



ESTABELECIMENTO DAS CURVAS-CHAVE, GERAÇÃO DAS SÉRIES DE VAZÕES E ESTIMATIVA DAS VAZÕES MÁXIMAS OUTORGÁVEIS NOS POSTOS DA SUB-BACIA GUAPI-MACACU, RJ

Eduardo Cochrane Novo

eduardocnovo@gmail.com

Universidade Federal Fluminense –
UFF, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil.

**Mônica de Aquino Galeano
Massera da Hora**

dahora@vm.uff.br

Universidade Federal Fluminense –
UFF, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil.

RESUMO

A crescente demanda dos usos da água, o aumento populacional e a ocorrência de eventos climáticos extremos colocam a disponibilidade hídrica em foco. Em diferentes lugares do mundo, a água já não se encontra de forma tão abundante quanto há décadas. O abastecimento humano continua sendo a maior preocupação e a prioridade em políticas voltadas aos usos dos recursos hídricos, no entanto, setores como indústria, agricultura e energia demandam quantidades significativas de água, além da manutenção de sistemas ambientais dependentes desse recurso natural. Todas essas questões evidenciam o conflito vivido atualmente quanto ao uso e aproveitamento hídrico. Uma gestão integrada e sustentável são alicerces fundamentais para a manutenção qualitativa e quantitativa dos recursos hídricos. A outorga é um instrumento legal para a garantia do uso da água por tempo e volume determinado, seja para fins de captação ou lançamento de efluentes, e para sua aprovação, são necessários estudos hidrológicos para a estimativa da vazão a ser outorgada, também denominada de vazão máxima outorgável. O presente estudo definiu as curvas-chave e as séries de vazões diárias das estações fluviométricas inseridas na bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, localizada na porção leste da Baía de Guanabara. Com base nos resultados, propõe-se a adoção de uma nova vazão máxima outorgável, visando um cenário de escassez hídrica que garanta o uso integrado e sustentável da água na bacia.

Palavras-chave: Vazões mínimas; Outorga; Curva-chave; Gestão dos recursos hídricos; Curva de permanência.



1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, mudanças climáticas e o aumento dos usos dos recursos hídricos acarretaram vulnerabilidade da segurança hídrica em bacias do mundo. É necessário adotar medidas apropriadas para minimizar a escassez de água, melhorar a qualidade e promover a partilha equitativa de recursos hídricos entre a sociedade e a natureza (Kattel, 2019).

A Agência Europeia Ambiental (European Environment Agency - EEA, 2018) estima que cerca de um terço do território da União Europeia esteja exposto a condições de estresse hídrico, permanente ou temporariamente. De acordo com a Agência países como Grécia, Portugal e Espanha já registram secas graves durante os meses do verão, mas a escassez de água também começa a ser um problema nas regiões setentrionais, incluindo partes do Reino Unido e Alemanha.

Para uma gestão eficaz da água e atendimento das demandas atuais e futuras de água doce, os recursos hídricos devem ser adequadamente gerenciados. É ideal que sejam considerados os aspectos sociais, como a aceitação pública, cultura e história regional, assim como aspectos econômicos, investimentos em infraestrutura e tecnologia de água, para o planejamento da proteção sustentável de ecossistemas naturais (Shen; Varis, 2000).

Na Europa, o esforço para controlar a qualidade das águas resultou na publicação da Directiva Quadro da Água, em 2000, principal instrumento da política da União Europeia relativa à água, do Parlamento Europeu. O documento apresenta procedimentos para proteção das águas superficiais continentais, das águas de transição, das águas costeiras e das águas subterrâneas, visando alcançar um bom estado para os mananciais no prazo de quinze anos, a partir de estabelecimento de metas progressivas (European Union; Council of the European Union, 2000).

Nos Estados Unidos, o Clean Water Act (CWA) estabelece a estrutura básica que regula os padrões de qualidade das águas superficiais. O CWA incorpora critérios de controle de qualidade para proteger ecossistemas aquáticos dos efeitos nocivos da alteração hidrológica. Um de seus programas, o Water Quality Standards (WQS), em particular, inclui critérios de qualidade da água para proteger usos designados que influenciem na vida aquática, e na saúde humana, a partir de critérios de concentrações máximas definidas de acordo com vazões mínimas específicas (U.S. EPA, 2017).

A gestão dos recursos hídricos no Brasil é embasada nos marcos legais básicos do Código das Águas, estabelecido pelo Decreto Federal nº 24.643, de 10 de julho de 1934, na Constituição Federal de 1988 e na Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, intitulada Lei das Águas.

Como um instrumento da Política de Recursos Hídricos (Lei das Águas), a outorga foi implantada para assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água. Garante ao usuário outorgado o direito de acesso à água, uma vez que regulariza o seu uso em uma bacia hidrográfica. A outorga é um ato administrativo facultado pelo poder público outorgante (União, estados ou Distrito Federal), que garante ao requerente o direito de uso dos recursos hídricos pré-determinando o volume d'água a ser utilizado por um determinado tempo (Brasil, 1997).

Dada a necessidade do conhecimento e, conseqüentemente, da formulação matemática para a definição desse volume de água e do intervalo de tempo associado, do conceito de outorga foram derivados os termos: vazão máxima outorgável (VMO), vazão ecológica e disponibilidade hídrica (Hora, 2012).

A partir da fundamentação dessas três variáveis, será abordado nesse trabalho o estudo de caso da Sub-bacia Hidrográfica Guapi-Macacu, situada no estado do Rio de Janeiro e que vive uma situação de estresse hídrico, onde se demanda mais água do que se tem disponível na bacia (UFF/FEC, 2010). O conflito hídrico na sub-bacia se traduz por estar diretamente ligado ao abastecimento de 2,5 milhões de pessoas, possuir importância econômica na área de agricultura e estar localizado em seu interior o Polo Petroquímico do Estado do Rio de Janeiro (COMPERJ).

O presente trabalho propõe a adoção de um novo valor para a VMO, que auxilie na gestão mais equitativa entre os diferentes usos dos recursos hídricos e os ecossistemas aquáticos naturais. Além disso, busca demonstrar a dificuldade vivida no estado do Rio de Janeiro quanto à gestão e monitoramento hídrico.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Concessão de outorgas no Brasil

A primeira legislação elaborada para tratar da apropriação e uso das águas no Brasil foi o Código de Águas, Decreto Federal nº 24.643, de 10 de julho de 1934 (Brasil, 1934). Hoje, a gestão de recursos hídricos do Brasil está baseada na Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), definida na Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, intitulada "Lei das Águas". A PNRH implementou princípios para a gestão integrada e cobrança pelos usos, reconhecendo os recursos hídricos como um bem dotado de valor econômico, com o intuito de incentivar o uso consciente para a manutenção e preservação da disponibilidade hídrica (Brasil, 1997). De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), os usos da água no Brasil são principalmente



para irrigação, abastecimento humano e animal, industrial, geração de energia, mineração, aquacultura, navegação, turismo e lazer.

A competência para a concessão da outorga ocorre de acordo com a dominialidade do corpo hídrico onde será realizada a captação ou o lançamento dos efluentes. Assim, para corpos hídricos de domínio federal, a emissão dos atos de outorga é atribuída à ANA, e para águas de domínio dos estados ou do Distrito Federal, as solicitações deverão ser direcionadas aos órgãos estaduais e do Distrito Federal de gestão de recursos hídricos (ANA, 2013). Segundo Santos e Cunha (2013), essa política descentralizada é constituída por prerrogativas que visam um melhor aproveitamento da água.

A VMO é aquela disponível para o uso em um curso d'água, definida com base em análise de séries históricas de vazões médias diárias ou mensais, complementadas por estudos estatísticos, análise de frequência e, quando necessário, por regionalização de dados (UFF/FEC, 2010).

A VMO ou o volume a ser outorgado é determinado de acordo com as vazões de referência adotadas pelos órgãos gestores, respeitando a dominialidade dos corpos hídricos (Silva et al., 2006).

No presente estudo, serão utilizados como referência critérios para a concessão de outorgas do Instituto Estadual do Ambiente (INEA), atual órgão estadual gestor dos recursos hídricos do estado do Rio de Janeiro.

Vazões de referência

De acordo com Brandt et. al (2008), os indicadores de uso consuntivo são determinados com base em análises estatísticas de séries longas fluviométricas capazes de descrever a magnitude e a variação temporal das vazões e do regime hidrológico. Compreender a frequência e a duração de eventos hidrológicos extremos é fundamental para a gestão eficiente dos recursos hídricos, sejam eles inundações ou secas (Kroll et al., 2004).

Para Tasker (1987), as vazões mínimas são fundamentais no planejamento e projetos de abastecimento de água. A análise dos impactos ambientais, impactos econômicos, e a modelagem da qualidade da água de um curso d'água contribuem para melhora do nível da compreensão dos sistemas hídricos de fluxo naturais e regulados. O uso das vazões mínimas como referencial tende a assegurar a subsistência do ecossistema local, o que para Richter et al. (2003) é alcançada quando a integridade ecológica é protegida.

Estimativa das vazões de referência

Com base na Resolução CONAMA nº 357/2005, vazão de referência consiste na vazão atribuída à VMO (Brasil, 2005). Silva e Monteiro (2004) concluem que as vazões de referência mais utilizadas correspondem às vazões mínimas, que são responsáveis por indicar uma condição de escassez hídrica em um curso d'água.

De acordo com Hora (2012), duas abordagens têm sido mais usadas como critério para definição de vazões de referência: a $Q_{7,10}$ e a Q_{95} . A $Q_{7,10}$ representa a estimativa da vazão média mais baixa durante um período de 7 dias consecutivos, com um intervalo médio de recorrência de 10 anos, obtida por meio do ajuste de uma distribuição estatística (Gumbel, Weibull ou outra) (Bof et al., 2013). A Q_{95} é a vazão mínima que é superada em 95% do tempo, sendo calculada de forma estatística a partir da curva de permanência de sua série histórica (Young et al., 2000).

Curva-chave

Existem diversos métodos para medir a descarga líquida de um curso de água. Salvo alguns casos específicos, não é possível, na prática, conhecer diretamente a vazão em um dado instante, sendo as medições demoradas e caras. Para conhecer a vazão ao longo do tempo é estabelecida uma relação entre a altura do nível d'água (h) e a vazão (Q), já que é muito mais fácil medir a referida altura. O conhecimento dessa relação (curva-chave) permite substituir a medição contínua das descargas por uma medição contínua do nível da água (cotas) (Tucci, 2009). De acordo com o Tucci et al. (2009) para determinar as curvas-chaves é necessário conhecer um certo número de pares cota-vazão medidas em condições reais.

A relação cota-descarga é apresentada sob três formas geralmente associadas: a representação gráfica, a fórmula matemática e a tabela de calibragem (Jaccon; Cudo, 1989).

Na representação gráfica, a relação h versus Q é representada pela curva traçada em um sistema de eixos retangulares geralmente sob a forma $h=f(Q)$. A forma mais usual é a potencial, descrita na Equação 1, onde h é o nível da régua correspondente à vazão Q ; h_0 é o nível para o qual a vazão é nula; e a e b são constantes determinadas para um local (Jaccon; Cudo, 1989).

$$\text{Equação 1: } Q = a \cdot (h - h_0)^b$$

O traçado da curva-chave é a parte mais importante e mais complexa da preparação das curvas de calibragem. O problema básico está em traçar uma curva que melhor se ajuste aos pontos plotados. É indispensável que ao serem



plotadas as medições de vazão estejam identificadas por datas em uma tabela auxiliar ou no próprio gráfico (Brasil, 1982).

Em geral, o número de medições é insuficiente e/ou a distribuição é inadequada e a curva de calibragem incompleta, ela deve então ser extrapolada em suas extremidades. A extrapolação logarítmica utilizada no presente estudo, é basicamente aplicar na parte superior e inferior da curva um ajuste de uma expressão matemática potencial (como a da Equação 1), determinando graficamente o valor que retifica a parte superior da curva e extrapola a reta (Jaccon; Cudo, 1989).

A partir da curva-chave e dos valores de níveis d'água é possível a geração das séries históricas de vazões, que servem como base para projetos de diferentes usos de água, sendo indispensáveis à gestão sustentável dos recursos hídricos (Santos et al., 2009).

Curva de Permanência (Q_{95})

A curva de permanência descreve a relação entre a vazão de um curso de água e a sua frequência de ocorrência ao longo do tempo. O procedimento para obter a curva para cada estação fluviométrica é baseado na análise da frequência associada a cada vazão, que é determinada organizando as séries temporais de vazão, em ordem decrescente e a determinação da frequência acumulada (F_i) associado a cada valor da vazão, com base na Equação 2, em que N_{Q_i} é o número da ordem da vazão e N_T é o número total de dados de vazão, que é igual ao número de dias ou meses nas séries históricas (Bof et al., 2013).

$$\text{Equação 2: } F_i = \frac{N_{Q_i}}{N_T} \cdot 100$$

Distribuição de Weibull ($Q_{7,10}$)

A distribuição Weibull é bastante adequada para o caso de vazões mínimas, por ser limitada inferiormente. No caso, utiliza-se a distribuição Weibull com dois parâmetros, na qual a função de probabilidade acumuladas é dada pela Equação 3. Seu resultado é obtido a partir da Q_7 de cada ano, que é feita a partir de uma série de vazões médias diárias, calculando-se a menor média móvel de sete dias consecutivos para cada ano da série (ANA, 2011).

$$\text{Equação 3: } F(x) = 1 - e^{-(x/\beta)^\alpha}$$

Sejam α e β os parâmetros de forma e escala, respectivamente, e x a vazão. A estimativa de α e β são feitas tendo por base o coeficiente – CV (CV = desvio padrão/ média) – da série de vazões mínimas Q_7 e utilizando-se uma tabela auxiliar demonstrada parcialmente na Tabela 1 (Von Sperling, 2007).

Tabela 1. Relações auxiliares para a estimativa dos parâmetros da distribuição de Weibull

1/a	A(a)	CV
0,000	1,0000	0,0000
0,005	0,9971	0,0063
0,010	0,9943	0,0127
0,015	0,9915	0,0190
0,020	0,9888	0,0252
0,025	0,9861	0,0315
0,030	0,9835	0,0376
0,035	0,9809	0,0438
0,040	0,9784	0,0499
0,045	0,9759	0,0559
0,050	0,9711	0,0619
0,055	0,9687	0,0679
0,060	0,9664	0,0739
0,065	0,9641	0,0798
0,070	0,9619	0,0857
0,075	0,9597	0,0915
0,080	0,9575	0,0973
0,085	0,9554	0,1031
0,090	0,9433	0,1088
0,095	0,9467	0,1146

Fonte: Adaptado de Von Sperling, 2007.

De forma a facilitar os cálculos sem a necessidade da tabela auxiliar, utilizou-se as Equação 4 e Equação 5. Para suas formulações efetuou-se uma análise de regressão de α e $A(a)$ em função de CV. A qualidade dos ajustes se mostra válida pelo coeficiente de determinação R^2 . Com os valores de α e $A(a)$, calcula-se o valor de β pela Equação 6. Então, uma vez estimados os parâmetros da distribuição de Weibull (α e β), pode-se calcular a vazão (x) correspondente a um período de retorno T_r , por meio da Equação 7 (Von Sperling, 2007).

$$\text{Equação 4: } \alpha = 1,0122 CV^{-1,0779}; \text{ com } R^2=0,9998$$

$$\text{Equação 5: } A(\alpha) = 0,09982 - 0,4419 \cdot CV + 0,4360 \cdot CV^2; \text{ com } R^2=0,9972$$

$$\text{Equação 6: } \beta = \bar{x} / A(\alpha);$$

$$\text{Equação 7: } X_t = \beta [-\ln(1 - \frac{1}{T_r})]^{1/\alpha};$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

O município de Guapimirim e parte dos municípios de Cachoeiras de Macacu, Itaboraí e São Gonçalo estão inseridos na Sub-bacia Hidrográfica Guapi-Macacu, que possui área



estações para outros órgãos gestores e/ou instalação de novo equipamento na mesma seção do rio. Na Tabela 2 estão relacionadas todas as estações fluviométricas da bacia.

Dentre as 12 estações levantadas, apenas uma é gerida pela ANA, e as outras onze pelo INEA. Essas onze são de competência, desde 2014, do setor de Alerta de Cheias do órgão, por meio do qual receberam investimento e visibilidade decorrentes dos índices de inundação no estado do Rio de Janeiro nos períodos chuvosos.

A estação Parque Ribeira é a única do tipo convencional, que apresenta uma régua linimétrica na seção transversal do rio, a qual é lida diariamente às 07 e 17h por um observador contratado. Já nas outras onze estações, que são geridas pelo INEA e são classificadas como estações automáticas, a leitura do nível d'água é realizada a cada 15 minutos a partir de um linígrafo automático e os resultados são enviados via sinal telefônico (GPRS) para o banco de dados do INEA. Mesmo essas sendo estações automáticas, apresentam réguas linimétricas nas seções do rio para calibração do equipamento e eventuais medições de vazão.

Séries históricas

Para a aquisição das séries históricas das estações do INEA é necessário fazer um requerimento ao órgão, enquanto que a localização das estações é disponível no site <http://alertadecheias.inea.rj.gov.br>. Em relação às estações da ANA, a localização e a aquisição dos dados são feitas diretamente pelo Portal HidroWeb (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>) pertencente ao órgão.

Após a aquisição dos dados de cada estação, verificou-se que somente a estação Parque Ribeira (59240000) possui uma série histórica diária de vazão. As outras onze estações apresentam somente séries históricas de nível d'água, sendo

necessário, então, para este estudo, gerar as curvas-chave para transformá-las em séries históricas diárias de vazão.

Visto a proximidade da estação Barragem da Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE) (59248900) com a baía de Guanabara e avaliação temporal da sua série histórica de nível, foi levantada a suspeita de ocorrência de remanso na seção. Consequentemente, a estação foi excluída do estudo.

Medições de vazão

Para gerar curvas-chave das estações, a quantificação das medições de vazão é informação fundamental para a plotagem do gráfico e, posteriormente, do traçado da curva. É necessário um número de medições que represente a variação temporal do fluxo de água na seção transversal do curso d'água, caracterizando os períodos de estiagem e cheia. E, na sequência, a geração das séries históricas de nível d'água em séries de vazão a partir da equação da curva chave-contrada para cada estação.

As estações Anil (2242438) e Caboclo (2242440) apresentam uma quantidade de medições incapazes de representar o comportamento hídrico na seção do rio, não sendo possível, portanto, o traçado de uma curva representativa para tais estações. Assim, essas também foram excluídas do estudo.

Traçado das curvas-chave

Para o traçado das curvas-chave, geração das respectivas equações potenciais de cada estação e séries de vazões, foi utilizado o software Excel, especificamente a ferramenta Solver.

Tabela 2. Estações presentes na Sub-bacia Hidrográfica Guapi-Macacu e porcentagem de falhas nas séries históricas de vazão.

Nome da estação	Código	Rio	Latitude	Longitude	Órgão gestor
Anil	2242438	Anil	-22,50	-42,85	INEA
Barragem da CEDAE	59248900	Canal de Imunana	-22,66	-42,93	INEA
Caboclo	2242440	Caboclo	-22,49	-42,83	INEA
Cachoeiras de Macacu	59235002	Macacu	-22,48	-42,65	INEA
Duas Barras	59242000	Guapiaçu	-22,46	-42,76	INEA
Guapimirim	2242439	Guapimirim	-22,60	-42,96	INEA
Japuíba	59237000	Macacu	-22,56	-42,69	INEA
Orindí	59245200	Iconha	-22,55	-42,89	INEA
Parque Ribeira	59240000	Macacu	-22,59	- 42,74	ANA
Quizanga	59245002	Guapiaçu	-22,56	-42,84	INEA
Soarinho	2242441	Soarinho	-22,61	-42,67	INEA
Tatu	2242437	Tatu	-22,62	-42,68	INEA

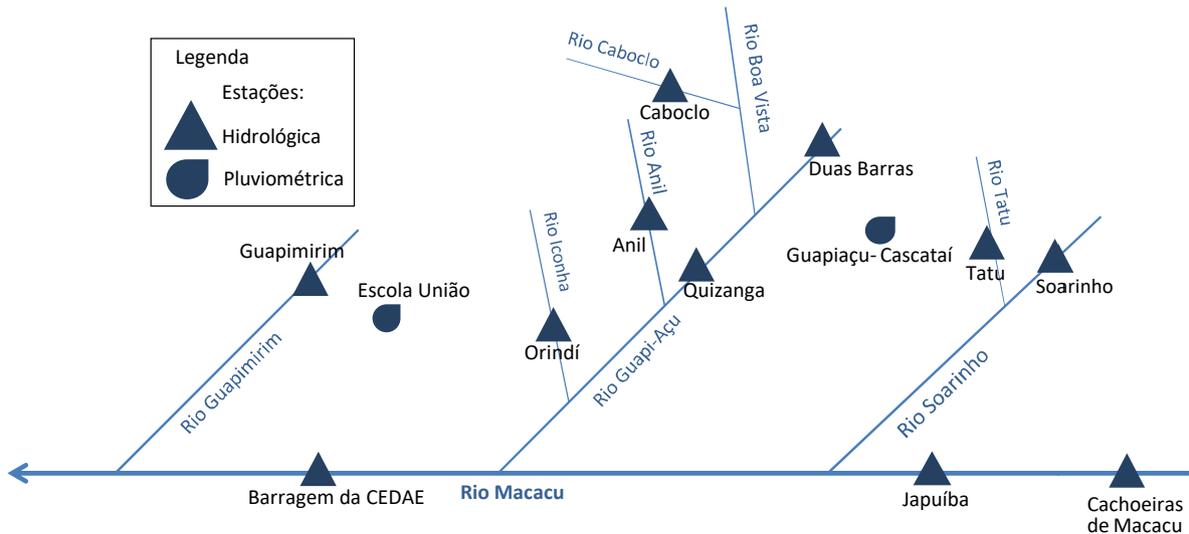


Figura 2. Diagrama rede de drenagem da Sub-bacia Hidrográfica Guapi-Macacu com sua rede de monitoramento.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Após a plotagem das medições em um gráfico bidimensional (x, y), foi necessário obter os parâmetros a e b , determinados por meio de regressão linear, e o parâmetro h_0 , encontrado por tentativa e erro. Estas etapas foram facilitadas pelo uso da ferramenta Solver, que resultou um melhor traçado da curva e ajustou os parâmetros de forma automática, os quais foram posteriormente refinados manualmente, buscando uma melhor correlação entre a vazão calculada (Q_{calc}) e a vazão observada (Q_{obs}). Tal processo segue as seguintes etapas:

- Organização dos dados como exposto na Tabela 3;
- Estimar valores iniciais para os parâmetros a , b e h_0 ;
- Cálculos na coluna " $Q_{calc} (m^3/s)$ " a partir da Equação 1: $Q = a \cdot (h - h_0)^b$

- Cálculos dos desvios quadráticos entre vazões observadas e calculadas na coluna " $(Q_{obs} - Q_{calc})^2$ ", sendo a última célula a soma total das diferenças;
- Inserir gráfico do tipo dispersão e plotar duas séries de dados, a primeira do tipo $Q_{obs} \times h$ e a segunda do tipo $Q_{calc} \times h$, sendo a segunda plotada no formato linha;
- Utilizar a ferramenta Solver, colocando como objetivo o valor mínimo para a soma total das diferenças quadráticas (última célula da coluna " $Q_{obs} - Q_{calc}$ "), alterando os parâmetros a , b e h_0 , e, como restrição, que h_0 seja menor ou igual ao menor h medido.

Tabela 3. Tabela de referência para o uso do solver.

Data	(m)	Qobs (m ³ /s)	-	Qcalc (m ³ /s)	(Qcalc-Qobs) ²
------	-----	--------------------------	---	---------------------------	---------------------------

Tabela 4. Período de dados e falhas diárias.

Estação	Código	Falhas Diárias	Período	Quantidade de meses com dados
Guapimirim	2242439	40%	2016-2018	23
Orindi*	59245200	5%	1969-1978 2015-2018	139
Cachoeiras de Macacu*	59235002	2%	1931-1978 2015-2018	592
Duas Barras	59242000	6%	2014-2018	44
Japuiba*	59237000	21%	1976-1981 2014-2018	98
Quizanga*	59245002	4%	1969-1978 2016-2018	141
Soarinho	2242441	16%	2016-2018	23
Tatu	2242437	17%	2016-2018	24
Parque Ribeira	59240000	3%	1969-2018	581

*Séries com períodos intermitentes de dados

Geração das séries históricas de vazão

Como mencionado anteriormente, as séries históricas das estações ANA estão em formato diário, resultado da média dos dois horários lidos na régua linimétrica; já as estações do INEA não apresentam séries diárias, uma vez que o intervalo das medições é de 15 em 15 minutos.

Fez-se necessário para as estações do INEA a adequação de suas séries para o formato diário. À exemplo das estações ANA, o nível diário foi atribuído à média dos registros de nível às 7h e às 17h horas de cada dia.

Cálculo das vazões mínimas $Q_{7,10}$ e Q_{95}

Para o cálculo das vazões mínimas foram usados apenas os postos com séries históricas de vazões a partir de dez anos de dados, que são: Orindí (59245200), Cachoeiras de Macacu (59235002), Japuiba (59237000), Quizanga (59245002) e Parque Ribeira (59240000).

Foram feitas estimativas das vazões de referências $Q_{7,10}$ e Q_{95} segundo a distribuição probabilística de Weibull e curva de permanência, respectivamente. Como a Q_{95} pode ser estimada a partir das séries de dados diários ou mensais; no presente trabalho foram utilizadas as duas séries para análise e comparação de seus resultados. Para a $Q_{7,10}$ foram analisados os resultados a partir do ajuste da distribuição de Weibull, com de 10 anos denominada $Q_{7,10}$ Weibull e também os valores encontrados

através da leitura do gráfico dos pontos de plotagem (pp) das vazões observadas para o de 10 anos denominada $Q_{7,10}$ pp.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Curvas-chave

Seguindo a metodologia da curva-chave e do seu traçado, anteriormente descrita, as equações das curvas-chave foram geradas para as estações Guapimirim (2242439), Orindí (59245200), Cachoeiras de Macacu (59235002), Duas Barras (59242000), Japuiba (59237000), Quizanga (59245002), Soarinho (2242441), Caboclo (2242440) e Tatu (2242437).

Na Tabela 5 seguem as equações das curvas-chave geradas e os respectivos coeficientes de determinação; os gráficos das curvas constam no Apêndice A.

Vazões mínimas $Q_{7,10}$ e Q_{95}

Ressaltando que para o cálculo das vazões mínimas $Q_{7,10}$ (Weibull e ponto de plotagem) e Q_{95} (diário e mensal) foram usadas apenas as estações Orindí (59245200), Cachoeiras de Macacu (59235002), Japuiba (59237000), Quizanga (59245002) e Parque Ribeira (59240000), cujos resultados constam na Tabela 6. O Apêndice B apresenta os resultados gráficos da estimativa das vazões $Q_{7,10}$.

Tabela 5. Equações das curvas-chave

Estação	Código	Equação da Curva	R ²
Guapimirim	2242439	$Q = 0,786 \times (h-0,000)^{2,96}$	0,986
Orindí	59245200	$Q = 6,624 \times (h-1,129)^{3,00}$	0,951
Cachoeiras de Macacu	59235002	$Q = 17,20 \times (h-0,550)^{3,00}$	0,836
Duas Barras	59242000	$Q = 6,770 \times (h-0,510)^{2,38}$	0,995
Japuiba	59237000	$Q = 4,374 \times (h-0,340)^{2,78}$	0,979
Quizanga	59245002	$Q = 7,901 \times (h-0,330)^{1,34}$	0,998
Soarinho	2242441	$Q = 8,081 \times (h-0,469)^{3,00}$	0,998
Tatu	2242437	$Q = 1,496 \times (h-0,254)^{2,02}$	0,999
Caboclo	2242440	$Q = 4,528 \times (h-0,143)^{1,45}$	0,977

Tabela 6. Vazões mínimas $Q_{7,10}$ e Q_{95}

Estação	Código	Q _{7,10} Weibull (m ³ /s)	Q _{7,10} PP (m ³ /s)	Q ₉₅ Diário (m ³ /s)	Q ₉₅ Mensal (m ³ /s)
Orindí	59245200	0,41	0,38	0,69	0,81
Cachoeiras de Macacu	59235002	0,51	1,47	2,08	2,28
Japuiba	59237000	0,35	0,13	0,51	1,01
Quizanga	59245002	1,18	1,90	2,74	3,22
Parque Ribeira	59240000	1,96	2,20	2,98	3,56



Cálculo das vazões de referências

A partir das vazões mínimas calculadas, foram estimadas variações percentuais das vazões de referência, a fim de encontrar o valor que melhor representasse a VMO da Sub-bacia Hidrográfica Guapi-Macacu.

De acordo com a Resolução INEA nº 171, de 27 de março de 2019 (Estado do Rio de Janeiro, 2019), a VMO no estado do Rio de Janeiro, para usos de águas superficiais do curso d'água junto à seção de interesse, muda sua vazão de referência de 50% de $Q_{7,10}$, prevista na Portaria SERLA nº 567, de 07 de maio de 2007 (Estado do Rio de Janeiro, 2007), para a vazão de referência de 40% de Q_{95} .

Segundo CPRM (2002), para a Sub-bacia 59, na qual a Sub-bacia Hidrográfica Guapi-Macacu está inserida, 70% de Q_{95} é uma boa aproximação para o valor de $Q_{7,10}$. Visto isso, foram feitas as aproximações de 70% de Q_{95} (diária e mensal) e realizadas as diferenças percentuais entre as $Q_{7,10}$ a partir da aproximação estatística de Weibull, mostrados na Tabela 7. Isso também foi feito para a $Q_{7,10}$ pp (Tabela 8).

Referente às vazões $Q_{7,10}$ da distribuição estatística Weibull, conclui-se que a menor diferença percentual encontrada foi entre $Q_{7,10}$ (Weibull) e 70% de Q_{95} (diário) da estação Japuíba (59237000), no valor de 2%. Já no Q_{95} mensal, a estação Japuíba (59237000) obteve uma diferença de 104%, resultado que será discutido posteriormente. Para as outras estações, a diferença variou entre 6% a 187%.

Da Tabela 8, com as $Q_{7,10}$ pp, foi obtida uma diferença menor comparada à 70% de Q_{95} diária para as estações Ca-

choeiras de Macacu (59235002) e Quizanga (59245002) no valor de 1%, e variação entre 5% e 168% nas outras estações.

Em busca do melhor ajuste entre $Q_{7,10}$ e Q_{95} , com base na antiga portaria SERLA (Estado do Rio de Janeiro, 2007) que previa a vazão de referência de 50% de $Q_{7,10}$ para a VMO no estado do Rio de Janeiro, foram feitas as aproximações de 50% de $Q_{7,10}$ e comparadas as aproximações de 35% e 30% de Q_{95} (diário e mensal). A Tabela 9 coteja os resultados para as aproximações citadas.

A diferença percentual entre os valores de 50% de $Q_{7,10}$ (Weibull e Ponto de Plotagem) entre as duas aproximações de Q_{95} (diário e mensal) para 35% e 30% foram incluídas nas Tabelas 10 e 11.

A estação Orindí teve uma menor diferença entre 50% de $Q_{7,10}$ Weibull e 30% de Q_{95} diário, com o valor de 11%. Parque Ribeira teve o melhor ajuste, com diferença de 3% entre 50% de $Q_{7,10}$ a partir do ponto plotado e 30% de Q_{95} mensal. Já Cachoeiras de Macacu e Quizanga obtiveram o melhor ajuste entre 50% de $Q_{7,10}$ a partir do ponto plotado com 35% de Q_{95} para valores diários.

A estação Japuíba registrou uma diferença de 2% entre a aproximação 50% de $Q_{7,10}$ Weibull e 35% de Q_{95} diário, no entanto, para todos os outros valores comparados, a estação apresentou valores que variaram de 12% a 434%. Pelas grandes variações nas diferenças realizadas, essa estação foi considerada com resultados suspeitos e inconclusivos, não sendo incluída na conclusão dos resultados do estudo.

Tabela 7. Diferença percentual de 70% de $Q_{7,10}$ (Weibull) e Q_{95} (diário e mensal).

Estação	Código	Q7,10 Weibull (m³/s)	70% de Q95		Diferença percentual	
			Diário (m³/s)	Mensal (m³/s)	Q7,10 – 70% Q95 diário	Q7,10 – 70% Q95 mensal
Orindí	59245200	0,41	0,49	0,57	17%	37%
Cachoeiras de Macacu	59235002	0,51	1,46	1,60	187%	214%
Japuíba	59237000	0,35	0,35	0,71	2%	104%
Quizanga	59245002	1,18	1,92	2,25	62%	90%
Parque Ribeira	59240000	1,96	2,09	2,49	6%	27%

Tabela 8. Diferença percentual de 70% de $Q_{7,10}$ pp e Q_{95} (diário e mensal).

Estação	Código	Q7,10 pp (m³/s)	70% de Q95		Diferença percentual	
			Diário (m³/s)	Mensal (m³/s)	Q7,10 pp– 70% Q95 diário	Q7,10 pp– 70% Q95 mensal
Orindí	59245200	0,38	0,49	0,57	29%	50%
Cachoeiras de Macacu	59235002	1,47	1,46	1,60	1%	9%
Japuíba	59237000	0,13	0,35	0,71	168%	434%
Quizanga	59245002	1,90	1,92	2,25	1%	19%
Parque Ribeira	59240000	2,20	2,09	2,49	5%	13%



Tabela 9. Resultados de 50% de $Q_{7,10}$ pela distribuição estatística Weibull e ponto de plotagem e 35% e 30% de Q_{95} (diário e mensal)

Estação	Código	50% de $Q_{7,10}$ pp (m ³ /s)	50% de $Q_{7,10}$ Weibull (m ³ /s)	35% de Q_{95}		30% de Q_{95}	
				Diário (m ³ /s)	Mensal (m ³ /s)	Diário (m ³ /s)	Mensal (m ³ /s)
Orindí	59245200	0,19	0,21	0,24	0,21	0,21	0,81
Cachoeiras de Macacu	59235002	0,74	0,25	0,73	0,62	0,62	2,28
Japuíba	59237000	0,95	0,17	0,18	0,15	0,15	1,01
Quizanga	59245002	0,95	0,98	1,04	0,89	0,89	3,56
Parque Ribeira	59240000	1,10	0,59	0,96	0,82	0,82	3,22

Tabela 10. Diferença 50% de $Q_{7,10}$ (Weibull e pp) e 35% de Q_{95} (diário e mensal)

Estação	Código	Diferença Percentual	
		50% de $Q_{7,10}$ Weibull e 35% de Q_{95} diário	50% de $Q_{7,10}$ Weibull e 35% de Q_{95} mensal
Orindí	59245200	17%	37%
Cachoeiras de Macacu	59235002	187%	214%
Japuíba	59237000	2%	104%
Quizanga	59245002	62%	90%
Parque Ribeira	59240000	6%	27%
		50% de $Q_{7,10}$ pp e 35% de Q_{95} diário	50% de $Q_{7,10}$ pp e 35% de Q_{95} mensal
Orindí	59245200	29%	50%
Cachoeiras de Macacu	59235002	1%	9%
Japuíba	59237000	168%	434%
Quizanga	59245002	1%	19%
Parque Ribeira	59240000	5%	13%

Tabela 11. Diferença 50% de $Q_{7,10}$ (Weibull e pp) e 30% de Q_{95} (diário e mensal)

Estação	Código	Diferença Percentual	
		50% de $Q_{7,10}$ Weibull e 30% de Q_{95} diário	50% de $Q_{7,10}$ Weibull e 30% de Q_{95} mensal
Orindí	59245200	1%	17%
Cachoeiras de Macacu	59235002	146%	170%
Japuíba	59237000	12%	75%
Quizanga	59245002	39%	63%
Parque Ribeira	59240000	9%	9%
		50% de $Q_{7,10}$ pp e 30% de Q_{95} diário	50% de $Q_{7,10}$ pp e 30% de Q_{95} mensal
Orindí	59245200	11%	29%
Cachoeiras de Macacu	59235002	15%	7%
Japuíba	59237000	129%	358%
Quizanga	59245002	13%	2%
Parque Ribeira	59240000	19%	3%



De forma a corresponder a uma nova VMO para a sub-bacia estudada, os resultados demonstram que a menor variação da diferença percentual ficou entre a vazão de referência de 50% de $Q_{7,10'}$ a partir do ponto de plotagem, e a vazão de referência de 35% de Q_{95} diário, cuja diferença variou entre 1% a 29%.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conclui-se que a estimativa para uma nova vazão outorgável para os corpos hídricos presentes na Sub-bacia Hidrográfica Guapi-Macacu, baseada na diferença percentual das vazões de referência de $Q_{7,10}$ e Q_{95} , foi obtido o melhor ajuste entre 30% e 35% de Q_{95} com 50% de $Q_{7,10'}$, o que vai contra o atual valor da VMO do estado, estipulada pelo órgão regulador em março de 2019, que prevê uma vazão de referência de 40% de Q_{95} para a VMO. Significa dizer que hoje se outorga mais água do que se tem disponível, agravando a situação de escassez hídrica na região.

Portanto, propõe-se a adoção de uma nova VMO para a Sub-bacia Hidrográfica Guapi-Macacu, igual a 30% de Q_{95} , visando uma gestão mais ecológica e que priorize os usos múltiplos das águas superficiais na bacia.

Para os resultados encontrados, ressalta-se que as séries históricas das estações apresentam demasiadas falhas, e a interrupção de 30 anos de observações e medições de vazões pode não representar de forma eficiente o regime hídrico existente na bacia. No entanto, a estação Parque Ribeira foi considerada modelo para o estudo, já que apresenta uma série histórica com 581 meses sem interrupções e com apenas 3% de falhas diárias. Essa estação, então, fundamentou a proposta da vazão de referência de 30% de Q_{95} .

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas – ANA (2011), Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos Cadernos de Capacitação em Recursos Hídricos, Vol. 6, ANA, Brasília.

Agência Nacional de Águas – ANA (2013), Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos, ANA, Brasília.

Agência Nacional de Águas – ANA (2017), Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório pleno, ANA, Brasília.

Alves, B. C. C.; Souza Filho, F. A.; Silveira, C. S. (2013), “Análise de tendências e padrões de variação das séries históricas de vazões do Operador Nacional do Sistema (ONS)”, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 18, No. 4, pp. 19-34.

Benavides, Z. C.; Cintrão, R. P.; Fidalgo, E. C. C. et al. (2009), Consumo e abastecimento de água nas bacias hidrográficas dos rios Guapi-Macacu e Caceribu, RJ, Embrapa Solos, Rio de Janeiro.

Bof, L. H.; Pruski, F. F.; Silva, L. M. et al. (2013), “Analysis of appropriate timescales for water diversion permits in Brazil”, Environmental Management, Vol. 51, No. 2, pp. 492-500.

Brandt, S.; Vogel, R. M.; Archfield, S. A. (2008), “Indicators of hydrologic stress in Massachusetts, ASCE-EWRI”, In: World Water & Environmental Resources Congress, Honolulu, Hawaii.

Brasil (1934), Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934. Decreta o Código de Águas, Coleção das Leis do Império do Brasil, 27 jul. 1934.

Brasil, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (2005), Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF, Diário Oficial da União, 18 mar. 2005.

Brasil, Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (1982), Sistemática para análise de consistência de dados pluviométricos, DNAEE, Brasília, DF.

Brasil, Ministério do Meio Ambiente, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – MMA/IBAMA (2001), Plano de manejo da área de proteção ambiental de Guapi-Mirim, Brasília, MMA/IBAMA, disponível em http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/imgs-unidades-coservacao/apa_guapi_mirim.pdf (Acesso em: 14 dez. 2019)

Brasil. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, DF, Diário Oficial da União, 09 jan. 1997.

CPRM (2002), “Relatório-síntese do trabalho de Regionalização de Vazões da Sub-bacia 59”. Disponível em <http://www.cprm.gov.br/publique/media/hidrologia/projetos/relatorios_sintese_regionalizacao/sint_reg59.pdf> (Acesso em 02 dez. 2018)

Estado do Rio de Janeiro, Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade, Instituto Estadual do Ambiente (2019), Resolução INEA nº 171, de 27 de março de 2019. Aprova a NOP-INEA-37.R-0 – Critérios, definições e condições para outorga de direito de uso de recursos hídricos superficiais (OUT-SUP). Rio de Janeiro, Diário Oficial, 29 mar. 2019.

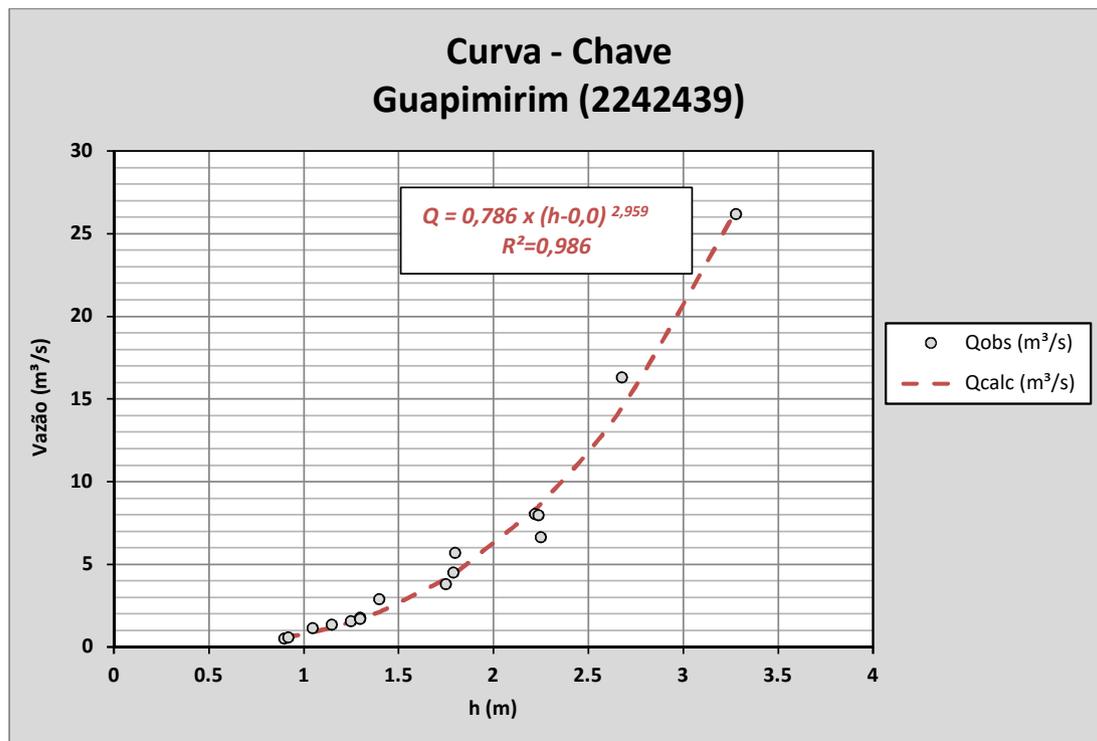
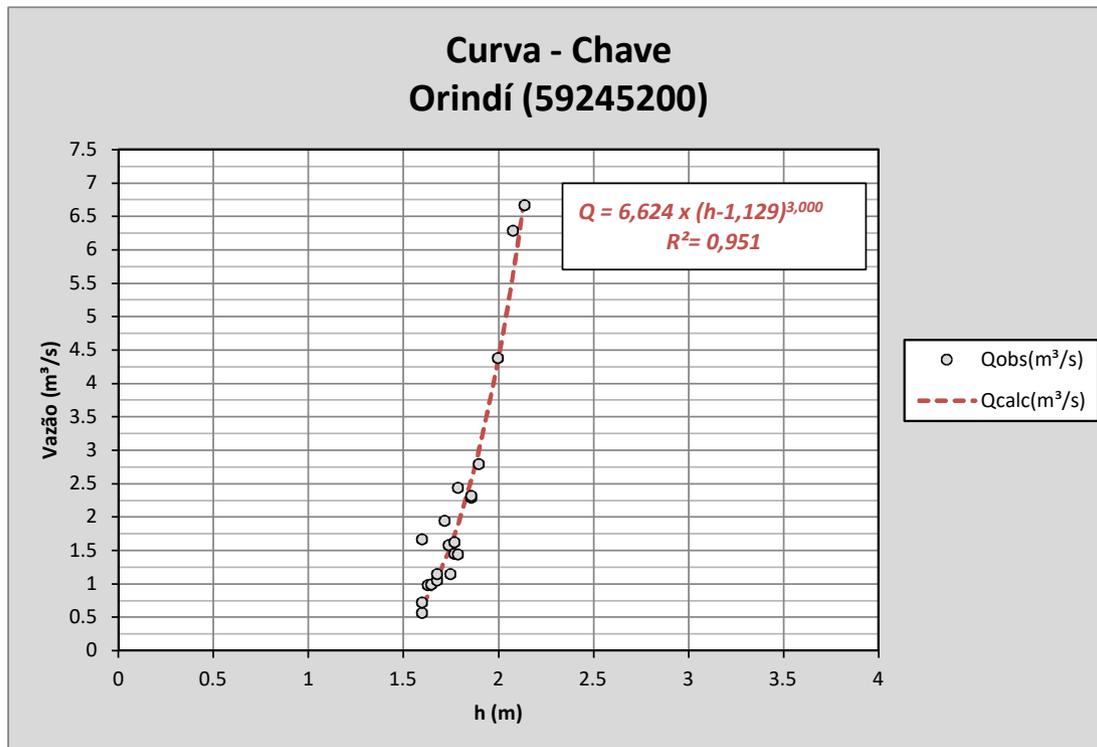
Estado do Rio de Janeiro, Superintendência Estadual de Rios e Lagoas – SERLA (2007), Portaria SERLA nº 567, de 07 de maio de 2007. Estabelece critérios gerais e procedimentos técnicos e administrativos para cadastro, requerimento e emissão de outorga de direito de uso de recursos hídricos de domínio do estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 07 maio 2007.

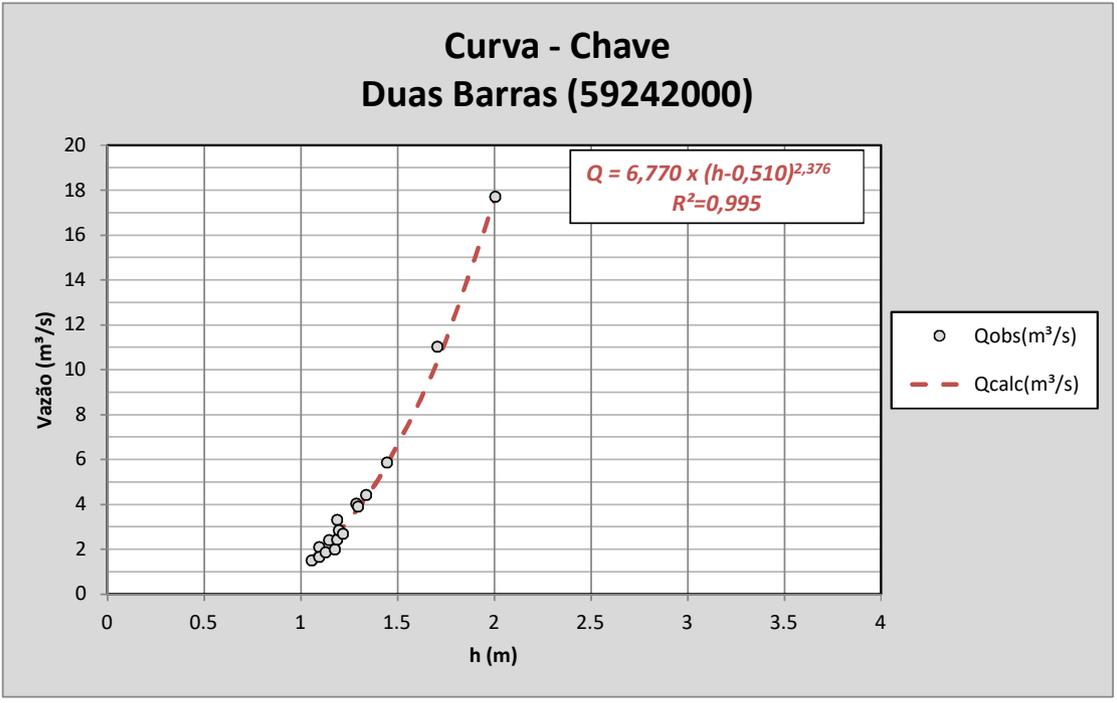
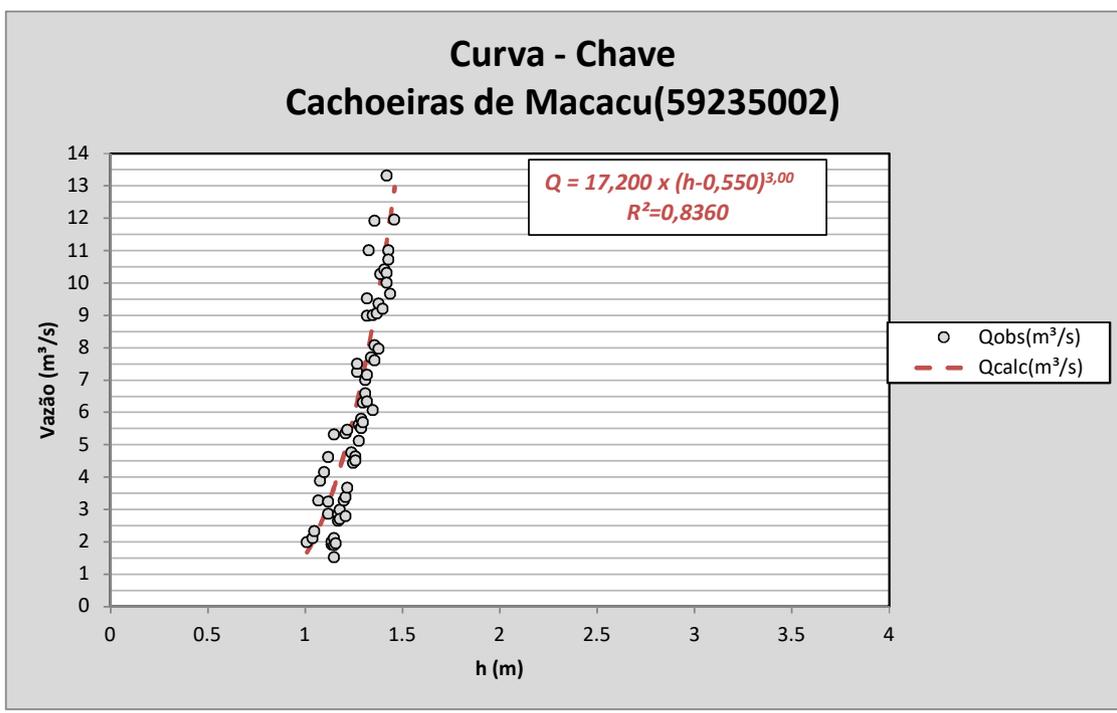


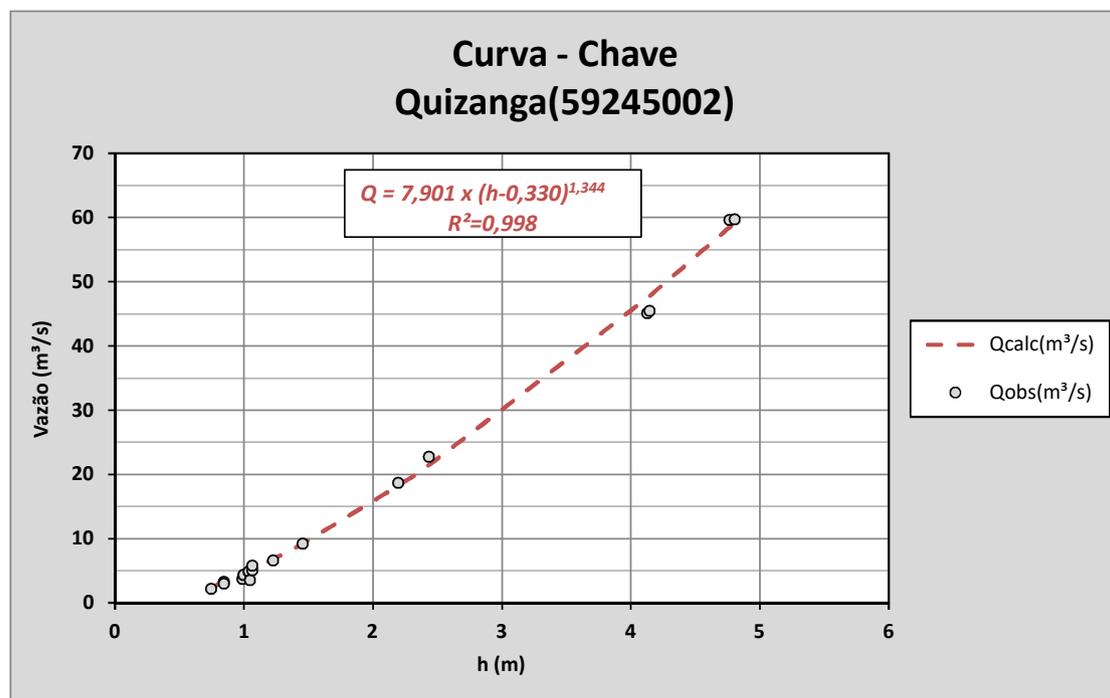
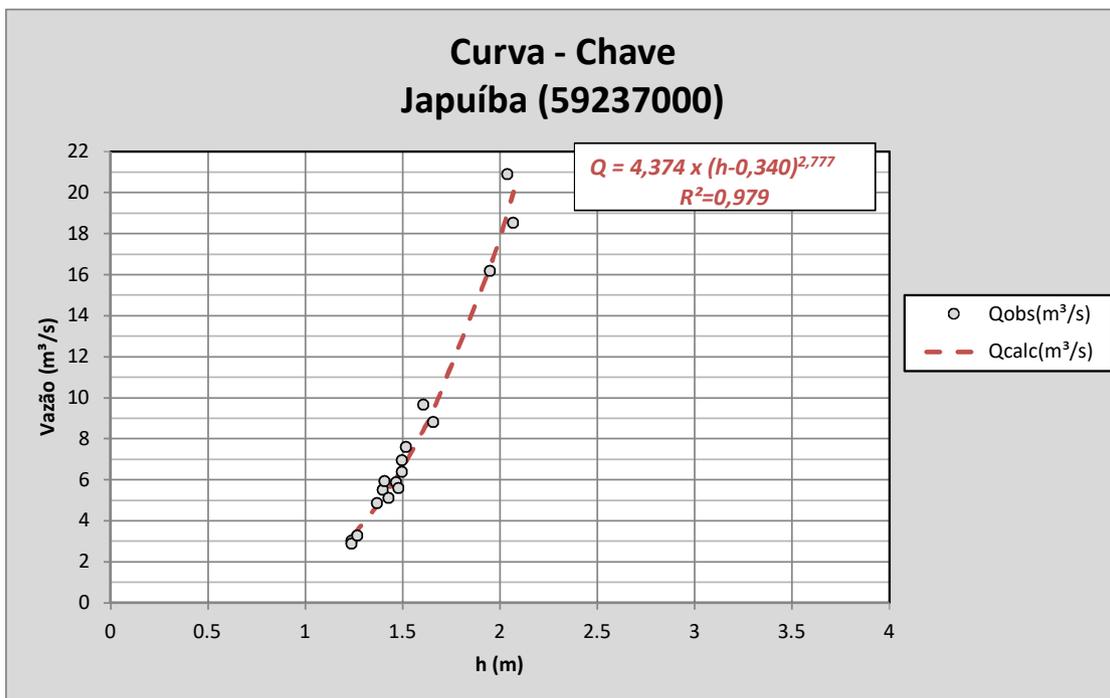
- European Environment Agency – EEA (2018), “Water is life: Europe’s rivers, lakes and seas are under pressure from pollution, over-exploitation and climate change. How can we ensure a sustainable use of this vital resource?”, EEA Signals 2018, Copenhagen, EEA, available from: <https://www.eea.europa.eu/publications/eea-signals-2018-water-is-life> (Access at: 15 Dec. 2019).
- European Union, Council of the European Union (2000), Directive 2000/60/EC. Establishing a framework for Community action in the field of water policy. European Union Law, 23 oct. 2000, available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX:32000L0060> (Access at: 15 Dec. 2019).
- Hora, M. A. G. M. (2012), Compatibilização da geração de energia em aproveitamento hidrelétricos com os demais usos dos recursos hídricos, EDUFF, Niterói, RJ.
- Jacon, G.; Cudo, K. J. (1989), Hidrologia-curva-chave: análise e traçado, DNAEE, Brasília.
- Kattel, G. R. (2019), “State of future water regimes in the world’s river basins: balancing the water between society and nature”, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 49, No. 12, pp. 1107-1133.
- Kroll, C., Luz, J., Allen, B. et al. (2004), “Developing a watershed characteristics database to improve low streamflow prediction”, *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 116–125.
- Richter, B. D.; Mathews, R.; Harrison, D. L. et al. (2003), “Ecologically sustainable water management: managing river flows for ecological integrity”, *Ecological Applications*, Vol. 13, No. 1, pp. 206–224.
- Santos, G. G.; Figueiredo, C. C.; Oliveira, L. F. C. et al. (2009), “Intensidade-duração-frequência de chuvas para o Estado de Mato Grosso do Sul”, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Vol. 13, Suppl., pp. 899-905.
- Santos, P. V. C. J.; Cunha, A. C. D. (2013), “Outorga de Recursos Hídricos e Vazão Ambiental no Brasil: Perspectivas Metodológicas Frente ao Desenvolvimento do Setor Hidrelétrico na Amazônia”, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Vol. 18, No. 3, pp. 81-95.
- Shen, D.; Varis, O. (2000), “World water vision: balancing thoughts after the Hague”, *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, Vol. 29, No. 8, pp. 523-525.
- Silva, A. M.; Oliveira, P. M.; Mello, C. R. et al. (2006), “Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, Minas Gerais”, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Vol. 10, No. 2, pp. 374-380.
- Silva, L. M. C.; Monteiro, R. A. (2004), “Outorga de direito de uso de recursos hídricos: uma das possíveis abordagens”, In: Machado, C. J. S. (Org.), *Gestão de águas doces*, Interciência, Rio de Janeiro, pp. 135-178.
- Tasker, G. D. (1987), “A comparison of methods for estimating low flow characteristics of streams”, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 23, No. 6, pp. 1077–1083.
- Tucci, C. E. M. (2009), *Hidrologia, Ciência e Aplicação*, 4ª ed., UFRGS, Porto Alegre.
- United States, Environment Protection Agency – EPA (2017), “Water Quality Criteria”, In: *Water Quality Standards Handbook*, U.S. EPA, available from: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-10/documents/handbook-chapter3.pdf> (Access at: 15 dec. 2019).
- Universidade Federal Fluminense, Fundação Euclides da Cunha – UFF/FEC et al. (2010), *Planejamento estratégico da região hidrográfica dos rios Guapi-Macacu e Caceribu-Macacu*. Projeto Macacu, Niterói, 2010. Disponível em: <http://www.projetomacacu.uff.br/relatorios/volume_1_crh.pdf>. (Acesso em: 18 fev. 2019).
- Von Sperling, M. (2007), *Estudos e modelagem da qualidade da água em rios*, UFMG, Belo Horizonte.
- Young, A. R.; Gustard, A.; Bullock, A. et al. (2000), “A river network based hydrological model for predicting natural and influenced flow statistics at ungauged sites: Micro LOW FLOWS”, *Science of the Total Environment*, Vol. 251-252, pp. 293–304.

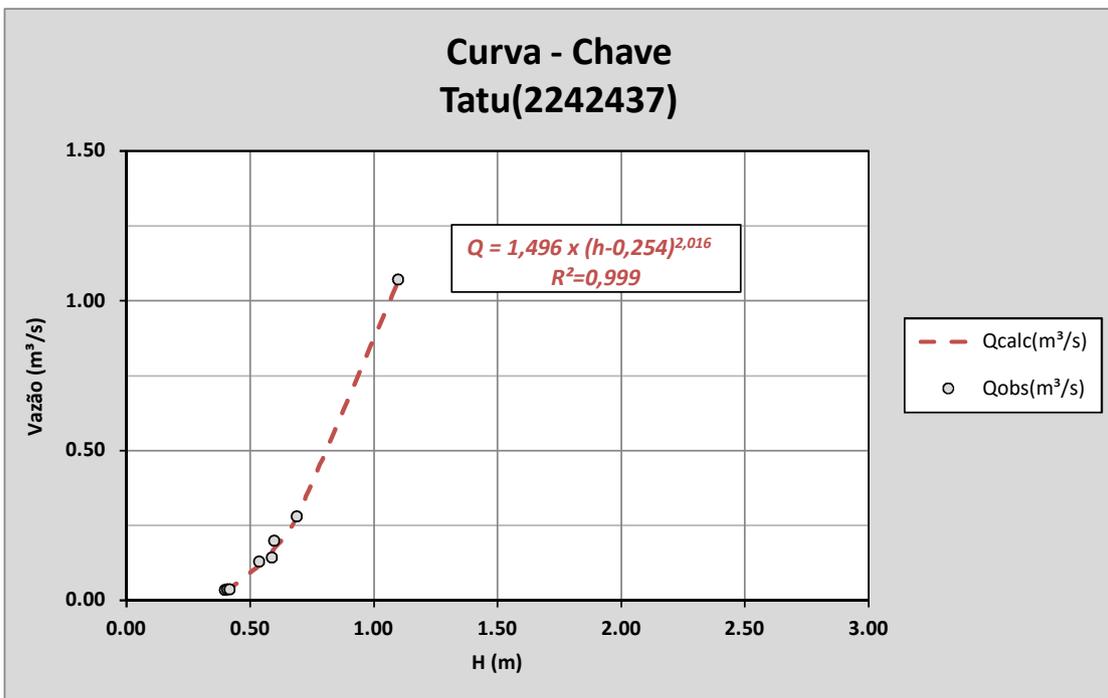
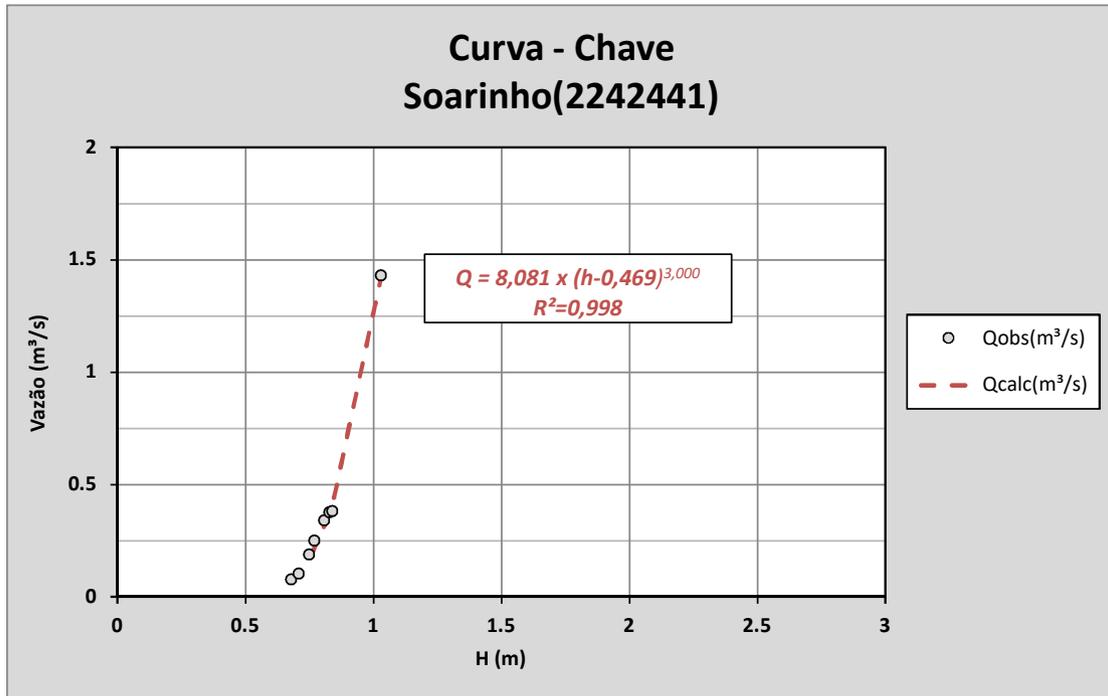


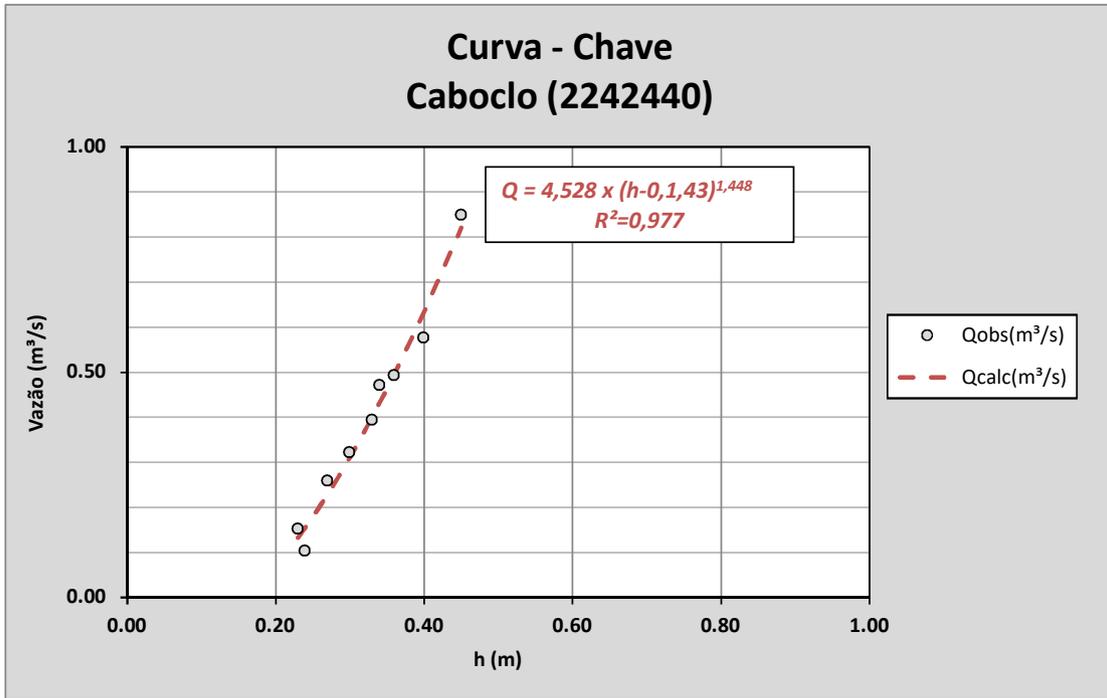
APÊNDICES
 Traçado das curvas-chave





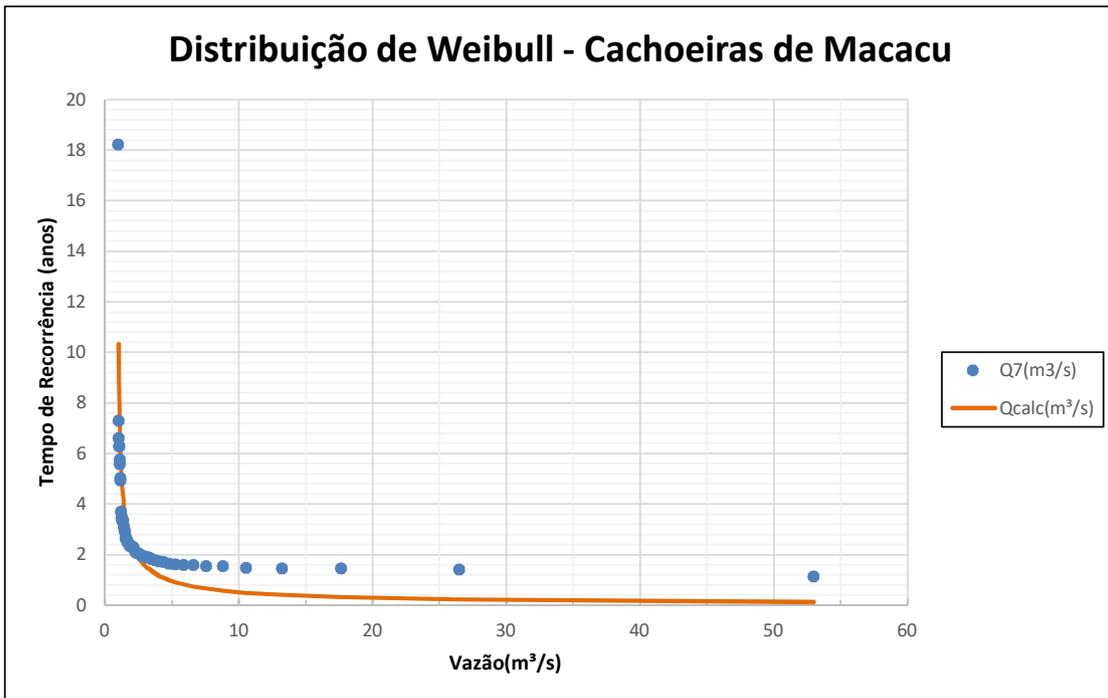






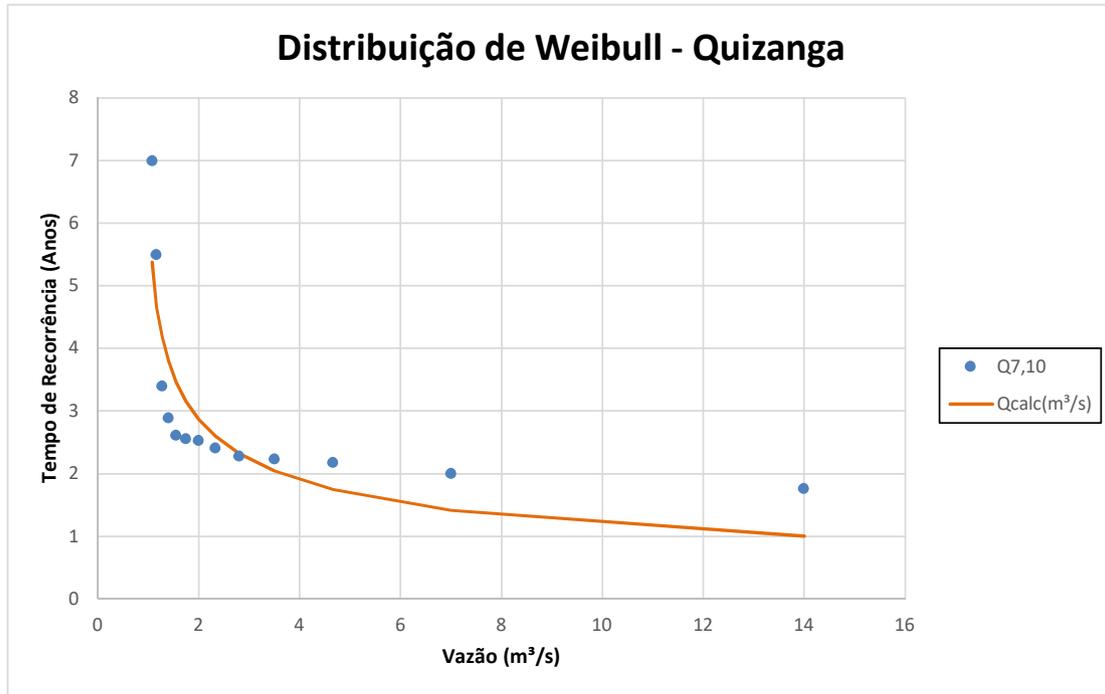
DISTRIBUIÇÃO WEIBULL ($Q_{7,10}$)

Cachoeiras de Macacu

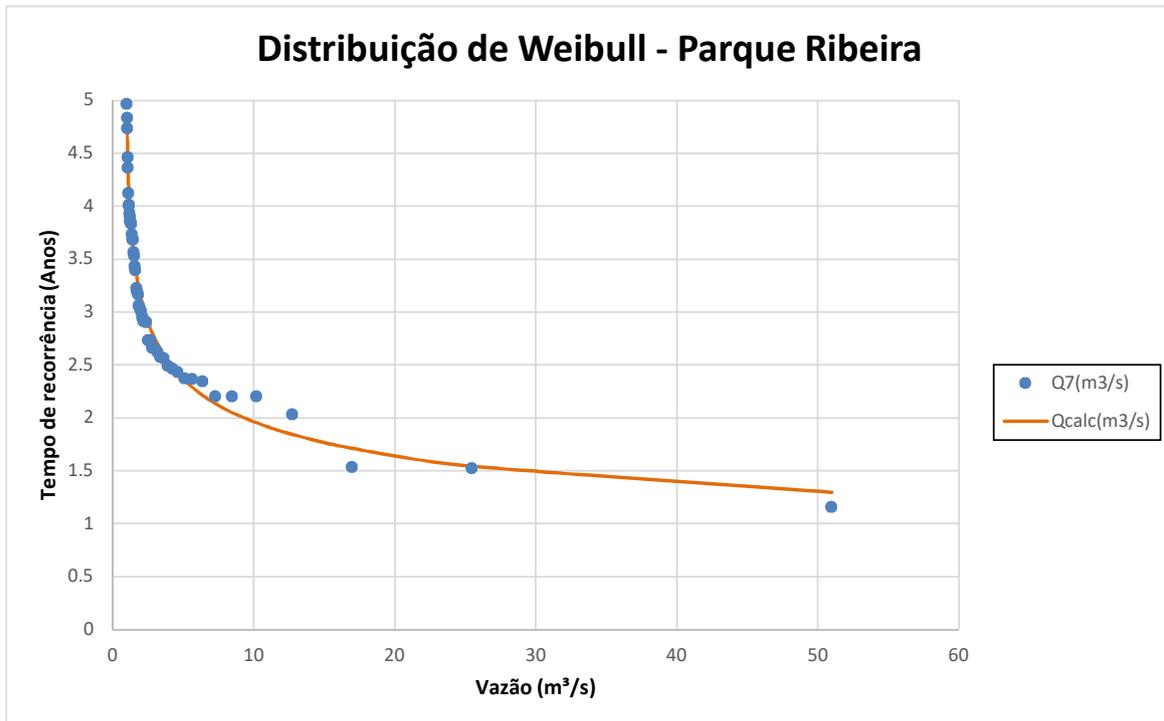




Quizanga

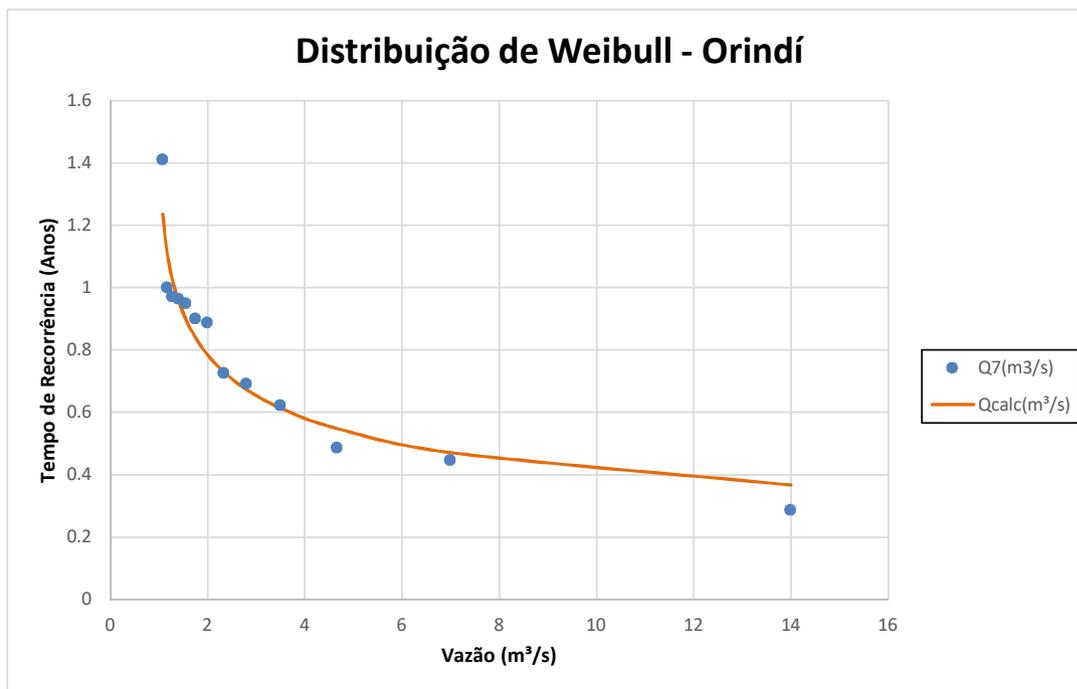


Parque Ribeira

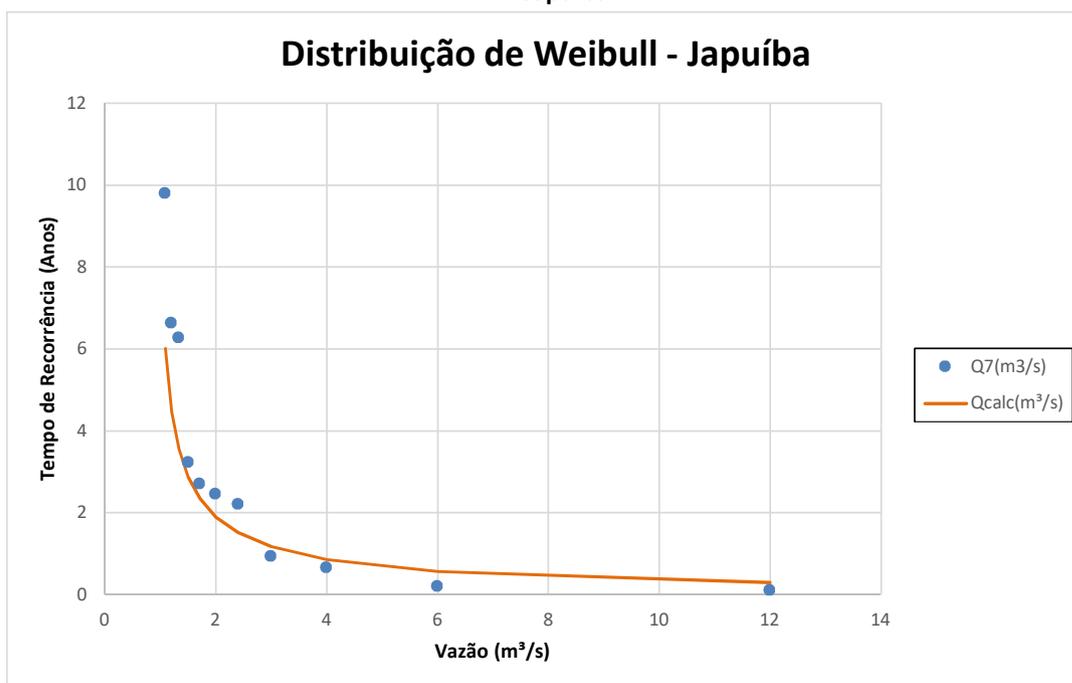




Orindí



Japuíba



Recebido: 29 out. 2019

Aprovado: 18 nov. 2019

DOI: 10.20985/1980-5160.2019.v14n4.1585

Como citar: Novo, E. C.; Hora, M. A. G. M. (2019), "Estabelecimento das curvas-chave, geração das séries de vazões e estimativa das vazões máximas outorgáveis nos postos da sub-bacia Guapi-Macacu, RJ", *Sistemas & Gestão*, Vol. 14, No. 4, pp. 464-482, disponível em: <http://www.revistasg.uff.br/index.php/sg/article/view/1585> (acesso dia mês abreviado. ano).