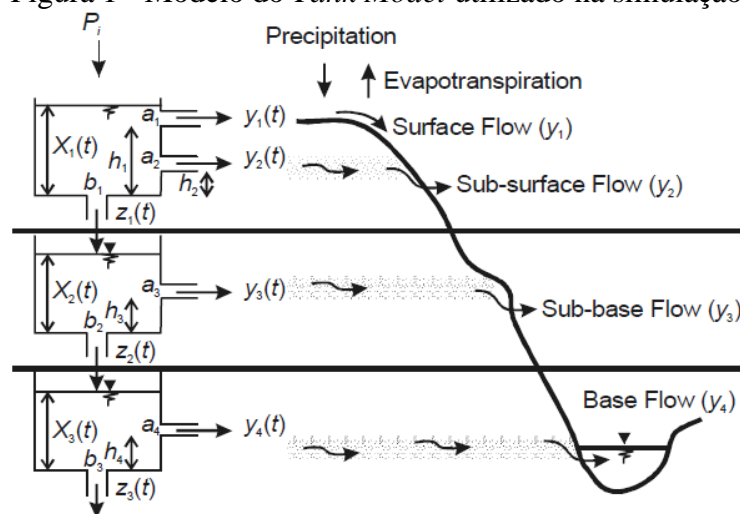
METODOLOGIA

Definição do modelo

Para o estudo foi considerado um modelo de três tanques arranjados verticalmente em série (Figura 1).

A interpretação do modelo se dá pela análise de cada tanque, no primeiro a saída de água, através das duas saídas laterais, refere-se conceitualmente aos escoamentos de superfície e hipodérmico. A água que sai do primeiro tanque para o segundo, chega à saída lateral e é equívale ao escoamento intermediário. No último tanque, o fluxo através da saída lateral do corresponde ao fluxo de base ou subterrâneo. Com isso, a soma total de todas essas saídas laterais, corresponde a vazão do rio estudado (GALVÃO e VALENÇA, 1999).

Figura 1 - Modelo do *Tank Model* utilizado na simulação.



Fonte: Santos et al. (2011)

A associação entre os tanques e o processo hidrológico da bacia é feita utilizando as seguintes equações:

$$y_1(t) = a_1[X_1(t) - h_1] \quad (\text{Eq. 1})$$

$$y_2(t) = a_2[X_1(t) - h_2] \quad (\text{Eq. 2})$$

$$y_3(t) = a_3[X_2(t) - h_3] \quad (\text{Eq. 3})$$

$$y_4(t) = a_4[X_3(t) - h_4] \quad (\text{Eq. 4})$$

$$Z_1(t) = b_1X_1(t) \quad (\text{Eq. 5})$$

$$Z_2(t) = b_2X_2(t) \quad (\text{Eq. 6})$$

$$Z_3(t) = b_3X_3(t) \quad (\text{Eq. 7})$$

$$Q(t) = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 \quad (\text{Eq. 8})$$

$$X_1(t) = X_1(t - 1) + P(t) - y_1(t) - y_2(t) - Z_1(t) \quad (\text{Eq. 9})$$

$$X_2(t) = X_2(t - 1) - Z_1(t) - y_3(t) - Z_2(t) \quad (\text{Eq. 10})$$

$$X_3(t) = X_3(t - 1) - Z_2(t) - y_4(t) - Z_3(t) \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde $y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_3(t)$ e $y_4(t)$ são os escoamentos no dia t ; $z_1(t)$, $z_2(t)$ e $z_3(t)$ são os valores de infiltração de cada tanque; $X_1(t)$, $X_2(t)$ e $X_3(t)$ são os armazenamentos em; $Q(t)$ é a vazão total e $P(t)$ é a precipitação.

Já os parâmetros a serem otimizados são o de escoamento a_1 , a_2 , a_3 e a_4 ; a infiltração b_1 , b_2 e b_3 ; e a altura das saídas de escoamento h_1 , h_2 , h_3 e h_4 .

Assim, todas as equações foram implementadas em forma de tabela e relacionadas com os parâmetros.

No entanto, algumas das equações (Eq. 9, Eq. 10 e Eq. 11) apresentavam certa peculiaridade. Por esse motivo foi necessário utilizar nos cálculos a ferramenta referência circular, que acontecem quando fórmulas que se referem a si mesmas. No software Excel, são disponibilizadas ferramentas que possibilitam este tipo de cálculo, seja ele do modo automático ou manual. Assim é possível revolver problemas que utilizemos fórmulas que se referem a si mesmas, como os das equações do estudo (SANTOS e NUNES, 2013).

Dados de Precipitação e Vazão

Para aplicação do método é necessário dados hipotéticos de eventos de precipitação ocorridos em 2 anos, devido às limitações do método, os dados foram agrupados em médias mensais (24 meses), como expostos no Quadro 1.

No entanto como o objetivo do estudo é realizar a otimização dos parâmetros de escoamento, infiltração e alturas das saídas de escoamento, também foram utilizados dados de vazão (Quadro 2). Além disso, foram relacionados nove eventos de vazão, com dados agrupados para os 24 meses, de modo que pudesse ser avaliado para no estudo a calibração em distintos cenários de vazão.

Mesmo sendo arbitrados de forma hipotética, os valores de pressão e vazão seguem uma coerência de eventos ocorridos em bacias reais.

Quadro 1- Precipitação média mensal dos dois anos.

Média mensal P												
Ano	1											
Mês	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Média	1.71	2.69	6.13	3.33	5.58	4.17	2.42	7.61	1.97	1.65	2.03	2.13
Ano	2											
Mês	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Média	1.42	2.21	3.26	2.97	4.13	14.37	15.48	8.19	10.43	2.10	3.13	1.65

Fonte: Autora (2020)

Quadro 2- Vazão média mensal dos dois anos.

Mês Ano 1	Média mensal Q								
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9
01	1,43	1,33	2,04	2,24	1,91	0,11	2,26	1,04	1,22
02	1,06	1,72	1,68	1,51	1,03	0,16	0,99	0,88	1,15
03	5,04	4,48	3,60	3,95	2,15	1,21	3,93	2,03	2,51
04	4,27	4,83	4,51	4,26	3,74	0,95	3,84	3,56	3,75
05	5,09	4,91	4,77	4,89	4,42	1,40	4,89	4,11	4,42
06	3,25	3,44	4,08	4,00	2,98	0,90	3,09	4,23	3,10
07	3,80	4,14	4,18	3,89	3,71	1,03	3,61	4,28	3,84
08	6,15	5,55	5,21	5,47	5,13	2,03	5,95	4,55	5,58
09	1,71	2,41	3,49	3,17	2,90	0,74	2,14	4,35	2,71
10	2,37	2,56	2,95	2,63	2,14	0,85	1,73	3,59	2,52
11	1,84	1,97	2,32	2,10	1,90	0,74	1,69	2,95	2,28
12	1,65	1,83	2,09	1,93	1,72	0,71	1,61	2,54	2,16
Mês Ano 2	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9
01	1,69	1,87	1,98	1,82	1,63	0,70	1,60	2,30	2,03
02	1,13	1,06	1,49	1,59	1,39	0,71	1,15	1,89	1,85
03	2,72	2,64	2,40	2,31	1,44	0,96	1,80	2,10	2,17
04	1,75	1,95	2,24	2,26	1,86	0,81	2,17	2,29	1,93
05	4,78	4,74	4,09	3,97	3,16	1,48	3,91	3,15	3,94
06	7,00	5,55	5,25	6,24	5,54	2,63	7,92	3,87	5,65
07	17,54	16,57	13,50	14,35	16,71	7,00	18,08	8,66	16,63
08	11,41	12,32	12,95	12,21	11,57	5,09	10,12	11,31	12,20
09	9,11	8,94	10,42	10,12	8,61	4,21	8,77	10,76	9,10
10	3,27	4,14	6,44	5,55	3,85	1,96	3,13	8,83	4,25
11	3,09	3,14	4,27	3,71	2,55	1,56	2,25	6,39	3,20

12	1,76	2,18	2,93	2,43	2,32	1,25	2,03	4,73	2,55
Média	4,29	4,34	4,54	4,44	3,93	1,63	4,11	4,35	4,20

Fonte: Autora (2020)

Avaliação do modelo

Para avaliar o desempenho do modelo é feita a comparação dos dados mensais de vazão calculados com os dados de vazão observados, de modo que quão mais próximos os valores, melhor será o comportamento do modelo. Neste estudo, essa comparação foi realizada no modelo gráfico para que as comparações ficassem mais claras e objetivas.

Além disso, também foi realizada a avaliação estatística do ajuste do modelo utilizando o Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (COE). Segundo Machado & Vettorazzi (2003), o coeficiente (COE) é um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos. Os valores do coeficiente variam entre infinito negativo a 1, sendo o valor 1 indica um ajuste perfeito, no entanto quando o valor de COE ser maior que 0,75, o desempenho do modelo é considerado bom, para valores de entre 0,36 e 0,75, o desempenho é considerado aceitável, enquanto valores de COE inferiores a 0,36 fazem com que o modelo seja julgado como inaceitável (SILVA et al., 2008). Para cálculo do COE é utilizada a seguinte equação:

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Qo(i) - Qc(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Qo(i) - \overline{Qc}]^2} \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde Qo é a vazão observada; Qc é o evento calculado pelo modelo; \overline{Qc} a média do evento observado no período de simulação; e n o número de eventos.

Ainda, para encontrar valores para as equações e parâmetros foi habilitado o cálculo iterativo. Segundo Fernandes (1997) iteração significa a repetir sucessivamente um processo, desse modo pode-se associar os métodos iterativos aos conceitos de aproximação sucessiva. De modo simples, os métodos iterativos buscam resolver funções aproximando a sua solução com a solução de outra função que seja mais simples de resolver. Para chegar a solução aproximada o método iterativo busca uma primeira aproximação para a solução do problema numérico (aproximação inicial), e posteriormente realiza sucessivas repetições até que o procedimento iterativo seja forçado a finalizar por meio da definição dos testes de paragem ou restrições.

Como o problema foi implementado no software Excel, teve-se um limite de estabelecido pelo software de 32.767 iterações, além de ser definido o número máximo de

alterações em três casa decimais (0,001). Também foram utilizadas três restrições para o modelo de iteração automática, uma cujo os parâmetros possuíssem valores positivos, outra no qual a vazão calculada ser igualada a vazão observada e por último encontrar o máximo valor do coeficiente COE.

Dentre os métodos de iteração disponíveis no software foi escolhido o de Programação não-linear do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), sendo este método indicado para solucionar problemas que apresentem a estrutura de uma função objetivo não linear e restrições lineares (GOMES et. al., 2017). Devido ter seu algoritmo implementado no pacote Solver do Excel e devido a sua facilidade de implantação o GRG é o método mais empregado na resolução de problemas com múltiplas respostas. No entanto, o método apresenta limitações, sendo a maior o fato de que é necessário que a estimativa inicial dos parâmetros seja próxima ao valor do ponto ótimo, pois assim tendo um valor próximo, tem-se a garantia de convergência para o ponto ótimo (KÖKSOY e YALCINOZ, 2006).

Assim, foi utilizado como estimativa inicial o valor de 0,1 para o parâmetro escoamento (a_1 , a_2 , a_3 e a_4) com base em exemplos práticos de outras bacias hidrográficas, e os parâmetros de infiltração (b_1 , b_2 e b_3) e a altura das saídas de escoamento (h_1 , h_2 , h_3 e h_4) tiveram seus valores estimados a partir do método de iteração automático, de modo a se obter o valor de COE em todos os testes.

RESULTADOS

Para aplicação do modelo foi utilizado como valores iniciais de $X_1 = 0.00$ mm, $X_2 = 0.00$ mm e $X_3 = 100.00$ mm., definidos com base no estudo de Santos *et al* (2011).

O modelo foi aplicado, então iniciou-se o processo de calibração de modo a encontrar o valor de COE mais próximo de 1, bem como o resultado da vazão calculada mais próximo da vazão observada. Assim, os valores de armazenamento foram alterados para $X_1 = 10.00$ mm, $X_2 = 10.00$ mm e $X_3 = 100.00$ mm.

A partir das estimativas iniciais dos parâmetros e da utilização do método de iteração automática obteve-se os valores de escoamento (y_n), os valores de infiltração (z_n), os armazenamentos (X_n) e da vazão calculada (Q_c) expostos para cada um dos eventos de vazão. No Quadro 3, estão expressos os valores para o primeiro evento de vazão (Q_1), os valores dos demais eventos não foram expressos, pois o estudo teve como enfoque a comparação entre os valores de vazão observada e vazão calculada, e como definido na metodologia esses valores foram expressos pela forma gráfica para melhorar o entendimento (Figura 2 a 10).

Quadro 3- valores de escoamento, infiltração, armazenamento e vazão.

P	Escoamentos				Infiltração			Armazenamentos			Qo	Qc
	y1 (t)	y2 (t)	y3 (t)	y4 (t)	z1 (t)	z2 (t)	z3 (t)	X1 (t)	X2 (t)	X3 (t)		
								10	10	100		
1,710	0,954	0,998	0,242	0,907	2,129	0,083	5,602	7,629	11,804	93,574	1,434	3,101
2,690	0,822	0,829	0,275	0,849	1,891	0,094	5,243	6,776	13,327	87,576	1,059	2,774
6,129	1,067	1,144	0,316	0,794	2,333	0,107	4,908	8,361	15,237	81,981	5,038	3,321
3,333	0,952	0,996	0,352	0,743	2,126	0,119	4,596	7,619	16,893	76,762	4,270	3,043
5,581	1,095	1,180	0,392	0,695	2,384	0,132	4,304	8,541	18,752	71,895	5,093	3,362
4,167	1,049	1,120	0,429	0,650	2,300	0,144	4,033	8,240	20,479	67,356	3,250	3,248
2,419	0,854	0,870	0,458	0,609	1,950	0,154	3,779	6,985	21,816	63,122	3,798	2,791
7,613	1,228	1,350	0,500	0,570	2,623	0,168	3,543	9,397	23,771	59,176	6,153	3,649
1,967	0,921	0,956	0,530	0,534	2,070	0,177	3,323	7,417	25,134	55,497	1,706	2,941
1,645	0,702	0,676	0,550	0,501	1,677	0,184	3,117	6,007	26,077	52,063	2,374	2,429
2,033	0,605	0,552	0,566	0,469	1,502	0,189	2,925	5,382	26,823	48,858	1,838	2,192
2,129	0,555	0,487	0,580	0,440	1,411	0,194	2,746	5,057	27,461	45,866	1,650	2,062
1,419	0,456	0,362	0,590	0,413	1,235	0,197	2,579	4,424	27,910	43,071	1,688	1,820
2,214	0,472	0,381	0,600	0,387	1,262	0,200	2,422	4,523	28,372	40,462	1,131	1,840
3,258	0,580	0,520	0,613	0,363	1,458	0,205	2,277	5,223	29,012	38,027	2,716	2,077
2,967	0,619	0,570	0,628	0,341	1,527	0,209	2,141	5,473	29,701	35,755	1,750	2,158
4,129	0,753	0,742	0,648	0,320	1,769	0,216	2,014	6,338	30,606	33,637	4,781	2,463
14,367	1,809	2,093	0,707	0,301	3,666	0,235	1,896	13,137	33,331	31,674	6,996	4,909
15,484	2,561	3,056	0,792	0,283	5,019	0,263	1,788	17,984	37,295	29,866	17,541	6,692
8,194	2,329	2,759	0,867	0,267	4,602	0,287	1,688	16,489	40,743	28,198	11,409	6,221
10,433	2,400	2,849	0,942	0,252	4,729	0,312	1,596	16,944	44,218	26,662	9,114	6,443
2,097	1,651	1,890	0,987	0,238	3,382	0,326	1,511	12,118	46,287	25,240	3,265	4,765
3,133	1,290	1,429	1,017	0,225	2,734	0,336	1,432	9,797	47,668	23,919	3,089	3,961
1,645	0,928	0,966	1,032	0,213	2,083	0,341	1,358	7,465	48,379	22,689	1,761	3,139

Fonte: Autora (2020)

Quanto aos valores dos parâmetros (an, bn, hn) estes estão expressos no Quadro 4.

Quadro 4- Valores dos Parâmetros.

Parâmetros									
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9
a1	0,155	0,106	0,101	0,097	0,105	0,105	0,106	0,098	0,100
a2	0,199	0,108	0,099	0,112	0,142	0,109	0,099	0,106	0,100
a3	0,022	0,110	0,103	0,063	0,091	0,102	0,131	0,080	0,100
a4	0,010	0,038	0,099	0,059	0,032	0,086	0,045	0,060	0,100
b1	0,279	0,248	0,247	0,359	0,214	0,215	0,217	0,186	0,248
b2	0,007	0,004	0,004	0,003	0,002	0,002	0,003	0,005	0,004

b3	0,060	0,065	0,066	0,057	0,07	0,065	0,062	0,052	0,065
h1	1,483	1,559	1,556	2,022	2,559	2,399	2,822	2,025	1,559
h2	2,604	3,252	3,277	2,597	2,264	2,371	3,219	2,626	3,252
h3	0,618	0,369	0,365	0,466	0,414	0,396	0,313	0,412	0,369
h4	0,972	1,320	1,329	0,908	0,735	0,758	0,965	1,278	1,320

Observando os valores dos parâmetros pode-se verificar que o método de iteração manteve os valores do parâmetro de escoamento (a_1 , a_2 , a_3 e a_4) bem próximo da estimativa inicial sendo a maior variação positiva de 0,099 (no parâmetro a_2 no evento Q1) e a negativa de -0,078 (no parâmetro a_3 no evento Q1). Ainda, no evento Q9 observada nenhuma variação na estimativa inicial dos parâmetros de escoamento (a_1 , a_2 , a_3 e a_4).

A medida que havia variação dos valores de escoamento, também haviam variações nos parâmetros de Infiltração e de Altura das saídas de escoamento. O Quadro 5 relaciona a média das variações dos parâmetros em cada evento de vazão, e a Figura 2 retrata a relação entre a variação dos valores de escoamento e dos demais parâmetros.

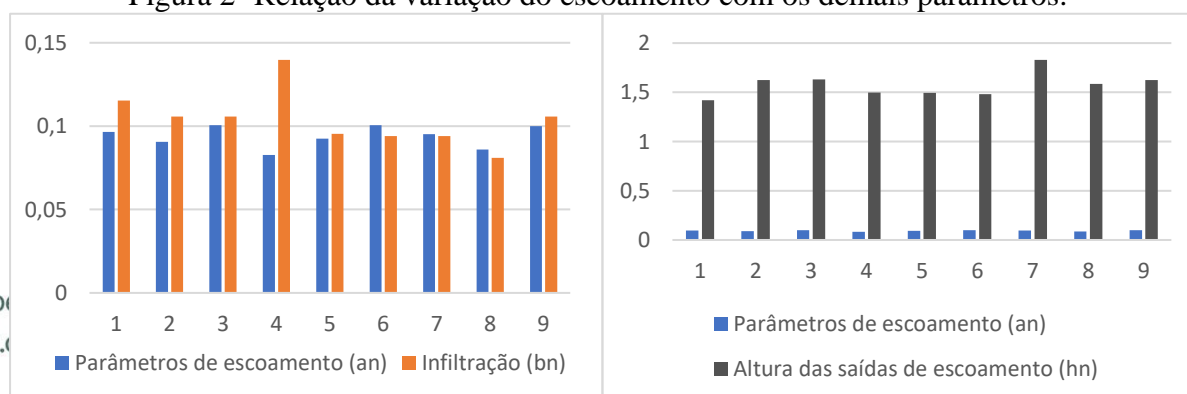
Quadro 5- Média dos parâmetros em cada evento.

Eventos	Médias dos Parâmetros		
	Escoamento (an)	Infiltração (bn)	Altura das saídas de escoamento (hn)
Q1	0,0965	0,115333	1,41925
Q2	0,0905	0,105667	1,625
Q3	0,1005	0,105667	1,63175
Q4	0,08275	0,139667	1,49825
Q5	0,0925	0,095333	1,493
Q6	0,1005	0,094	1,481
Q7	0,09525	0,094	1,82975
Q8	0,086	0,081	1,58525
Q9	0,1	0,105667	1,625

Fonte: Autora (2020)

Pela observação dos gráficos verifica-se que a variação da infiltração acompanhou a variação do escoamento, tendo o maior desvio no evento x, já a variação média da altura das saídas de escoamento foi bem maior em todos os eventos do que a variação média do escoamento.

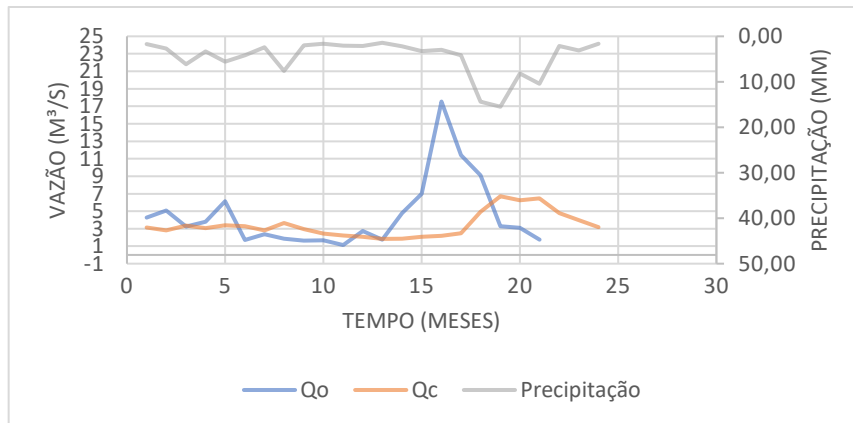
Figura 2- Relação da variação do escoamento com os demais parâmetros.



Fonte: Autora (2020)

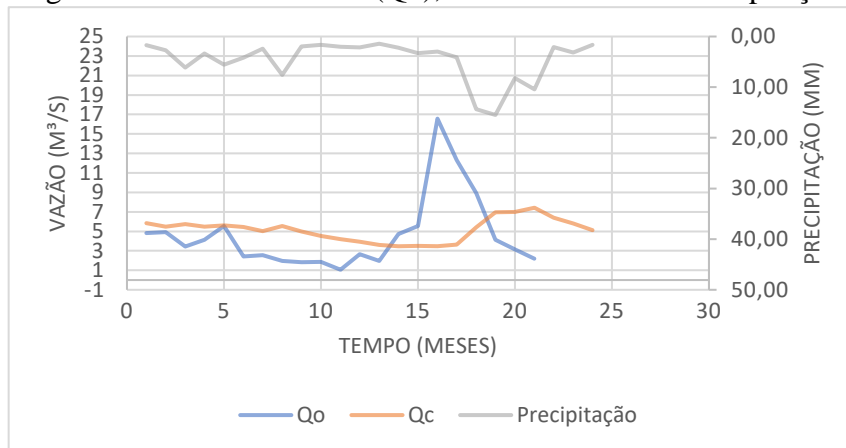
Os dados de vazão observada, vazão calculada e precipitação podem ser confrontados de forma gráfica para cada evento de vazão, a partir do expresso na Figura 3 á 11.

Figura 3- Vazão observada (Q1), vazão calculada e Precipitação.



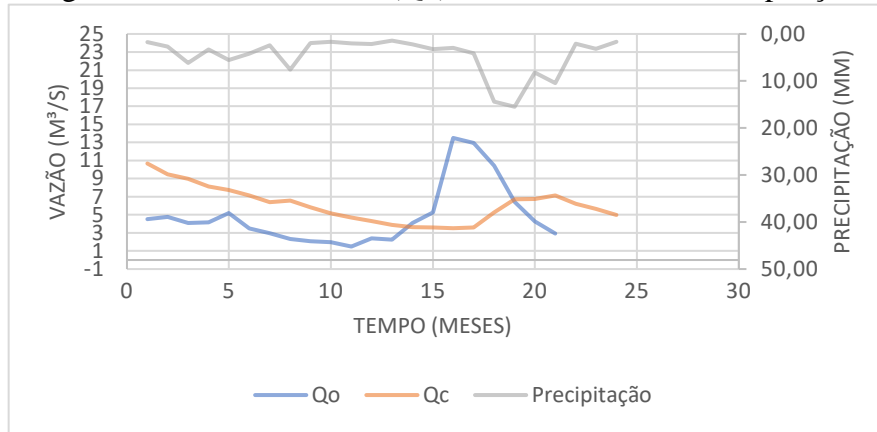
Fonte: Autora (2020)

Figura 4- Vazão observada (Q2), vazão calculada e Precipitação.



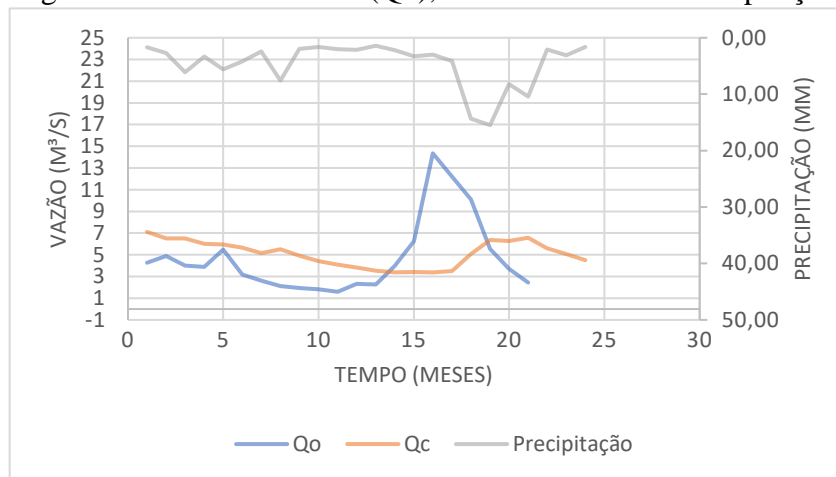
Fonte: Autora (2020)

Figura 5- Vazão observada (Q3), vazão calculada e Precipitação.



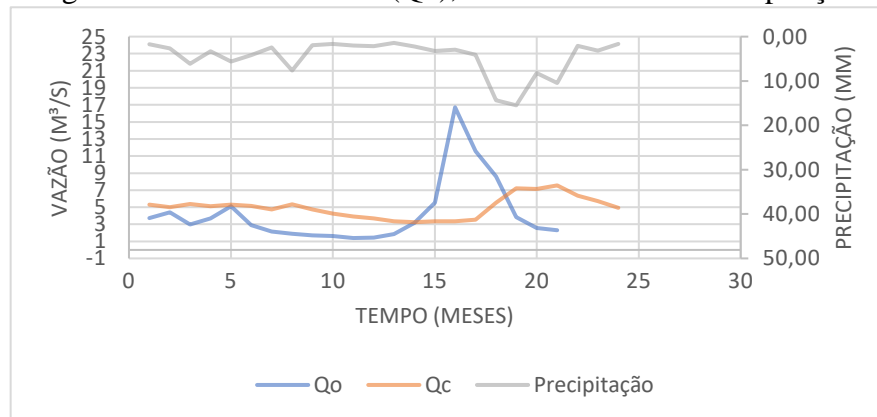
Fonte: Autora (2020)

Figura 6- Vazão observada (Q4), vazão calculada e Precipitação.



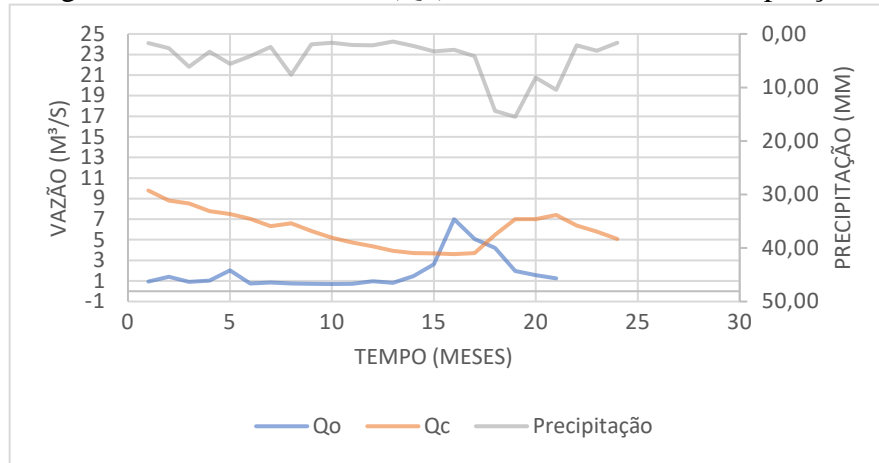
Fonte: Autora (2020)

Figura 7- Vazão observada (Q5), vazão calculada e Precipitação.



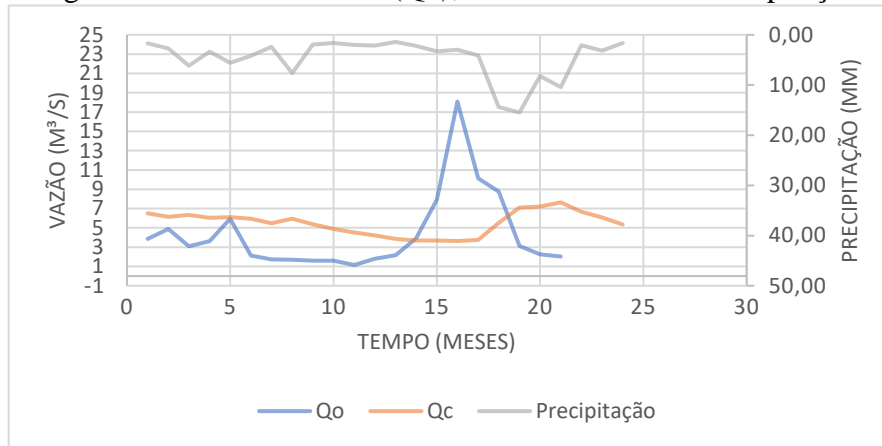
Fonte: Autora (2020)

Figura 8- Vazão observada (Q6), vazão calculada e Precipitação.



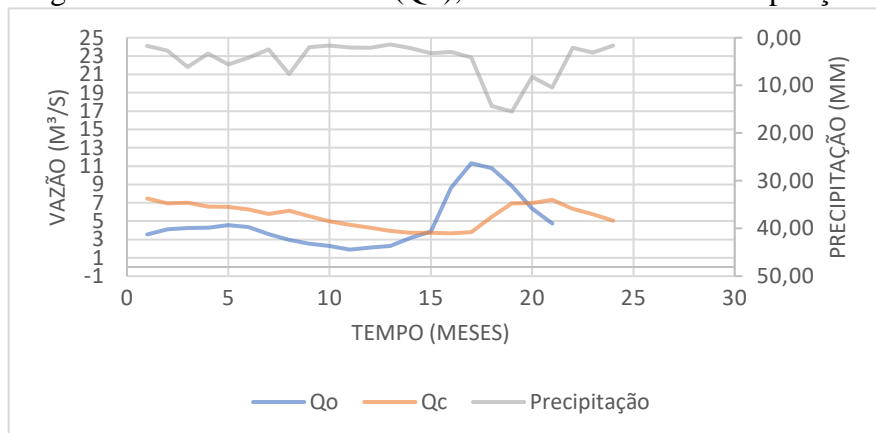
Fonte: Autora (2020)

Figura 9- Vazão observada (Q7), vazão calculada e Precipitação.



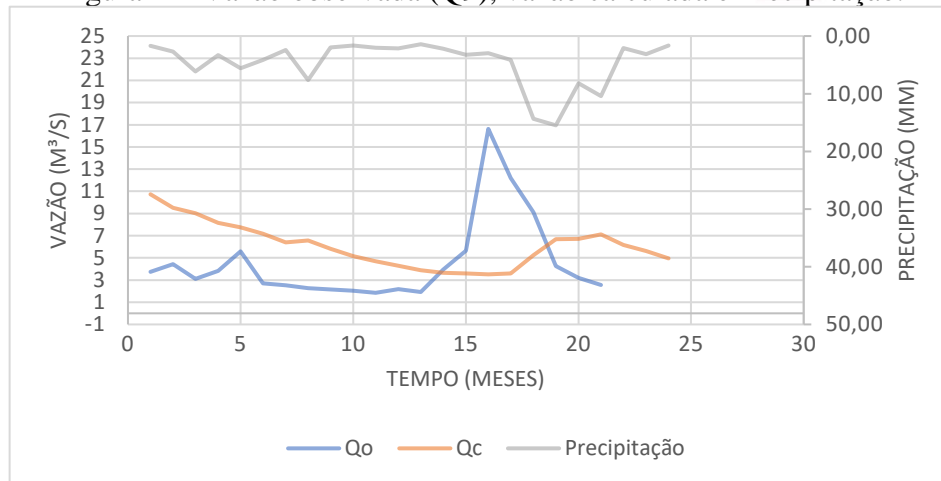
Fonte: Autora (2020)

Figura 10- Vazão observada (Q8), vazão calculada e Precipitação.



Fonte: Autora (2020)

Figura 11- Vazão observada (Q_o), vazão calculada e Precipitação.



Fonte: Autora (2020)

A partir da observação das figuras observa-se que o comportamento da vazão observada apresenta dois picos de variação do valor, um no tempo de cinco meses, próximo ao valor de 5 m³/s, e outro pico entre os 15-20 meses com o valor próximo aos 17 m³/s, fora esses dois picos a vazão se manteve nos outros meses em valores abaixo do 5 m³/s.

No entanto, a vazão calculada não conseguiu representar em nenhum dos casos os dois picos do comportamento da vazão observada, isso acontece devido os métodos de iteração automática apresentarem entre suas limitações a representação de picos máximos e mínimos. Ainda, pode-se observar que na maioria dos eventos o comportamento da vazão calculada se manteve acima do primeiro pico, tendo a maior variação acima do pico no sexto evento (Q₆) e a maior variação abaixo do pico no primeiro evento (Q₁). No segundo pico todos os eventos apresentaram a vazão calculada abaixo da observada.

Por fim foram calculados os Coeficientes de Eficiência de Nash e Sutcliffe (COE) para cada evento de vazão. Os valores estão expostos no quadro 6 e a análise dos valores mostra que para maioria dos casos o modelo apresentou um desempenho julgado como inaceitável (COE < 0,35), sendo apenas no primeiro evento (Q₁) o desempenho foi considerado aceitável (0,36 < COE < 0,75).

Quadro 6- Cálculo do COE

COE									
Evento	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆	Q ₇	Q ₈	Q ₉
COE	0,443	0,284	-0,351	0,19	0,314	-8,547	0,132	-0,009	-0,453

Fonte: Autora (2020)

4. CONCLUSÃO

Com a análise dos resultados pode-se concluir, que os valores de vazão calculados pelo modelo tiveram um comportamento distante dos valores da vazão observada, diferindo mais significativamente na região de maior pico da vazão observada.

Quanto a análise estatística do modelo, mostra que o desempenho do modelo, com base no valor de COE, é inaceitável na maioria dos casos e aceitável apenas para um caso. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de o método escolhido apresentar como limitação o fato de a estimativa inicial ter que ser próxima ao valor ótimo, como a estimativa inicial foi a mesma para todos os casos, essa se aproximou do valor ótimo em apenas um caso e se distanciou desse valor nos demais.

Assim para trabalhos futuros aconselha-se realizar algumas alterações manuais dos valores dos parâmetros para que a estimativa inicial se aproxime do valor ótimo de cada evento, de modo a melhorar os resultados. Esse teste foi feito no primeiro evento e o desempenho desse subiu para um valor de COE de 0,66, no entanto como o objetivo do trabalho era focado em analisar o desempenho automático do modelo, os testes manuais não prosseguiram.

Ainda podem ser utilizados outros métodos de iteração com algoritmos implementados no programa Excel tais como o LP simplex e Evolutionary, e assim realizar a comparação do desempenho desses com o método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), empregado nesse trabalho.

No mais, a partir do estudo foi possível comprovar a importância da aplicação da modelagem hidrológica junto a métodos de análise estatística, pois como a modelagem busca gerar valores mais próximos aos reais, é importante poder medir e buscar melhor a proximidade entre os valores observados e calculados.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS- ANA. Evolução da rede hidrometeorológica nacional. Superintendência de Administração da Rede Hidrometeorológica. Brasília: ANA, v. 1, n. 1, abr. 2007, 15p.

BRAVO, J. M.; PICCILLI, D. G. A.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C. E. M. **Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH II com fins educacionais.** In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, ABRH, p. 1-20, 2007.

CELESTE, A. B.; MENEZES, T. L. A.; FONTES, V. A. Modelagem do processo chuva-vazão pelo Tank Model e por redes neurais artificiais na bacia do rio Japarutuba , Sergipe. **Scientia Plena** , v. 10, n° 07, p. 1–13, 2014.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (2003). Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um

modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 3, p. 27-39.

FERNANDES, E. M. G. P. **Computação Numérica**. Braga: Universidade do Minho, p. 414, 2 ed., 1997

GALVÃO, C. D. O.; VALENÇA, M. J. S. **Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e sistemas ambientais**. Porto Alegre, Brasil, Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, 1999.

GOMES, F. M.; PEREIRA, F. M.; MARINS, F. A. S.; SILVA, M. B. Estudo comparativo entre os métodos gradiente reduzido generalizado e algoritmo genético em otimização com múltiplas respostas. **Revista Produção Online**, Florianópolis, SC, v.17, n. 2, p. 592-619, 2017.

KÖKSOY, O.; YALCINOZ, T. Mean square error criteria to multiresponse process optimization by a new genetic algorithm. **Applied Mathematics and Computation**, v. 175, n. 2, p. 1657-1674, 2006.

MACHADO, R.E; VETTORAZZI, C.A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, SP. **R. Bras. Ci. Solo**, V. 27, p. 735-741, 2003.

MENDES, T. A.; VIEIRA, M. E. A.; FRANCO, C.; FORMIGA, T. M.; BARBALHO, F. D. Aplicação Do Tank Model Na Modelagem Da Bacia. **XVIII Simposio brasileiro de recursos hídricos**, p. 1–15, 2007.

LARA, P. G. DE; KOBIYAMA, M. Proposta de Modelo Conceitual: PM *Tank Model*. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2003, p. 149–161, 2012.

NUNES, F.; S. M.; FARIAS, C. A. S.; MARTINS, W. A.; ALMEIDA, R. N.; LEITE, J. C. A. Application of the Tank Model for estimating monthly stream flows in piacó river basin. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 9, n. 1, p. 343–349, 2014

SANTOS, A.C.F.; NUNES, L.N. Utilizando analogias para a visualização de equipotenciais com uma planilha de dados. **Rev. Bras. Ensino Fís.**, vol.35, no.2, São Paulo, 2013.

SANTOS, C. A. G.; FREIRE, P. K. M. M.; MISHRA, S. K.; SOARES, A. Application of a particle swarm optimization to the tank model. **IAHS-AISH Publication**, v. 347, p. 114–120, 2011.

SANTOS, L. L. Modelos hidráulicos-hidrológicos: Conceitos e Aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife-PE, Vol.2, n.03, p. 01-19, 2009.

SILVA, P.M.O.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M. & COELHO, G. Modelagem da hidrografia de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **R. Bras. Eng. Agric. Amb.**, v. 12, p.258-265, 2008.

SINGH, V. P.; WOOLHISER, D. A. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology.
Journal of Hydrologic Engineering, v. 7, n.4, p.270 – 292, 2002.

PEREIRA, T. S. R.; SANTOS, K. A.; SILVA, B. F.; FORMIGA, K. T. M.; SOARES, A. K.
Desenvolvimento De Um Modelo Chuva-Vazão Via Tank Model E Calibração Automática.
REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 11, n. 3, 2016.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 1 Ed. Universidade /UFRGS/Associação Brasileira
de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 668p, 1998.