



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

Regionalização de Vazões Para a Parte Baiana da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo

STÊNIO ROCHA DE CARVALHO

Itapetinga

Bahia

Fevereiro de 2017



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

Regionalização de Vazões Para a Parte Baiana da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo

Autor: Stênio Rocha de Carvalho

Orientador: Prof.º Danilo Paulucio da Silva

Co-orientador: João Batista Lopes da Silva

“Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS, no Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Ciências Ambientais da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - Área de concentração: Meio Ambiente e Desenvolvimento”

Itapetinga

Bahia

Fevereiro de 2017

577
C328r Carvalho, Stênio Rocha de
Regionalização de Vazões Para a Parte Baiana da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo. / Stênio Rocha de Carvalho. – Itapetinga, BA: UESB, 2017. 78fl.

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS, no Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Ciências Ambientais da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - Área de concentração: Meio Ambiente e Desenvolvimento. Sob a orientação do Prof. D.Sc. Danilo Paulucio da Silva e coorientação do Prof. D.Sc. João Batista Lopes da Silva.

1. Recursos hídricos. 2. Modelos hidrológicos. 3. Hidrologia - Regionalização de vazões. I. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, *Campus* de Itapetinga. II. Silva, Danilo Paulucio da. III. Silva, João Batista Lopes da. IV. Título.

CDD(21): 577

Catálogo na Fonte:

Adalice Gustavo da Siva – CRB 535-5ª Região
Bibliotecária – UESB – Campus de Itapetinga-BA

Índice Sistemático para desdobramentos por Assunto:

1. Recursos hídricos
2. Modelos hidrológicos
3. Hidrologia - Regionalização de vazões

“A arte de escutar é como
uma luz que dissipa a
escuridão da ignorância”
Dalai Lama

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Aos meus pais Jairo e Gisélia, meus maiores exemplos de vida, pelos ensinamentos e amor dedicado, não medindo esforços para que eu chegasse até aqui. Amo vocês.

Aos meus irmãos Jackson e Vanessa, por sempre estarem ao meu lado.

Aos meus cunhados André e Tatyana, que sempre torceram pelo meu sucesso.

Aos meus sobrinhos, Pietro, João Pedro e Julia, pelos sorrisos e momentos de alegria proporcionados.

À Louise, pelo amor, confiança e compreensão dedicados.

Ao professor Danilo Paulúcio da Silva, exemplo de professor, pai e amigo, pela orientação e principalmente pela amizade, ensinamentos e confiança dedicados. Teus conselhos e momentos de descontração ficarão guardados com muito carinho.

À professora Flávia Mariani Barros, pela amizade, paciência e ensinamentos compartilhados.

Os momentos de orientação e descontração sempre serão lembrados.

Aos professores de toda essa jornada de estudos.

Ao professor João Batista Lopes da Silva, pelas valiosas sugestões.

Ao Grupo de Pesquisas em Recursos Ambientais: Micael, Tarcila, Jhones, Luciano, Mayana, Joadson, Marciane, Romário, Raíza, Daniel, Natália, Felipe, Nicole, Larissa, Alisson e Lana. Guardarei os momentos de alegria e descontração vivenciados nas coletas e laboratório.

À Deisy Assis que, com seriedade e competência, muito contribuiu para concretização deste trabalho.

À Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, pela formação, bem como aos amigos e funcionários.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB, pelo apoio financeiro concedido para realização desta pesquisa.

Aos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

À vocês, meus sinceros agradecimentos.

APRESENTAÇÃO

Dirigida a pesquisadores e profissionais que atuam na estimativa de vazões hidrológicas a dissertação *Regionalização de Vazões Para a Parte Baiana da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo* foi elaborada em 3 capítulos. A dissertação, contempla métodos de regionalização de vazões, bem como apresenta a aplicação dos métodos de regionalização baseados em regressões e conservação de massas, além de desenvolvimento de uma ferramenta computacional para estimativa de vazões do rio Pardo e afluentes localizados no estado da Bahia.

Os trabalhos a seguir foram elaborados segundo as normas exigidas pela Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, conforme ANEXO, na qual pretende-se publica-los. O primeiro capítulo é composto de revisão bibliográfica acerca de procedimentos de regionalização de vazões. Foi realizado um estudo de caso na porção baiana da bacia hidrográfica do rio Pardo com a aplicação do método baseado em regressões múltiplas, recomendado pela ELETROBRÁS (1985), presente no segundo capítulo.

O trabalho buscou ainda, a construção de um software capaz de estimar vazões máximas para diferentes períodos de retorno, média de longo período e mínimas com 90% e 95% de permanência na curva da parte para a área de estudo. Pretende-se com isso, disponibilizar informações para órgão gestores e população visando melhorias na gestão do recurso hídrico.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE SIMBOLOS	vii
CAPÍTULO 1 – Estimativas de vazões em bacias hidrográficas – revisão de métodos de regionalização de vazões	10
1. INTRODUÇÃO	10
2. DISPONIBILIDADE HÍDRICA	11
3. GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL	12
4. ESTUDOS DE VAZÃO EM CURSOS DE ÁGUA	13
4.1. Vazões máximas, médias e mínimas	13
4.2. Estimativa de vazões máximas e mínimas.....	14
4.2.1. Distribuição Normal	16
4.2.2. Distribuição Log-Normal	17
4.2.3. Distribuição de Pearson tipo III	19
4.2.4. Distribuição Log–Pearson Tipo III	20
4.2.5. Distribuição de Gumbel	20
4.2.6. Distribuição de Weibull	21
5. MODELOS HIDROLÓGICOS	23
5.1. Classificação dos modelos	24
6. REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES	25
6.1. Método Tradicional.....	28
6.1.1. Características físicas e meteorológicas.....	28

6.1.2. Regiões homogêneas	29
6.2. Método da Curva Adimensional	29
6.3. Método da Conservação de Massas	30
7. CONCLUSÕES.....	30
8. LITERATURA CITADA.....	30
CAPÍTULO 2 – Regionalização de vazões da parte baiana da bacia hidrográfica do rio Pardo.....	35
1. INTRODUÇÃO	36
2. MATERIAL E MÉTODOS	37
2.1. Área de estudo.....	37
2.2. Obtenção dos dados	37
2.3. Procedimentos de Regionalização	39
2.3.1. Cálculo de vazões máximas, médias e mínimas	39
2.3.2. Obtenção das variáveis independentes testadas	40
2.4. Regionalização hidrológica	40
2.4.1. Identificação variáveis independentes de melhor ajuste.....	40
2.4.2. Identificação de regiões hidrológicamente homogêneas	41
2.5. Obtenção de parâmetros das equações para o rio Pardo.....	41
2.6. Estimativa de vazões.....	42
2.7. Obtenção dos parâmetros das equações para afluentes.....	42
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
3.1. Características físicas	43
3.2. Vazões mínimas, médias e máximas das estações consideradas.....	44
3.3. Ajuste das equações para o rio Pardo.....	44
3.4. Estimativa de vazões.....	46
3.5. Ajustes das equações para os afluentes	47
4. CONCLUSÕES.....	48

6. LITERATURA CITADA	49
CAPÍTULO 3 – Programa para estimativa de vazões da parte baiana da bacia hidrográfica do rio Pardo	52
1. INTRODUÇÃO	53
2. MATERIAL E MÉTODOS	54
2.1. Área de estudo	54
2.2. Estudos de regionalização de vazões e levantamento das características físicas da bacia hidrográfica	54
2.3. Obtenção de variáveis explicativas	56
2.4. Desenvolvimento da ferramenta computacional para às informações hidrológicas	57
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4. CONCLUSÕES	63
5. LITERATURA CITADA	63
RECOMENDAÇÕES	65
APÊNDICE	66

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1. Localização da área de estudo e estações fluviométricas utilizadas	38
Figura 2. Vazões máximas com períodos de retorno de 10 anos (A), 20 anos (B), 50 anos (C), 100 anos (D) e 500 anos (E), média de longa duração (F), mínima com permanência de 90% (G) e 95% (H) observadas versus vazões estimadas, coeficiente de determinação ajustado (R^2a), erro padrão fatorial (σF) e erro percentual médio (ER%), obtidas das equações de regressão múltipla pelo Método Tradicional para a bacia hidrográfica do rio Pardo - BA, acompanhada da suas retas de identidade	46
Figura 3. Vazões máximas ($m^3 s^{-1}$) com período de retorno de 10 anos (Q_{max10}) (A), 20 anos (Q_{max20}) (B), 50 anos (Q_{max50}) (C), 100 anos (Q_{max100}) (D) e 500 anos (Q_{max500}) (E), vazão média de longa duração ($m^3 s^{-1}$) (Q_{mld}) (F) e vazões mínimas ($m^3 s^{-1}$) com recorrência de 90% (Q_{90}) (G) e 95% (Q_{95}) (H) na curva de permanência, estimadas a cada 10km para o rio Pardo - BA	47
Figura 4. Bacia hidrográfica do rio Pardo	55
Figura 5. A - Modelo para geração de área de drenagem correspondente a pontos espaçados a cada 1km para a bacia hidrográfica do rio Pardo; B - Modelo para geração automática do comprimento total da rede de drenagem a cada 1km no rio Pardo	58
Figura 6. Tela de abertura do Programa para estimativa de vazões da parte baiana da bacia hidrográfica do rio Pardo (QPARDO).....	59
Figura 7. Tela inicial do software com camadas carregadas	60
Figura 8. Localização do ponto da hidrografia mais próximo das coordenadas inseridas.	61
Figura 9. Exemplo de aplicação de localização manual do ponto para estimativa de vazões.	62

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Vazões mínimas com permanência de 90% (Q_{90}) e 95% (Q_{95}) na série histórica, vazões médias anuais de longa duração (Q_{mld}) e vazões máximas anuais com períodos de retorno de 10 (Q_{max10}), 20 (Q_{max20}), 50 (Q_{max50}), 100 (Q_{max100}) e 500 anos (Q_{max500}) obtidos para as estações consideradas neste estudo	44
Tabela 2. Equações de regressão ajustadas	45
Tabela 3. Coeficientes angular da reta (b) para Q_{90} e Q_{mld} ajustados a partir do método da conservação de massas para estimativa das vazões em afluentes de níveis 5 e 6 (Ottocodificação) que drenam diretamente para calha do rio Pardo	48
Tabela 4. Características morfométricas das áreas de drenagem das estações utilizadas no estudo.....	60

LISTA DE SIMBOLOS

U_3	0,0013038566
d_3	0,001308
U_4	0,0081523408
C_2	0,010328
U_2	0,05735670910
d_2	0,189269
U_0	0,27777579313
U_1	0,3132617714
C_1	0,802853
d_1	1,432788
C_0	2,515517
e	2,718281828446
π	3,14159265359
A	Área (m ²)
A	Assimetria
\ln	Base logarítmica natural
Φ	Características fisiográficas e/ou meteorológicas
C	Características fisiográficas e/ou meteorológicas
b	Coefficiente angular da reta
Kc	Coefficiente de compacidade
R^2	Coefficiente de determinação
R^2_a	Coefficiente de determinação ajustado
CV	Coefficiente de variação
Lm	Comprimento do escoamento do ponto mais remoto até a foz (m)
Lp	Comprimento do rio principal (m)
Lt	Comprimento total da rede de drenagem (m)
θ_R	Conjunto de variáveis hidrológicas regionais de interesse
Dd	Densidade de drenagem

S	Desvio padrão da amostra ($m^3 s^{-1}$)
σ	Desvio padrão populacional ($m^3 s^{-1}$)
S_{ln}	Desvio padrão dos logaritmos da amostra ($m^3 s^{-1}$)
σ_{ln}	Desvio padrão dos logaritmos populacional ($m^3 s^{-1}$)
z	Distribuição normal padrão
σ_F	Erro Padrão Fatorial
δ	Erro padrão pertinente a cada função de probabilidade
ER%	Erro Percentual
a	Estimativa amostral da assimetria
Kf	Fator de Forma
K_t	Fator de frequência ($m^3 s^{-1}$)
Γ	Função Gama
xi	i-ésimo evento da amostra ($m^3 s^{-1}$)
F_i	i-ésimo fator adimensional
Q_i	i-ésimo valor de vazão de evento extremo anual ($m^3 s^{-1}$)
φ	Intervalo de confiança
Y	$\ln(X)$
M	Magnitude de um evento para um período de retorno estabelecido (m^3/s)
μ_{ln}	Média dos logaritmos de X ($m^3 s^{-1}$)
Q_m	Média dos valores da série de eventos extremos anuais ($m^3 s^{-1}$)
μ	Média populacional ($m^3 s^{-1}$)
N	Número de Eventos
α	Parâmetro de escala
β	Parâmetro de forma
γ	Parâmetro de posição
P	Perímetro (m)
T	Período de retorno (anos)
t	Período de retorno (anos)
H_R	Relação funcional
W_i	Soma de variáveis aleatórias ($m^3 s^{-1}$)
ϑ_R	Termo relacionado ao ajuste do erro
σ^2	Variância populacional ($m^3 s^{-1}$)

S^2	Variância populacional ($m^3 s^{-1}$)
σ_{ln}^2	Variância dos logaritmos populacional ($m^3 s^{-1}$)
S_{ln}^2	Variância dos logaritmos populacional ($m^3 s^{-1}$)
x	Variável aleatória ($m^3 s^{-1}$)
X	Variável que resulte da ação multiplicativa de um grande número de componentes aleatórios
Q_e	Vazão Estimada ($m^3 s^{-1}$)
Q_{max10}	Vazão máxima com período de retorno de 10 anos ($m^3 s^{-1}$)
Q_{max100}	Vazão máxima com período de retorno de 100 anos ($m^3 s^{-1}$)
Q_{max20}	Vazão máxima com período de retorno de 20 anos ($m^3 s^{-1}$)
Q_{max50}	Vazão máxima com período de retorno de 50 anos ($m^3 s^{-1}$)
Q_{max500}	Vazão máxima com período de retorno de 500 anos ($m^3 s^{-1}$)
Q_{mld}	Vazão média de longa duração ($m^3 s^{-1}$)
Q_{90}	Vazão mínima com incidência de 90 % na curva de permanência ($m^3 s^{-1}$)
Q_{95}	Vazão mínima com incidência de 95 % na curva de permanência ($m^3 s^{-1}$)
Q_0	Vazão Observada ($m^3 s^{-1}$)
Q	Vazão regionalizada ($m^3 s^{-1}$)

CAPÍTULO 1 – Estimativas de vazões em bacias hidrográficas – revisão de métodos de regionalização de vazões

Resumo: O presente trabalho compreende uma revisão dos métodos de estimativas de vazões em bacias hidrográficas sem dados. Entre as discussões descritas, incluem a disponibilidade hídrica e contexto históricos das ferramentas de gestão utilizadas no Brasil. São discutidos ainda, métodos de distribuição de probabilidade mais utilizados para estimativas de vazões. Dentre as diversas propostas de classificação dos modelos hidrológicos, destaca-se a divisão em Modelos Dependentes e Modelos Independentes, sendo enfatizado a aplicação dos modelos mais utilizados no Brasil.

Palavras-chave: recursos hídricos, modelos hidrológicos, modelos de distribuição de probabilidade

CHAPTER 1 - Streamflow estimates in watershed - review of stream flow regionalization methods

Abstract: The present work consists of a review about methods of estimation of flows in watersheds without data. Among the discussions described, it includes the water availability and the historical context of the management tools used in Brazil. Also, it has been discussed methods of probability distribution and used for flow estimations. Among the several proposals for hydrological models classification, a distinction is highlighted in Dependent Models and Independent Models, emphasizing an application of the most commonly used models in Brazil.

Key words: water resources, hydrological models, probability distribution models

1. INTRODUÇÃO

Os diversos usos da água vêm acarretando necessidade de ferramentas eficazes para seu gerenciamento, capazes de avaliar a real disponibilidade de água a fim de minimizar os conflitos existentes. Assim, de acordo com Ibiapina et al. (1999) para minimizar conflitos associados ao uso dos recursos hídricos é fundamental conhecer o comportamento da bacia hidrográfica e seus regimes de chuva e vazão, o que exige a coleta e interpretação de dados. Neste contexto, a existência de um monitoramento

hidrológico é indispensável para o entendimento dos regimes de chuva e vazão em cursos de água, visto que nenhuma tecnologia substitui os dados provenientes de tais monitoramentos (Beskow et al., 2013; Javeed & Apoorva, 2015).

A maioria dos rios, trechos e afluentes no mundo não possuem monitoramento adequado em termos de quantidade e qualidade de dados (Young, 2006). Os altos custos de implantação, atrelado a amplas redes de drenagem, sobretudo em regiões remotas, dificultam o monitoramento (Sivapalan et al., 2003; Mishra & Coulibaly, 2009), principalmente em se tratando de países com grandes extensões territoriais como o Brasil.

Com intuito de potencializar os dados disponíveis, suprimindo a carência de dados, hidrólogos do mundo inteiro têm respondido a este desafio através do desenvolvimento de diversas ferramentas de previsão, que são comumente referidos como métodos de regionalização (Blöschl & Sivapalan, 1995; Sivapalan et al., 2003; & Yadav et al., 2007).

Técnicas de regionalização de vazões tem por finalidade a estimativa de vazão em locais sem dados, destacando-se como principal ferramenta de extrapolação de dados disponíveis na estimativa de variáveis hidrológicas. Para Blöschl & Sivapalan (2006) a técnica se baseia na similaridade entre bacias hidrográficas para o processo de transferência de informações. A técnica vem sendo aplicada para suprir a deficiência da rede hidrométrica do Brasil com o objetivo de disponibilizar informações em locais sem dados ou com poucas informações disponíveis (Da Silva, 2012; Tara & Caulibly, 2013).

2. DISPONIBILIDADE HÍDRICA

Nas últimas décadas têm sido evidenciados fortes indícios de anomalias climáticas no planeta, interferindo no regime de chuvas e vazões acarretando na diminuição da disponibilidade hídrica em algumas regiões continentais (Tomasoni et al., 2009). Atrelado a isso, o manejo inadequado das bacias hidrográficas, crescimento populacional e aumento nos padrões de consumo vêm agravando os problemas relacionados ao acesso à água.

O Brasil é um país que, em termos quantitativos, possui um dos maiores contingentes hídricos superficiais do mundo, entretanto são evidenciados problemas na disponibilidade hídrica em algumas localidades. Dentre os motivos relacionados a disponibilidade hídrica que contribuem para escassez estão: a variabilidade temporal das chuvas; aumento da demanda em virtude de grandes centros urbanos, manejo e uso inadequado do solo; além de aspectos relacionados a qualidade da água (ANA, 2013).

A escassez hídrica atrelada a gestão inadequada dos recursos hídricos acarreta conflitos entre os usuários. A fim de minimizar conflitos, faz-se necessário que a gestão descentralizada e participativa obtenha o suporte dos estudos de disponibilidade hídrica da região, permitindo evidenciar padrões temporais de chuva e vazões, manejo adequado do solo, além de aspectos de qualidade da água disponível. Tais estudos permitem aos usuários avaliar a melhor forma de gerenciar o recurso.

3. GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

Até a década de 1940 a água no Brasil era de interesse puramente econômico, tratada apenas como um insumo de produção, não sendo vinculada a interesses sociais ou ambientais. Entre as décadas de 50 à 70 a água passou a ter foco na geração de energia para o uso industrial (Barros & Barros, 2009). Nas décadas seguintes o país sofreu grande mudança no paradigma da gestão ambiental impulsionada por pressões internacionais e movimentos ambientais. No ano de 1988 a Constituição Federal em seu art. 20, inciso III, definiu a água como bem de uso comum, além de instituir no art. 21, o Sistema Nacional de Recursos Hídricos e definição de critérios para outorgar direitos de uso (Brasil, 1988).

O artigo 21 da Constituição Federal de 1988 inspirou a criação da Lei nº 9.433 de 1997, a qual instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Recursos Hídricos, sendo um avanço na busca da gestão descentralizada do recurso, visando garantir a gerações futuras a disponibilidade hídrica, conferindo ao país uma das legislações mais avançadas no mundo neste setor (Porto & Porto, 2008). A lei institui a água como bem de domínio público, finito, vulnerável e dotado de valor econômico, adotando a bacia hidrográfica como unidade de planejamento sendo gerida de forma descentralizada e participativa (Brasil, 1997).

Para a implantação da Política Nacional de Recursos Hídricos a lei dispõe de 5 instrumentos básicos, sendo eles: os Planos de Recursos Hídricos, o enquadramento dos corpos hídricos em classes de uso preponderantes, a outorga de direito de uso dos recursos hídricos, a cobrança pelo uso dos recursos hídricos, o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

A outorga de direito ao uso da água, tem por objetivo assegurar controle quantitativo e qualitativo do recurso, permitindo efetivo direito ao seu acesso (Brasil, 1997), sendo concedida mediante análise de vazões mínimas e de referência, variando de acordo com regime e jurisdição do afluente.

O Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos tem por objetivo disponibilizar informações da quantidade e qualidade dos recursos hídricos do Brasil, fornecendo subsídios para realização de estudo de vazão em cursos de água, imprescindíveis para elaboração dos Planos de Recursos Hídricos (Brasil, 1997).

4. ESTUDOS DE VAZÃO EM CURSOS DE ÁGUA

As vazões dos rios consistem em respostas hidrológicas altamente variáveis no espaço e tempo (Alcázar & Palau, 2010), ou seja, assumem valores distintos em função das coordenadas do ponto de interesse e do tempo. O mesmo ocorre para diversos processos hidrológicos, sendo usualmente fixado o local para facilitar a análise dos dados, originando variáveis aleatórias no tempo.

Além disso, os processos hidrológicos não são contínuos no tempo, inferindo na necessidade de discretização das variáveis aleatórias temporais para sua representação em sistemas computacionais, ou seja, os valores das variáveis são tratados em instantes ou períodos sucessivos de tempo (Tucci, 2013). Tais dados permitem formar séries amostrais que podem ser submetidas à análise estatística para definição da probabilidade de ocorrência de certos eventos. No Brasil, uma das formas de obtenção de séries históricas de dados hidrológicos é pela Agência Nacional das Águas (ANA), que disponibiliza os dados por meio do sistema Hidroweb.

A principal variável utilizada para a avaliação das modificações quantitativas nos ambientes aquáticos é a vazão. Definida pelo volume de água que passa em uma seção transversal da calha do rio por unidade de tempo, a vazão é a base para diversos componentes na avaliação de processos ecológicos. As vazões podem ser estudadas em termos de sua probabilidade de ocorrência vinculadas a períodos de retorno, sendo comum a sua classificação em máximas, médias e mínimas (Naghetini & Pinto, 2007). A estimativa destas vazões é realizada por meio de distribuições de probabilidade com base em séries históricas de dados de vazão.

4.1. Vazões máximas, médias e mínimas

A vazão máxima se refere a valores extremos associados a uma dada frequência de ocorrência. Tal frequência é caracterizada pelo período de retorno ou período de recorrência (em anos) que pode ser definido como o risco de determinado evento ocorrer ao menos uma vez em um intervalo de tempo pré-estabelecido. Consistem em informações de grande importância no estudo de enchentes e imprescindíveis para

elaboração de projetos de obras hidráulicas tais como vertedouros de barragens, galerias de águas pluviais, dimensionamento de pontes e reservatórios de amortecimento de cheias (Tucci, 2013).

As vazões médias permitem avaliar o potencial hídrico de bacias hidrográficas e, ainda, definir o potencial energético destas. No que diz respeito a vazões médias é de grande interesse hidrológico as médias anuais de longa duração e médias mensais de longa duração. A vazão média de longa duração permite avaliar o potencial hídrico superficial da bacia hidrográfica pela análise direta do valor, ou seja, pela análise da vazão específica, calculada a partir da relação entre vazão média de longa duração e a área da bacia (Tucci, 2013).

As vazões médias mensais de longa duração, permitem análise de distribuição temporal (sazonalidade) das vazões e a identificação do início do ano hidrológico a ser considerado para a região em estudo.

Em estudos hidrológicos, vazões mínimas são caracterizadas pela sua duração e frequência de ocorrência, associada ao período de retorno do evento considerado. As vazões mínimas são importantes no contexto de gestão dos recursos hídricos, uma vez que consistem em referência para controle da vazão possível de ser captada, sendo instrumento base para a outorga de direito ao uso do recurso hídrico (Tucci, 2013).

Na prática, os valores de vazões mínimas utilizados para concessão de outorga de direito ao uso do recurso hídrico no Brasil a depender do estado são Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$. A Q_{90} (vazões com permanência de 90% na série histórica) é utilizada como referência para concessão de outorgas em estados como Bahia, Ceará, Paraíba, Sergipe, entre outros. A vazão Q_{95} (vazões com 95% de permanência na série histórica) é utilizada como referência em estados como Goiás, Paraná, Mato Grosso, dentre outros, além de rios nacionais (rios que banhem mais de um estados ou fazem divisa entre eles). Os estados que utilizam a $Q_{7,10}$ (vazão com sete dias de duração na série histórica e período de retorno de dez anos) como referência para concessão de outorgas são Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo (ANA, 2014).

4.2. Estimativa de vazões máximas e mínimas

A maior parte dos processos hidrológicos são considerados estocásticos, por conterem elementos de aleatoriedade, significando dizer que suas ocorrências não podem ser conhecidas (Tucci, 2013). Diante da necessidade de prever eventos futuros em processos

estocásticos faz-se necessária a amostragem dos eventos ocorridos, visando determinar a frequência e a probabilidade de ocorrência de um determinado evento.

A determinação da probabilidade de ocorrência de eventos futuros é feita a partir de modelos de distribuição de probabilidade. Os modelos de distribuição de probabilidade aplicados a hidrologia podem ser empíricos ou teóricos. Os modelos empíricos permitem avaliar a frequência e a probabilidade de um evento registrado ocorrer. Porém, quando surge a necessidade da estimativa da probabilidade de ocorrência de um evento não registrado faz-se necessária a extrapolação da série amostral, para isso são utilizados modelos de distribuição de probabilidade teóricos.

Dentre as distribuições de probabilidade teóricas, as mais utilizadas para estimativa de vazões são os modelos Normal, Log-Normal I, II e III parâmetros, Pearson, Log-Pearson I, II e III parâmetros, Weibull e Gumbel.

A distribuição de Gumbel é utilizada exclusivamente para estimativa de vazões máximas, enquanto que a de Weibull é utilizada apenas para estimativa de vazões mínimas. As demais distribuições citadas podem ser utilizadas na estimativa de ambas vazões, máximas e mínimas.

Visando facilitar o cálculo de estimativas de vazões, Chow (1964) propôs que a estimativa de uma variável hidrológica associada a um período de retorno pode ser calculado com base na média populacional (μ), somada ao produto do desvio padrão populacional (σ) por um fator de frequência (K_t) que varia em função da distribuição de probabilidade empregada na análise e período de retorno, conforme a equação:

$$X_t = \mu + K_t\sigma \quad (1.1)$$

em que, X_t representa a variável hidrológica associada a um período de retorno; μ , corresponde à média populacional; σ é o desvio padrão populacional e; K_t o fator de frequência populacional.

Para a identificação do modelo que melhor represente uma variável para uma dada condição, são aplicados os chamados testes de aderência dentre os quais os mais utilizados em estudos hidrológicos são os de Kolmogorov-Smirnov e Quiquadrado (Naghattini & Pinto, 2007).

4.2.1. Distribuição Normal

Utilizada para estimar o comportamento de uma variável aleatória que flutua de forma simétrica em torno de um valor central, a distribuição Normal é apropriada para a modelação de variáveis que resultam da soma de um grande número de outras variáveis independentes (Naghettini & Pinto, 2007).

A distribuição Normal pode ser descrita como uma variável aleatória x , formada pela soma de n variáveis aleatórias W_i conhecidas, sendo possível calcular o valor esperado da variável x , bastando para isso cumprir as seguintes condições: a) o número n de variáveis W_i seja grande; b) W_i sejam variáveis independentes e identicamente distribuídas; c) W_i sejam variáveis independentes, mas não identicamente distribuídas, desde que nenhuma delas seja dominante; d) W_i não sejam independentes mas se correlacionam com poucas variáveis deste conjunto, e a terceira condição ocorre (Tucci, 2013). Cumpridos os requisitos especificados, obtém-se a seguinte relação:

$$f[x] = \frac{1}{\sigma^2 \sqrt{2\pi}} e^{-0,5 \left(\frac{x-\mu}{\sigma^2}\right)^2} \quad (1.2)$$

em que μ é a média dos valores populacionais e σ^2 a sua variância populacional.

A distribuição Normal não possui solução analítica, gerando a necessidade de integração numérica para a obtenção $f(x)$ para diferentes pares de μ e σ^2 . Para sanar tal inconveniente foi desenvolvido o seguinte teorema:

$$P[X \leq x] = P\left[z \leq \frac{x - \mu}{\sigma^2}\right] = f[z] \quad (1.3)$$

Com efeito, a distribuição Normal recebe o nome de distribuição Normal Padrão:

$$f[x] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-0,5 z^2} \quad (1.4)$$

Os valores da função de probabilidades acumuladas da distribuição normal padrão z são obtidas pela integração numérica, sendo estes disponíveis de forma tabular.

O fator de frequência da distribuição de probabilidade Normal, segundo Kite (1977), é dado por:

Para $P(X \leq x) > 0,5$:

$$K_t = \left(W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \right) \quad (1.5)$$

em que:

$$W = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1 - P(X \leq x))^2} \right)} \quad (1.6)$$

em que os valores das constantes são: $C_0 = 2,515517$; $C_1 = 0,802853$; $C_2 = 0,010328$; $d_1 = 1,432788$; $d_2 = 0,189269$ e $d_3 = 0,001308$.

4.2.2. Distribuição Log-Normal

A distribuição Log-Normal pode ser descrita com a suposição de que uma variável X resulte da ação multiplicativa de um grande número de componentes aleatórios independentes X_i ($i = 1, 2, \dots, n$), ou seja, os valores sucessivos da variável são dados pelo valor que assumiu previamente, somado ao produto deste valor por outra variável aleatória, sendo ambas parcelas modificadas por parâmetros α e β específico para o instante considerado $X = X_1, X_2, \dots, X_n$ (Naghetini & Pinto, 2007; Tucci, 2013).

Do mesmo modo acontece com a variável $Y = \ln(X)$, tal que $Y = \ln(X_1) + \ln(X_2) + \dots + \ln(X_n)$, ao aplicar o teorema do limite central, sendo caracterizada como a distribuição Log-Normal. Os parâmetros modificadores da equação serão μ_{\ln} e σ_{\ln}^2 , quando n for suficientemente grande para permitir a convergência (Naghetini & Pinto, 2007). A função densidade de probabilidade da distribuição Log-Normal é dada por:

$$P[x] = \frac{1}{x \cdot \sigma_{\ln}^2 \sqrt{2\pi}} e^{-0,5 \left(\frac{\ln(x) - \mu_{\ln}}{\sigma_{\ln}} \right)^2} \quad (1.7)$$

em que μ_{\ln} é a média dos logaritmos de X e; σ_{\ln}^2 a sua variância destes logaritmos, determinados por:

$$\mu = e^{\mu_{ln} + 0,5 \sigma_{ln}^2} \quad (1.8)$$

$$\sigma^2 = \mu^2 \left[e^{\sigma_{ln}^2} - 1 \right] \quad (1.9)$$

o coeficiente de variação é dado por:

$$CV = \frac{\sigma^2}{\mu} \quad (1.10)$$

A distribuição Log-Normal de 3 Parâmetros difere da anterior apenas pela representação do limite inferior da variável X, tornando a variável $Y = \ln(X-a)$, sendo a função densidade a seguinte:

$$P[x] = \frac{1}{(x-a) \cdot \sigma_n^2 \sqrt{2\pi}} e^{-0,5 \left(\frac{\ln(x-a) - \mu_n}{\sigma_n} \right)^2} \quad (1.11)$$

em que:

$$\mu = a - e^{\mu_{ln} + 0,5 \sigma_{ln}^2} \quad (1.12)$$

$$\sigma^2 = \left[e^{\sigma_{ln}^2} - 1 \right] e^{(2\mu + \sigma_{ln}^2)} \quad (1.13)$$

O fator de frequência da distribuição Log-Normal é similar ao da distribuição normal, aplicada os logaritmos neperianos dos elementos da amostra. A equação de Chow (1964) é reescrita da seguinte forma:

$$X_t = e^{(\mu_{ln} + S_{ln} K_t)} \quad (1.14)$$

em que X_t é a estimativa da variável hidrológica associada a um período de retorno; μ_{ln} é a média dos logaritmos de X; S_{ln} é o desvio padrão dos logaritmos da amostra e; K_t é o fator de frequência.

4.2.3. Distribuição de Pearson tipo III

A distribuição Pearson tipo III é aplicada a variável X com comportamento de uma distribuição Gama, possuindo parâmetros de escala α e forma β (Naghattini & Pinto, 2007). A função de densidade de probabilidade é dada por:

$$f[x] = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x-\gamma}{\alpha}\right) \quad (1.15)$$

em que α é parâmetro de escala, β parâmetro de forma e γ parâmetro de posição.

A média, variância e assimetria são calculadas pelas seguintes equações:

$$\mu = \alpha\beta + A \quad (1.16)$$

$$\sigma^2 = \alpha^2\beta \quad (1.17)$$

$$A = \frac{2}{\sqrt{\beta}} \quad (1.18)$$

De acordo com Kite (1977) seu fator de frequência é dados por:

$$K_t = D + (D^2 - 1)\frac{A}{6} + \frac{1}{3}(D - 6D)\left(\frac{A}{6}\right)^2 - (D^2 - 1)\left(\frac{A}{6}\right)^3 + D\left(\frac{A}{6}\right)^4 + \frac{1}{3}\left(\frac{A}{6}\right)^5 \quad (1.19)$$

em que:

$$D = t - \frac{2,30753 + 0,27061 * t}{1 + 0,99229 * t + 0,04481 * t^2} \quad (1.20)$$

$$A = \frac{N}{(N-1)(N-2)} \sum_{i=1}^N \left(\frac{(x_i - \mu)^3}{D^3} \right) \quad (1.21)$$

em que, D representa o desvio padrão padronizado; A simboliza a assimetria; t corresponde ao período de retorno (anos); N indica o número de eventos da amostra; x_i o i -ésimo evento da amostra; μ é a média dos eventos; e S o desvio padrão.

4.2.4. Distribuição Log-Pearson Tipo III

De acordo com Kite (1977) a distribuição Log-Pearson tipo III, também conhecida como distribuição Log-Gama tipo III, foi criada para séries geradas a partir dos logaritmos dos eventos da série de dados, sua função densidade é calculada por:

$$f[x] = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left(\frac{\ln(x) - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left(- \frac{\ln(x) - \gamma}{\alpha} \right) \quad (1.22)$$

em que α é parâmetro de escala, β parâmetro de forma e γ parâmetro de posição.

A média da distribuição Log-Pearson tipo III é dada por:

$$\mu = \frac{e^\gamma}{(1 - \alpha)^\beta} \quad (1.23)$$

O fator de frequência da distribuição Log-Pearson tipo III é dado pela Eq. 1.19. Para a estimativa da variável hidrológica associada a um período de retorno deve-se aplicar logaritmos neperianos às variáveis μ e σ da distribuição Pearson tipo III, conforme Kite (1977), originando a seguinte equação:

$$Y_t = \ln X_t = \mu_{\ln} + D_{\ln} K_t \quad (1.24)$$

em que X_t é a estimativa da variável hidrológica associada a um período de retorno; μ_{\ln} é a média dos logaritmos de X ; D_{\ln} é o desvio padrão dos logaritmos da amostra e; K_t é o fator de frequência.

4.2.5. Distribuição de Gumbel

A distribuição Gumbel, segundo Tucci (2013), pode ser definida como uma série de variáveis aleatórias Y_t formada pelos valores máximos, onde serão retirados um valor de cada série de variáveis aleatórias $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ e aplicada as seguintes suposições:

a) X é limitada apenas na direção positiva; b) a parte superior da distribuição de X é do tipo exponencial. Desta forma, é possível determinar a função cumulativa de probabilidade, sendo a densidade de probabilidade dada por:

$$f[y] = \alpha e^{-\alpha(y-\beta)-e^{-\alpha(y-\beta)}} \quad (1.25)$$

em que α é um parâmetro de escala e β parâmetro de locação.

A média, a variância e o coeficiente de assimetria de Y são respectivamente:

$$\mu = \beta + 0,577\alpha \quad (1.26)$$

$$\sigma^2 = \frac{1,645}{\alpha^2} \quad (1.27)$$

$$A = 1,1396 \quad (1.28)$$

Segundo Kite (1977), o fator de frequência da distribuição Gumbel é calculado a partir da equação:

$$K_t = - \left[0,45 + \frac{1}{1,283} \ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) \right] \quad (1.29)$$

em que T corresponde ao período de retorno desejado em anos.

4.2.6. Distribuição de Weibull

Seja um conjunto de N variáveis aleatórias originais (X_1, X_2, \dots, X_n), independentes e igualmente distribuídas conforme um modelo F(x) de cauda inferior limitada, a função de densidade de probabilidade será:

$$f[z] = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{z}{\beta} \right)^{\alpha} \exp \left[- \left(\frac{z}{\beta} \right)^{\alpha} \right] \quad (1.30)$$

em que β é parâmetro de escala e α parâmetro de forma.

A média, variância e assimetria da distribuição de Weibull é dada, respectivamente, por:

$$\mu = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (1.31)$$

$$\sigma^2 = \beta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right] \quad (1.32)$$

$$A = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{\alpha}\right) - 3\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right)\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) + 2\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right]^{1,5}} \quad (1.33)$$

Observa-se que a assimetria varia apenas em função do parâmetro de escala (α), permitindo a obtenção da estimativa de α por meio da assimetria. Kite (1977) propõe uma relação inversa entre o parâmetro de escala e a assimetria, dada por:

$$\alpha = \frac{1}{U_0 + U_1 a + U_2 a^2 - U_3 a^3 - U_4 a^4} \quad (1.34)$$

em que $U_0 = 0,2777757913$, $U_1 = 0,3132617714$, $U_2 = 0,0575670910$, $U_3 = 0,0013038566$ e $U_4 = -0,0081523408$ e a corresponde a estimativa amostral da assimetria, que deverá estar entre -1,02 e 2 para validade da equação.

A função Gama $\Gamma(X)$ é dada por:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} X^{x-1} e^{-x} dx \quad (1.35)$$

O fator de forma da distribuição de Weibull, segundo Kite (1977) é calculado pela seguinte equação:

$$K_t = A(\alpha) + B(\alpha) \left\{ \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right\} \quad (1.36)$$

em que:

$$A(\alpha) = \left[1 - \Gamma \left(\frac{1}{\alpha} \right) \right] B(\alpha) \quad (1.37)$$

$$B(\alpha) = \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{\alpha} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \right]^{\frac{-1}{2}} \quad (1.38)$$

5. MODELOS HIDROLÓGICOS

Modelos são ferramentas que produzem representação simplificada da realidade ou de uma ideia construída com propósito ou função heurística, a fim de melhor compreensão do objetivo (físico ou teórico) do fenômeno em estudo (Da Silva & Nuñez, 2007),

Visando prever cenários futuros a partir de dados conhecidos, hidrólogos do mundo inteiro passaram a utilizar modelagem na hidrologia. Um modelo hidrológico é definido como conjuntos de leis físicas e empíricas expressas na forma matemática do fluxo de água e seus constituintes, que combinadas produzem respostas (saídas) em função de condições conhecidas ou assumidas (entradas) sobre alguma parte da superfície ou subsuperfície terrestre (Silveira, 2003; Renno & Soares, 2003).

A modelagem hidrológica visa representar diferentes processos que ocorrem em bacias hidrográficas, auxiliando na tomada de decisões em cenários dinâmicos permitindo se aproximar de compreensão mais ampla do ciclo hidrológico e subsidiando a adoção de medidas preventivas (Renno & Soares, 2003; Saraiva, 2010; Sun et al., 2012).

Um processo pode ser representado de diferentes maneiras, assim, não existe um modelo único, que seja o melhor e sim, pode existir aquele que melhor se adequa a representação de determinado fenômeno (Renno & Soares, 2003). Os processos ambientais são bastante complexos sendo impossível sua representação com conjunto de equações matemáticas de forma fidedigna, tornando necessário simplificações para o seu uso (Steyaert, 1993).

5.1. Classificação dos modelos

Existem diferentes tipos de modelos nos quais podem ser classificados segundo vários critérios, não havendo assim consenso sobre a melhor forma de agrupá-los. Singh (1995) propõe a classificação com base na descrição dos processos utilizados na modelagem, técnica de solução e escalas espacial. Quanto a descrição do processo ou tipo de variável, os modelos podem ser classificados em determinísticos ou estocásticos. Para a escala espacial podem ser distribuídos ou concentrados. A escala temporal é dividida por eventos contínuos ou discretizados em intervalos diários, mensais ou anuais. Por fim o método de solução pode ser numérico, analógico ou analítico.

Tucci (2013) divide os modelos segundo o tipo de variável a ser utilizada (estocástico ou determinístico), em relação as variáveis (empíricas ou conceituais), a representação dos dados (discretos ou contínuos), e por fim as relações espaciais (concentrados ou distribuídos). Além desses Moreira (2005) propõe a existência de dependência temporal, dividindo-se em estacionários ou dinâmicos.

Modelos determinísticos não apresentam variabilidade em seus resultados, sendo que a mesma entrada irá representar a mesma saída, enquanto os modelos estocásticos são baseados em leis de probabilidade, possuindo componentes aleatórios que superpõem a regularidade (Naghetini & Pinto, 2007), desta forma, a mesma entrada irá resultar em uma faixa de valores resultantes, não em um valor fixo, como nos determinísticos.

Modelos conceituais buscam representar os fenômenos do sistema baseados em processos físicos de forma simplificada. Se fenômenos observados forem representados com base em relações matemáticas ou estatísticas, este é tido como empírico (Tucci, 2005).

Modelos que variam continuamente no tempo, ou seja, possuem ocorrência em um tempo determinado, são denominados contínuos, enquanto que variáveis que oscilam sem haver uma correlação com o tempo são designados como discretos.

Os modelos concentrados assumem que os parâmetros e variáveis variam apenas com o tempo, enquanto que os modelos distribuídos variam não só no tempo como também no espaço (Lou, 2010).

Naghetini & Pinto (2007) afirmam que os processos relacionados ao ciclo hidrológico podem ser classificados de forma simplificada como determinísticos e estocásticos, embora geralmente seja uma combinação de ambos. Tais subdivisões tem papel exclusivamente didático, de forma a facilitar o entendimento do comportamento dos

modelos. Entretanto, modelos mais recentes buscam melhores resultados a partir da combinação de diversas classes de modelos.

6. REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

A regionalização hidrológica é caracterizada como qualquer processo de transferência de informações hidrológicas para outros locais, onde estas são necessárias, mas não se encontram disponíveis (Bloschl & Silvapalan, 2006; Silvapalan et al., 2003; Tara & Cauliby, 2013; Javeed & Apoorva, 2015).

O método pode ser aplicado a séries de vazões e/ou precipitações, ou até mesmo determinados parâmetros estatísticos relevantes, tais como: média, variância, máximas e mínimas ou, ainda, equações e parâmetros relacionados com estas estatísticas, tais como curva de permanência e curva de duração (Vendruscolo, 2005).

A transferência deve ser compreendida apenas em áreas com comportamento semelhante, permitindo o aprimoramento da rede de coletas de dados hidrológicos. A medida que a metodologia de regionalização explora melhor as informações disponíveis, identificando lacunas, evidencia-se a importância de uma boa rede de monitoramento hidrológico, visto que nenhum, estudo de regionalização tem a capacidade de substituí-la (Tucci, 2013).

A sua aplicação está condicionada a três questões: (i) quais informações serão transferidas?; (ii) qual o método a ser utilizado na transferência?; e (iii) a partir de qual zona a informação será gerada para transferi-la ao local de interesse (Merz & Bloschl, 2004). Em geral, a similaridade entre regiões ou bacias hidrográficas está nas características geomorfológicas, uma vez que agem diretamente nos diferentes comportamentos do regime hidrológico de uma bacia hidrográfica (Tucci, 2002).

Os estudos de regionalização hidrológica foram motivados inicialmente para dimensionar obras hidráulicas e geração de energia hidroelétrica. Entretanto, graças a recente valorização do gerenciamento da água, assumiu relevante importância no cenário da hidrologia no Brasil. A aplicação da técnica na concessão de outorgas de direito ao uso da água, a partir da análise do potencial da bacia hidrográfica, bem como a análise de vazões máximas médias e mínimas, vazão ecológica, entre outros, expandidas para locais carentes de estações pluviométricas e fluviométricas, possibilita gerir de forma adequada as bacias hidrográficas.

Em geral um modelo de regionalização pode ser indicado pela equação, como proposto por Wagener & Wheeler (2004).

$$\theta_L = H_R(\theta_R|\Phi) + \vartheta_R \quad (1.39)$$

em que θ_L é a variável hidrológica a ser estimada na bacia hidrográfica sem dados (que pode ser um parâmetro estimado do modelo, a probabilidade ou a função cumulativa de distribuição do parâmetro, ou respostas hidrológicas tais como vazão ou fluxo de um determinado evento); H_R é a relação funcional para θ_L em que é utilizada um conjunto de características da bacias hidrográficas, isto é, características fisiográficas e/ou meteorológicas (Φ); θ_R corresponde ao conjunto de variáveis hidrológicas regionais de interesse (por exemplo, os parâmetros do modelo); ϑ_R é o termo relacionado ao ajuste do erro.

Para realização da regionalização hidrológica são definidas algumas etapas que norteiam a aplicação da técnica, possibilitando visão geral do processo de regionalização. Todavia, os passos aqui citados irão variar a depender da metodologia empregada. As principais etapas da regionalização são: (i) identificação de Regiões Hidrológicamente Homogêneas; (ii) definição do método de regionalização a ser utilizado; (iii) obtenção das características fisiográficas e meteorológicas que serão aplicadas no estudo, tais características irão variar com o método a ser empregado; (iv) ajuste de um modelo de regressão para estimativa da vazão em função das características fisiográficas e meteorológicas; (iiv) avaliação do desempenho do modelo, validando os valores obtidos em testes.

Kaviski (1992) sugeriu uma classificação dos métodos de regionalização em quatro grupos: (i) técnicas empíricas; (ii) técnicas de expansão das séries; (iii) técnicas de regressão; (iv) técnicas de mapeamento regional.

Masih et al. (2010) classificam a regionalização hidrológica em três categorias: (i) modelos de estimativa de parâmetros através do desenvolvimento de relações de regressão entre os parâmetros do modelo e características da bacia, como exemplo podem ser citados os trabalhos de Magette (1976) e Santos & Stevaux (2015); (ii) transferência de parâmetros do modelo, segundo o qual uma análise de similaridade entre bacias é conduzida, ou seja, definição de Regiões Hidrológicamente Homogêneas, e os parâmetros da bacia aferida são utilizados na simulação para a bacia sem dados, um exemplo da aplicação desta metodologia seria o Kokkonen et al. (2003); e (iii) outras técnicas de regionalização como a interpolação espacial de parâmetros ou com o agrupamento de

dados regional para a estimativa de parâmetros para a bacia sem dados, sendo os trabalhos de Merz & Blöschl (2004) e Goswami et al. (2007) exemplos destes, respectivamente.

Razavi & Coulibaly (2013) propõem a divisão dos conhecimentos de regionalização hidrológica em modelos dependentes e modelos independentes. Os modelos dependentes são caracterizados pela transferência de parâmetros do modelo chuva-vazão entre bacias, sendo esses utilizados para gerar a vazão contínua na bacia alvo, ou seja, transferem parâmetros de modelos de bacias calibradas para bacias sem dados. O segundo grupo transfere a equação e características, não sendo necessário estimar séries temporais de vazão por meio de modelos chuva-vazão, nem a transferência de parâmetros do modelo hidrológico.

Nos modelos dependentes pressupõe-se que as bacias hidrográficas são semelhantes, sendo as diferenças nos parâmetros surgidas apenas de fatores aleatórios, assim, irão responder de forma idêntica as mesmas entradas. Os modelos dependentes são divididos em seis classes: (a) métodos das médias aritméticas: pressupõe que os parâmetros do modelo chuva-vazão das bacias vizinhas (local) ou todas as bacias (globais) possuem comportamento semelhante; (b) proximidade espacial: caracterizada pela transferência do conjunto de parâmetros do modelo com base em uma técnica de interpolação; (c) similaridade física: a transferência de parâmetros do modelo só é feita quando for constatada uma similaridade físicas entre as bacias em estudo; (d) relações escalares: baseada na área e outras características da bacias; (e) métodos baseados em regressão: implica no desenvolvimento de relações lineares ou não lineares entre os parâmetros do modelo e características da bacia; (f) similaridade hidrológica: considera semelhanças hidrológicas entre bacias para transferir os parâmetros do modelo.

Os modelos independentes são classificados em três grupos: (a) análise baseada em regressão: sugerindo a aplicação de regressões lineares e não lineares entre vazão e atributos da bacia hidrográfica com aplicação em redes neurais artificiais ou não; (b) relações escalares: aludindo a aplicação de relações métricas entre vazão e tamanho da bacia capazes de extrapolar os dados de bacias calibradas para bacias sem dados; (c) modelos de séries temporais: são construídas relações entre os parâmetros da série temporal de vazão (variáveis dependentes) e características da bacia (variáveis independentes).

No Brasil, dentre as técnicas de regionalização utilizadas, se destaca o método de séries temporais, também conhecido como Método Tradicional, sendo o método recomendado pela ELETROBRAS (1985) para dimensionamento de obras hidráulicas.

Neste contexto, esse trabalho irá aprofundar as discussões sobre métodos baseados em regressões sendo indicado o trabalho de Razavi & Coulibaly (2013) para consulta dos demais métodos de regionalização.

6.1. Método Tradicional

O método tradicional está pautado na análise de vazões das estações contidas na bacia hidrográfica, sendo aplicadas regressões múltiplas entre os valores de vazões e características físicas ou meteorológicas das sub-bacias, avaliando o ajuste das regressões pelo coeficiente de determinação (NERC, 1975; ELETROBRÁS, 1985). Se os valores do coeficiente de determinação não forem satisfatórios, a região é subdividida em regiões menores, com características fisiográficas e/ou meteorológicas semelhantes até atingir o ajuste desejado. A função que representa o método tradicional é:

$$Q = f(C_1, C_2, C_3, \dots, C_n) \quad (1.40)$$

em que C são as características a serem correlacionadas aos valores de vazão, sendo as mais utilizadas a área, comprimento do rio principal, comprimento total da rede de drenagem, densidade de drenagem, declividade média da bacia hidrográfica, declividade média do rio principal e precipitação média anual.

Tucci (2005) recomenda ajustar o modelo com o menor número possível de variáveis, observando se a adição de uma variável resulta em mudanças significativas nos valores dos coeficiente de ajuste utilizados. O maior número de variáveis torna o modelo complexo, inviabilizando ou dificultando a sua aplicação de forma sistêmica.

6.1.1. Características físicas e meteorológicas

Para realizar o processo de regionalização de vazões é necessário correlacionar os valores de vazão com variáveis ou combinação e variáveis que possuam alguma relação direta ou indireta com a mesma, sejam estas características físicas e/ou climáticas. Simultaneamente, são avaliados os modelos de regressão que melhor representem os valores dos parâmetros na função (Vendruscolo, 2005).

Rodriguez (2008) afirma que as características físicas mais utilizadas no processo de regionalização pelo método tradicional são a área de drenagem, o comprimento do rio principal, a densidade de drenagem e a declividade média do rio principal. Dentre as

características físicas utilizadas no processo de regionalização, Euclides et al., (1994); Catalunha (2004) e; Pruski et al., (2006) salientam que a área de drenagem da bacia hidrográfica, por ser facilmente obtida e apresentar boa correlação, tem sido uma das variáveis mais utilizadas no estudo.

Dentre as características climáticas a precipitação é a mais utilizada (Souza, 2008), sendo comumente empregados o total precipitado, precipitação do semestre mais chuvoso, precipitação média, precipitação no semestre mais seco, precipitação no mês mais chuvoso e precipitação no mês mais seco. Os valores são obtidos para cada área de influência através da aplicação do método de Thiessen (Pruski et al., 2006).

6.1.2. Regiões hidrologicamente homogêneas

Devido à variabilidade climática e física, uma bacia hidrográfica pode apresentar diferentes comportamentos, acarretando em problemas para ajustar modelos, quando aplicado as regressões múltiplas. Uma saída encontrada para esse problema é a subdivisão da área de estudo em regiões que apresentem características físicas e climáticas semelhantes, o que resultaria em melhores ajustes. Na regionalização hidrológica a homogeneidade é entendida como a semelhança na resposta das funções regionais obtidas (Tucci, 2002).

6.2. Método da Curva Adimensional

Proposto por NERC (1975) em um extenso estudo de regionalização de vazões máximas e mínimas na Inglaterra, consiste na obtenção de curvas adimensionais de probabilidade de cada estação, por meio da vazão média de longa duração. A partir das curvas se obtém uma curva média adimensional que será utilizada para a regionalização das vazões com base em diferentes características físicas e climáticas da bacia hidrográfica em estudo, conforme o Método Tradicional (Tucci, 2013). Segundo Sousa (2009) a curva adimensional regional de probabilidade é expressa da seguinte forma:

$$F_i = \frac{Q_i}{Q_m} \quad (1.41)$$

em que F_i é o i -ésimo fator adimensional; Q_i i -ésimo valor de vazão de evento extremo anual e; Q_m a média dos valores da série de eventos extremos anuais.

6.3. Método da Conservação de Massas

O método da conservação de massa foi desenvolvido por Pereira (2004) e aperfeiçoado por Novaes (2005). Consiste no ajuste de regressões potencial e exponencial aos pares de valores de vazões e variáveis físicas da bacia hidrográfica em estudo. O método se diferencia do método tradicional pela obtenção de diferentes equações para cada afluente, forçando as curvas a passarem pela origem, o que garante a continuidade das vazões na bacia hidrográfica em estudo.

No estudo é ajustada uma equação de regressão potencial ou exponencial para o rio principal em função de uma variável fisiográfica. Posteriormente, são estimadas as vazões do rio principal antes e depois da confluência, sendo obtida a contribuição afluente pela subtração dos valores calculados. De posse da vazão afluente, juntamente com os dados de vazões das estações fluviométricas contidas no mesmo, procede-se o ajuste do modelo de regressão para a obtenção da equação de regionalização afluente. Caso não haja estações fluviométricas, a equação utilizada na estimativa de vazões deverá ser a linear, com a curva sendo forçada a passar pela origem.

7. CONCLUSÕES

1. Nas últimas décadas tem sido constatada uma evolução no desenvolvimento de métodos de regionalização hidrológica. A regionalização de vazões vem sendo aplicada para a extrapolação de dados fluviométricos, sendo ferramenta de grande importância para a obtenção de dados de vazão. Deve-se salientar, no entanto, a necessidade do desenvolvimento de ferramentas relacionadas a escolha da melhor metodologia a ser empregada na área de estudo. Além da carência de dados fluviométricos em qualidade e quantidade para o desenvolvimento de tais metodologias. São necessárias ainda pesquisas relacionadas a metodologias de consistência de dados.

8. LITERATURA CITADA

ANA - Agência Nacional Das Águas. Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos. 1. ed. Brasília: ANA, v. 1, 2014.

ANA - Agência Nacional Das Águas. A conjuntura dos recursos hídricos no Brasil. 1. ed. Brasília: ANA, v. 1, 2013.

Alcázar, J.; Palau, A. Establishing environmental flow regimes in a Mediterranean watershed based. *Journal of Hydrology*, p. 41-51, 2010.

- Barros, A. B. D.; Barros, A. M. A. D. A difícil aplicabilidade da política de águas no Brasil. *Inter Science Place*, n. 7, p. 1-22, 2009.
- Beskow, S.; Norton, L. D.; Mello, C. R. D. Hydrological prediction in a tropical watershed dominated by Oxisols using a distributed hydrological model. *Water Resources Management*, v. 27, p. 341-363, 2013.
- Bloschl, G.; Sivapalan, M. Scale issues in hydrological modelling: a review. *Hydrological Processes*, v. 9, n. 3-4, 1995.
- Brasil. Constituição Federal. Brasília: [s.n.], 1988.
- Brasil. Política Nacional dos Recursos Hídricos. Brasília: Coleção de Leis do Brasil, 1997.
- Catalunha, M. J. Sistema integrado em rede para gestão do uso múltiplo da água e regionalização da Q7,10 para os períodos mensal, bimestral, trimestral e anual. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2004.
- Chow, V. T. *Handbook of applied hydrology*. [S.l.]: [s.n.], 1964.
- Da Silva, D. P. *Hidrologia*. Itapetinga: Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, v. 1, 2012.
- Da Silva, M. G. L.; Nuñez, I. B. . Modelos científicos, didáticos e mentais. Natal: Universidade Federal de Rio Grande do Norte, 2007.
- ELETROBRÁS - CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S. A. Metodologia para regionalização de vazões. Rio de Janeiro. 1985.
- Euclides, H. P. Estudos de vazão máxima, mínima e média de longo período para as sub-bacias dos rios Verde Grande, Pardo e Jequitaiá. *Tecnologias para elaboração de projetos hidroagrícolas em bacias hidrográficas*, Viçosa, 1994. 03-61.
- Goswami, M.; O'connor, K. M.; Bhattarai, K. P. Development of regionalization procedures using a multi-model approach for flow simulation in an ungauged catchment. *Journal of Hydrology*, v. 333, n. 2-4, p. 517-531, 2007.
- Ibiapina, A. V. et al. Evolução da hidrometria no Brasil. In: _____ O estado das águas no Brasil. Brasília: Agência Nacional das Águas, 1999.
- Javeed, Y.; Apoorva, K. V. Flow Regionalization Under Limited Data Availability – Application of IHACRES in the Western Ghats. *Aquatic Procedia*, v. 4, p. 933, 2015.
- Kaviski, E. Métodos de regionalização de eventos e parâmetros hidrológicos. Dissertação (mestrado em recursos hídricos e ambientais). Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1992.

- Kite, G. W. Frequency and risk analyses in hydrology. 5. ed. Colorado: Water Resources Publications, 1988. 257 p.
- Kokkonen, T. S. et al. Predicting daily flows in ungauged catchments: model regionalization from catchment descriptors at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina. *Hydrological Processes*, v. 17, n. 11, p. 2219-2238, 2003.
- Lou, R. F. Modelagem Hidrológica Chuva-Vazão e Hidrodinâmica Aplicada na Bacia Experimental do Rio Piabanha/RJ. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro: Universidade Federal do RIO de Janeiro, 2010. 190 p.
- Magette, W. L.; Shanholtz, V. O.; Carr, J. C. Estimating selected parameters for the Kentucky Watershed Model from watershed characteristics. *Water Resources Research*, p. 472-476, 1976.
- Masih, I. Et Al. Regionalization of a conceptual rainfall–runoff model based on similarity of the flow duration curve: A case study from the semi-arid Karkheh basin, Iran. *Journal of Hydrology*, v. 391, n. 2, p. 188-201, 2010.
- Merz, R.; Blöschl, G. Regionalization of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, v. 287, p. 95-123, 2004.
- Mishra, A. K.; Coulibaly, P. Development in hydrometric networks design: A review. *Reviews of Geophysics*, p. 1-24, 2009.
- Moreira, I. A. Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais). Paraná: Universidade Federal do Paraná, 2005. 81 p.
- Naghetini, M.; Pinto, E. J. D. A. Hidrologia estatística. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 600 p.
- NERC. Flood Studies Report. London. 1975.
- Novaes, L. F. Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na bacia do Paracatu. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005.
- Pereira, S. B. Ecaporação no lago Sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2004.
- Porto, M. F. A.; Porto, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. *Estudos Avançados*, p. 43-60, 2008.
- Pruski, F. F.; Silva, D. D. D.; Koetz, M. Estudo da vazão em cursos d'água. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2006. 151 p.

- Razavi, T.; Coulibaly, P. Streamflow Prediction in Ungauged Basins: Review of Regionalization Methods. *Journal of Hydrology Engineering*, p. 958-975, 2013.
- Renno, C. D.; Soares, J. V. Conceitos básicos de modelagem hidrológica. [S.l.]: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003.
- Rodriguez, R. G. Proposta conceitual para a regionalização de vazões. Tese (doutorado em Engenharia Agrícola). Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2008.
- Santos, V. C. D.; Stevaux, J. C. Estimativa e regionalização hidrológica de vazões médias e produção de sólidos suspensos para a bacia hidrográfica do rio Ivaí – estado do Paraná. *Geographia Meridionalis*, v. 1, n. 2, 2015.
- Saraiva, I. S. Regionalização de parâmetros de modelos de simulação hidrológica para o emprego em bacias hidrográficas sem monitoramento fluviométrico. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- Silvapalan, M. et al. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, p. 857-880, 2003.
- Silveira, A. L. L. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. In: _____ Hidrologia ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003. p. 943.
- Singh, V. P. Computer models of watershed hydrology. *Watershed modeling*, Colorado, 1995.
- Souza, F. A. O. Procedimentos para aprimorar a regionalização de vazões: estudo de caso da bacia do Rio Grande. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2008. 187 p.
- Steyaert, L. T. A perspective on the state of environmental simulation modeling. In: _____ Environmental modeling with GIS. New York : Oxford University Press, 1993. p. 16-30.
- Sun, W.; Ishidaira, H.; Bastola, S. Calibration of hydrological models in ungauged basins based on satellite radar altimetry observations of river water level. *Hydrological Processes*, v. 26, p. 3524-3537, 2012.
- Tara, R.; Coulibly, P. Streamflow Prediction in Ungauged Basins: Review of Regionalization Methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 18, p. 958-975, 2013.
- Tomasoni, M. A.; Pinto, J. E. D. S.; Silva, H. P. D. A questão dos recursos hídricos e as perspectivas para o Brasil. *Geotextos*, v. 5, n. 2, p. 107-127, 2009.

- Tucci, C. E. M. Hidrologia ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora Universidade/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.
- Tucci, C. M. E. Regionalização de Vazões. Porto Alegre: Editora Universidade/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2002. 256 p.
- Tucci, C. M. E. Modelos Hidrológicos. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005.
- Vendruscolo, J. Regionalização dos parâmetros de um Modelo chuva-vazão para estimativa de Vazões em bacias sem monitoramento Sistemático. Dissertação (Mestrado em. Santa Maria: Universidade de Santa Maria, 2005.
- Wagener, T.; Wheater, H.; Gupta, H. V. Rainfall-runoff modelling in gauged and ungauged catchments. World Scientific, 2004.
- Yadav, M.; Wagener, T.; Gupta, H. V. Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. Water Resources Research, v. 44, p. 1756-1774, 2007.
- Young, A. R. Streamflow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. Journal Hydrologic, v. 320, n. 1-20, p. 155-172, 2006

CAPÍTULO 2 – Regionalização de vazões da parte baiana da bacia hidrográfica do rio Pardo

Resumo: O rio Pardo está localizado nos estados de Minas Gerais e Bahia no Brasil, sendo importante manancial para o desenvolvimento da região. O presente estudo utilizou a técnica de regionalização de vazões baseada em regressões múltiplas para estimativa de vazões máximas com diferentes períodos de retorno, vazão média de longa duração e vazões mínimas com 90% (Q_{90}) e 95% (Q_{95}) de permanência para a região baiana da bacia hidrográfica do rio Pardo. Constatou-se que a região em estudo pertence a uma única região homogênea, tendo a área de drenagem e comprimento total da rede de drenagem como as variáveis de melhor correlação. Dentre os modelos de regressão testados para o rio principal, o tipo potencial foi o que apresentou melhores resultados para as vazões máximas estudadas, média de longa duração e mínima com 90% de permanência (Q_{90}). Para vazão mínima com 95% de permanência (Q_{95}), o modelo exponencial foi o que apresentou melhores resultados. Nos afluentes, a inexistência de estações fluviométricas limitou a aplicação do método da conservação de massas apenas a modelos de regressão do tipo linear, todavia, o método se mostrou eficiente na estimativa de vazões afluentes, permitindo a continuidade nos valores de vazão.

Palavras-chave: modelos hidrológicos, recursos hídricos, vazões máximas, vazões de referência

CHAPTER 2 – Streamflow regionalization for Pardo watershed region located Bahia state, Brasil

Abstract: The Pardo River is located in the states of Minas Gerais and Bahia in Brazil, being an important source the region development. The flows regionalization based on multiple regressions technique was used for the estimation of maximum flows with different return periods, long-term average flow and minimum flows with 90% (Q_{90}) and 95% (Q_{95}) in the curve of permanence for the Bahia region in Pardo watershed. It was found that the region under study can be considered hydrologically homogeneous, with the drainage area and total drainage network as the variables with the best correlation. Among the regression models tested for the main river, the potential type model was the one that presented the best results for the maximum flows studied, long-term average and

minimum flow with 90% of permanence (Q90). For the minimum flow with 95% permanence (Q95), the exponential type model presented the best results. In the tributaries, the absence of fluviometric stations limited the application of the mass conservation method only to linear regression models, however, the method was efficient in estimating the flow, allowing the continuity of the flow values.

Key words: hydrological models, water resources, maximum flows, reference flows

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por recursos naturais tem acarretado maior pressão sobre o ambiente. No Brasil, algumas bacias hidrográficas já apresentam dificuldades no atendimento a suas demandas hídricas, gerando conflitos entre seus usuários. A região hidrográfica do Atlântico Leste, por exemplo, os rios Vaza-Barris, Itapicuru e Paraguaçu, além dos rios Pardo e Jequitinhonha apresentam situação crítica ou muito crítica (ANA, 2013).

Na bacia hidrográfica do rio Pardo estão inseridos 37 municípios dos estados de Minas Gerais e Bahia, cujo desenvolvimento é dependente, dentre outros fatores, da água do rio Pardo e seus afluentes. A região da bacia situada no estado de Minas Gerais tem perfil predominantemente agrícola, ao passo que as principais atividades desenvolvidas na região baiana incluem pecuária de corte e leite, cultura do cacau (praticada na região litorânea da bacia) e também indústrias dos mais variados segmentos (IBGE, 2006).

Devido à alta demanda de água, atrelado ao uso sem critério de quantidade e qualidade, pode ocorrer constantes conflitos entre usuários (Amorim et al., 2005). A fim de obter gestão eficiente dos recursos hídricos, quantificar a disponibilidade hídrica é crucial para atendimento da legislação vigente e planejamento de uso do recurso (Beskow et al., 2013; Tucci, 2013; Javeed & Apoorva, 2015). Entretanto, devido aos altos custos de implantação e grandes extensões territoriais torna-se impraticável o monitoramento de toda a rede hidrográfica, sendo necessária otimização dos dados disponíveis (Sivapalan et al., 2003; Mishra & Coulibaly, 2009).

A regionalização de vazões tem por objetivo a otimização dos dados disponíveis possibilitando a estimativa de vazões em locais sem dados. No Brasil, dentre as metodologias mais utilizadas, está a proposta por NERC (1975) e adaptado pela ELETROBRÁS (1985). O método consiste na aplicação de regressões múltiplas entre valores de vazão e características físicas e/ou meteorológicas da bacia hidrográfica, sendo

conhecido por apresentar bons resultados e fácil aplicação (Gasparini, 2014). Outro método aplicado em estudo de vazões afluentes é o da conservação de massas. O método, proposto por Novaes (2005), pressupõe que a vazão é nula quando a área de drenagem for igual a zero, garantindo a continuidade dos valores de vazão.

Desta forma, objetivou-se neste estudo ajustar modelos de regressão para estimar vazões máximas com diferentes períodos de retorno, vazões médias de longa duração e vazões mínimas com 90% (Q90) e 95% (Q95) de permanência e, assim, contribuir para a promoção de melhor gestão de recursos hídricos na região.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O presente estudo foi realizado na parte baiana da bacia hidrográfica do rio Pardo, localizada ao Sul do estado (Figura 1). A bacia hidrográfica do rio Pardo tem como circunvizinhas ao sul a bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, ao norte as bacias hidrográficas do rio de Contas e rio Cachoeira, a oeste a bacia hidrográfica do rio São Francisco e ao leste o oceano Atlântico. Contida entre os paralelos $-14,62^{\circ}$ e $-16,1^{\circ}$ e meridianos $-42,81^{\circ}$ e $-39,2^{\circ}$, a bacia hidrográfica possui cerca de 32.818 km² de área de drenagem, abrangendo parcial ou integralmente o território de 37 municípios. A população residente na bacia é de cerca de 905.621 mil pessoas (IBGE, 2010).

O rio Pardo nasce na Serra Negra no município Rio Pardo de Minas no estado de Minas Gerais, a cerca de 750 metros de altitude, percorrendo 756 km até a sua foz localizada no município de Canavieiras no Estado da Bahia. Os principais afluentes são os ribeirões Salitre, e Vereda e os rios São João do Paraíso e Catolé Grande, pela margem esquerda, e rios Mosquito, Majerona e Maiquinique pela margem direita (Moreau et al., 2003).

2.2. Obtenção dos dados

Para informações morfométricas da bacia foram utilizados imagens Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) com resolução de 30 metros (USGS, 2016). As imagens foram processadas utilizando as ferramentas disponíveis no software ArcGIS 10.0, para obtenção das características fisiográficas da bacia hidrográfica do rio Pardo (ESRI, 2011).

As estações fluviométricas presentes no rio Pardo foram identificadas, para a obtenção das séries históricas de dados de vazões junto ao portal HidroWeb pertencente a rede hidrometeorológica da Agência Nacional das Águas - ANA (ANA, 2016).

Das estações identificadas, apenas aquelas apresentadas na Figura 1 foram consideradas neste estudo, uma vez que nestas se encontravam disponíveis dados para o período estudado, que foi de 1984 a 2015. As demais estações apresentavam problemas de indisponibilidade total ou parcial de dados para o período pretendido. O fato de se encontrarem disponíveis dados apenas de estações localizadas na parte baiana da bacia, inviabilizou a realização de estudos também na parte mineira, sendo, portanto, esta parte da bacia desconsiderada neste trabalho. Todavia, estudos de regionalização de vazões para a parte mineira da bacia do rio Pardo podem ser consultados no trabalho realizado por Euclides et al. (2011).

Os dados das estações utilizadas (identificados na Figura 1) foram submetidos a procedimentos de análise de consistência, visando a correção de erros grosseiros de digitação e anotação de cotas, preenchimento de falhas, dentre outros. A análise de consistência foi realizada com auxílio do software Hidro 1.2 (ANA, 2016) e ainda por meio de consulta aos boletins diários presentes no Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos (ANA, 2016).

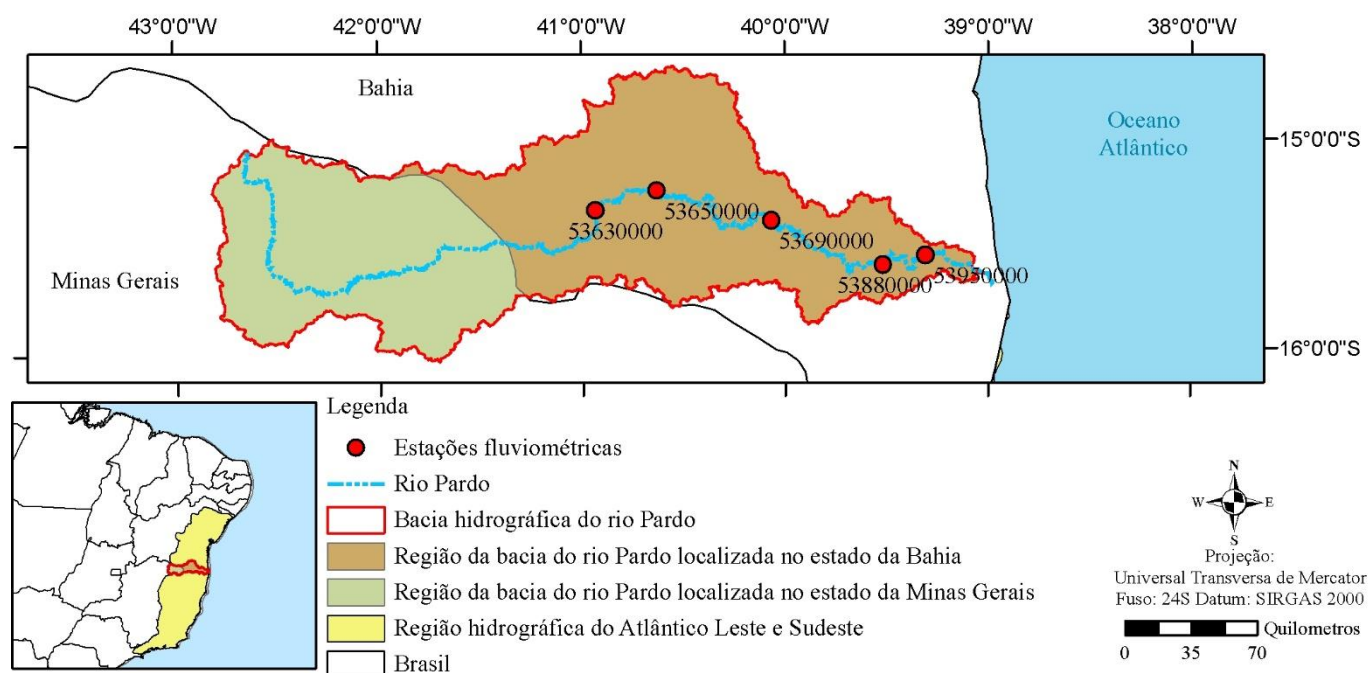


Figura 1. Localização da área de estudo e estações fluviométricas utilizadas

2.3. Procedimentos de Regionalização

2.3.1. Cálculo de vazões máximas, médias e mínimas

No estudo optou-se por regionalizar as vazões máximas para os períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 500 anos por serem as de maior utilização em dimensionamentos de obras hidráulicas: galerias pluviais (10 à 20 anos); piscinas de drenagem urbana (50 a 100 anos); vertedouros de barragens e pontes (100 à 500 anos). Porém, tais valores variam a depender da natureza da obra a ser projetada (Tucci, 2013).

A magnitude dos eventos de vazão máxima correspondente a cada estação fluviométrica estudada, para diferentes períodos de retorno, foi calculada a partir da equação:

$$M = \mu + K_t D \quad (2.1)$$

em que M é a magnitude do evento de vazão para o período de retorno estabelecido ($m^3 s^{-1}$); μ representa a média das vazões máximas anuais ($m^3 s^{-1}$); K_t o fator de frequência (adimensional); relacionado a um modelo de distribuição de probabilidade, e D o desvio padrão dos eventos ($m^3 s^{-1}$).

No estudo foram testados os modelos de distribuição de probabilidade Gumbel, Pearson tipo 3, Log-Pearson tipo 3, Log-Normal tipo 2 e Log-Normal tipo 3 para vazões máximas. Os modelos foram aplicados a um nível de confiança de 95% com o auxílio do software SisCAH 1.0 (Sousa et al, 2009), sendo a escolha do melhor método de distribuição de probabilidade feita a partir do menor valor na amplitude do intervalo de confiança, obtida por meio da equação:

$$M - 1,96\delta < \varphi < M + 1,96 \quad (2.2)$$

em que δ representa o erro padrão ($m^3 s^{-1}$) pertinente a cada função de probabilidade e φ o intervalo de confiança ao nível de confiança de 95% ($m^3 s^{-1}$) (Sousa et al., 2009).

Além das vazões máximas, também foram regionalizadas as vazões mínimas e vazão média de longa duração. Para vazões mínimas, foram selecionadas as vazões com 90% e 95% de permanência na série histórica. Tais vazões de referência foram consideradas neste estudo por serem utilizadas para concessão de outorgas de direito ao uso dos

recursos hídrico no estado da Bahia e rios federais, respectivamente. As vazões médias de longa duração permitem a avaliação do potencial hídrico afluyente, sendo esta também estimada.

2.3.2. Obtenção das variáveis de regionalização testadas

As variáveis independentes foram utilizadas para explicar o comportamento da vazão ao longo da hidrografia. Dentre as variáveis independentes, as mais utilizadas em estudos de regionalização são variáveis físicas, descritivas e hidrológicas, bastando para isso, apresentar boa correlação com dos dados de vazão.

No estudo foram obtidas características fisiográficas a montante de cada estação fluviométrica da bacia hidrográfica do rio Pardo, sendo elas: área de drenagem (A); perímetro (P); fator de forma (Kf); coeficiente de compacidade (Kc); comprimento total da rede de drenagem (Lt); comprimento do rio principal (Lp); comprimento do percurso de escoamento do ponto mais remoto até a foz (Lm). Estas características obtidas foram submetidas a teste de correlação com as vazões sendo selecionadas as que apresentaram melhores resultados.

2.4. Regiões hidrológicamente homogêneas

A regionalização de vazões para o rio Pardo foi elaborada com base no método de regressões múltiplas, comumente denominado método tradicional. O método é recomendado pela ELETROBRÁS (1985) para estimativas hidrológicas em locais sem dados. Para estimativa de vazões afluentes foi utilizado o método da Conservação de Massas, sendo este aplicado aos afluentes de níveis 5 e 6 da ottocodificação que drenam suas águas diretamente para a calha do rio Pardo.

2.4.1. Identificação variáveis independentes de melhor ajuste

Por meio da plataforma do Sistema Computacional para Regionalização de Vazões (SisCoRv) versão 1.0 (Sousa et al., 2013), realizou-se testes preliminares a fim de identificar dentre as variáveis obtidas as que apresentassem melhores valores de coeficiente de determinação ajustado (R^2a) (Eq. 2.3), erro padrão fatorial (σF) (Eq. 2.4) e erro percentual (ER%) (Eq. 2.5).

$$R^2a = 1 - \frac{(n - 1)}{[n - (k + 1)]} (1 - R^2) \quad (2.3)$$

$$\sigma F = e^D \quad (2.4)$$

$$ER\% = \left(\frac{Q_0 - Q_e}{Q_0} \right) \times 100 \quad (2.5)$$

em que n corresponde ao tamanho da amostra; k é o número de variáveis independentes e; D corresponde ao desvio padrão da amostra; Q_0 é a vazão observada ($m^3 s^{-1}$) e Q_e é a vazão estimada pelo modelo ($m^3 s^{-1}$).

2.4.2. Identificação de regiões hidrológicamente homogêneas

A identificação de regiões hidrológicamente homogêneas, ou seja, regiões que possuam o mesmo comportamento hidrológico dentro da área de estudo, podem ser realizadas por análises físicas, climáticas ou estatísticas. No estudo, levou-se em conta a análise estatística, com a aplicação do método da conveniência geográfica (Naghetini & Pinto, 2007). No método são ajustadas equações de regressão entre valores de vazão e características morfométricas da bacia, sendo utilizados os valores dos coeficientes de determinação ajustado (R^2a); erro padrão fatorial (σF) e erro percentual médio (ER%) para identificação das regiões com comportamento semelhante.

A região foi considerada hidrológicamente homogênea uma vez que esta apresentou valor de R^2a superior a 0,90, valor de σF menor que 1,5 e ER% menor que 30% (Tucci, 2002).

2.5. Obtenção de parâmetros das equações para o rio Pardo

De posse das variáveis independentes e definida as regiões homogêneas, procedeu-se o ajustamento de equações de regressão. A função matemática utilizada para relacionar as variáveis é dada pela equação:

$$Q = f(C_1, C_2, C_3, \dots, C_n) \quad (2.6)$$

em que Q é a vazão a ser regionalizada ($m^3 s^{-1}$) em função das variáveis independentes ($C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$).

Foram testados os modelos de regressão: linear, potencial, exponencial, logarítmico e recíproco, sendo selecionado o que apresentasse os melhores valores de R^2 e σF . Além disso, levou-se em consideração o erro apresentado pelo modelo na estimativa, comparando valores de vazão estimados e observados. Para isso foi utilizado o erro percentual (ER%), sendo o máximo aceitável 30%, conforme recomendado pela Eletrobrás (1985).

A regionalização das vazões do estudo foi realizada com o auxílio do software Sistema Computacional para Regionalização de Vazões (SisCoRV) versão 1.0 (Sousa et al., 2013).

2.6. Estimativa de vazões

Foram estimadas as vazões para a parte baiana do rio Pardo, para isso calculou-se as variáveis dos modelos a cada 10 km ao longo do rio com as ferramentas disponíveis no software ArcGIS 10.0 (ESRI, 2011). Posteriormente, foram estimadas as vazões e incorporadas ao seu respectivo trecho, sendo criados mapas com a variação de cada vazão ao longo do rio.

2.7. Obtenção dos parâmetros das equações para afluentes

Para ajuste de equações afluentes, foi considerado o método da conservação de massas, proposto por Pereira (2004) e adaptado por Novaes (2005). O método, aplicado à vazões médias e mínimas, utiliza a contribuição afluente e dados de estações fluviométricas pertencentes ao tributário para traçar modelos de regressão potencial ou exponencial em função da área de drenagem. O método pressupõe que a vazão seja nula quando a área de drenagem for igual a zero, forçando o modelo a passar pela origem.

A determinação da contribuição afluente é feita pela diferença entre a vazão no ponto situado imediatamente a jusante da confluência com a foz afluente e a vazão do ponto situado imediatamente a sua montante. Como não existam estações fluviométricas nos afluentes, consideradas neste estudo, foi utilizada regressão linear (Eq. 2.7) para estimar a vazão.

$$Q = A \cdot b \tag{2.7}$$

em que A é a área de drenagem no ponto desejado (km^2) e b é o coeficiente angular da reta.

Para definição dos afluentes que iriam compor o estudo, levou-se em consideração a Ottocodificação. Foi adotado como critério de escolha rios de quinta e sexta ordem que drenem suas águas para o rio Pardo, uma vez que este é de quarta ordem, sendo selecionados 14 mananciais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Características físicas

Nos testes de correlação com vazões, as variáveis área de drenagem (A) e comprimento total da rede de drenagem (L_t) apresentaram melhores resultados sendo, efetivamente, submetidas aos ajustes dos modelos de regionalização. Para cada estação foram calculados os valores de área e comprimento total da rede de drenagem.

Os valores de área de drenagem (km^2) calculados para as estações fluviométricas de montante para jusante (Figura 1) foram, respectivamente: 16297,65; 18537,47; 26081,22; 29419,45 e; 30644,27. O comprimento total da rede de drenagem (km) calculado para cada estação fluviométrica de montante para jusante foi, respectivamente: 10.212,06; 11.759,41; 17.231,80; 19.817,78 e; 20.728,55.

Ao observar o posicionamento das estações fluviométricas (Figura 1), nota-se boa distribuição dessas ao longo do rio Pardo. Tal característica também pode ser constatada ao analisar os dados de área e comprimento total da rede de drenagem a montante de cada estação.

A identificação da área é imprescindível em estudos de bacias hidrográficas pois permite avaliar o seu potencial hídrico, além de apresentar alta correlação com valores de vazão sendo uma das variáveis mais utilizadas em estudos de regionalização hidrológica (Tucci, 2013). Castro & Ruhoff (2009) ao gerarem modelos de regionalização de vazões para a região do Médio Uruguai, obtiveram bons resultados, recomendando a variável área em estudos de regionalização. Silva Junior et al. (2013) ao regionalizarem vazões para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim, alcançaram boa correlação com as variáveis área, perímetro e comprimento total dos cursos de água para vazão de 90% de permanência na curva.

3.2. Vazões mínimas, médias e máximas das estações consideradas

Os modelos de distribuições de probabilidade Log-Normal 3 Parâmetros e Gumbel apresentaram menor amplitude no intervalo de confiança há 95% de probabilidade, sendo estes utilizados para estimativa das vazões para as estações em estudo (Tabela 1). A distribuição de probabilidade Gumbel foi preponderante para a estimativa de vazões das estações 53630000 e 53650000. Além disso, a distribuição foi preponderante na estimativa de vazões para o período de retorno de 500 anos. Estes resultados corroboram com os resultados de Lopes et al. (2016) que ao regionalizarem vazões mínimas e máximas para a bacia hidrográfica do rio Ivaí – PR, identificaram por meio de teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov que os modelos Log-Normal 3 parâmetros e o de Gumbel foram os que apresentaram melhor ajuste, o que indica condições hidrológicas semelhantes entre as bacias.

Tabela 1. Vazões mínimas com permanência de 90% (Q_{90}) e 95% (Q_{95}) na série histórica, vazões médias anuais de longa duração (Q_{mld}) e vazões máximas anuais com períodos de retorno de 10 (Q_{max10}), 20 (Q_{max20}), 50 (Q_{max50}), 100 (Q_{max100}) e 500 anos (Q_{max500}) obtidos para as estações consideradas neste estudo

Estações	Vazões ($m^3 s^{-1}$)							
	Q_{max10}	Q_{max20}	Q_{max50}	Q_{max100}	Q_{max500}	Q_{90}	Q_{95}	Q_{mld}
53630000	360,95*	464,81*	599,25*	699,99*	932,79*	1,10	0,47	9,61
53650000	540,64*	690,19*	883,78*	1028,84*	1364,06*	1,64	0,76	13,41
53690000	739,08**	993,70*	1235,47*	1416,64*	1835,30*	9,34	7,04	36,42
53880000	1088,93**	1288,61**	1539,65**	1724,13**	2528,88*	11,08	8,26	47,08
53950000	1170,38**	1354,40**	1578,19**	1737,92**	2628,42*	11,56	7,42	59,44

*Estimada a partir da distribuição Gumbel; ** Estimada a partir da distribuição Log-Normal 3 Parâmetros

3.3. Ajuste das equações para o rio Pardo

Modelos com menor número de variáveis possibilitam a obtenção de vazões de forma mais rápida, uma vez que evitaria a necessidade de obtenção de variáveis que podem não se encontrar disponíveis ou não serem de fácil obtenção sem um conhecimento mais aprofundado em outras áreas tais como geoprocessamento. Tal fato permite maior acessibilidade à prática da regionalização de vazões. De todos os modelos testados neste trabalho para vazões máximas, o que apresentou melhores resultados foi o tipo potencial, sendo a variável área suficiente para obtenção de bons resultados (Tabela 2).

A vazão mínima com 90% de permanência se ajustou melhor ao modelo potencial, sendo necessária apenas a área para descrever o comportamento do afluente (Tabela 2). O modelo exponencial, no entanto, foi o que melhor descreveu o comportamento da vazão mínima com 95% de permanência, sendo necessária a adição da variável comprimento total da rede de drenagem (Lt) ao modelo para obtenção de coeficientes satisfatórios.

A vazão média de longa duração seguiu a mesma tendência demonstrada pelas vazões máximas, visto que o modelo de melhor ajuste foi o potencial, sendo necessária apenas a variável área para descrever o comportamento das vazões.

Tabela 2. Equações de regressão ajustadas

$$Q_{90} = 1,692785 \cdot 10^{-17} \cdot A^{(3,990149)}$$

$$Q_{95} = 1,208467 \cdot 10^{-5} \cdot e^{((A \cdot 0,003104) + (Lt \cdot -0,004046))}$$

$$Q_{mld} = 1,200163 \cdot 10^{-11} \cdot A^{(2,824625)}$$

$$Q_{máx10} = 2,836510 \cdot 10^{-5} \cdot A^{1,693269}$$

$$Q_{máx20} = 1,278141 \cdot 10^{-4} \cdot A^{1,565681}$$

$$Q_{máx50} = 6,740315 \cdot 10^{-4} \cdot A^{1,421320}$$

$$Q_{máx100} = 1,757802 \cdot 10^{-3} \cdot A^{1,339059}$$

$$Q_{máx500} = 4,533636 \cdot 10^{-4} \cdot A^{1,506017}$$

e = 2,718282; A = área; Lt = comprimento total da rede de drenagem

Na Figura 2 estão apresentados os valores de vazões observadas versus estimadas pelos modelos selecionados para as 5 estações fluviométricas utilizadas no estudo acompanhado dos valores de coeficientes de correlação ajustado (R^2a), erro padrão fatorial (σF) e erro percentual (ER%) correspondentes aos modelos selecionados (Tabela 2). São apresentadas ainda retas de igualdade entre os valores estimados e observados para cada vazão (reta identidade). Valores próximos a reta identidade denotam boa estimativa dos modelos testados, ao passo que valores distantes da reta implicam em estimativas ruins dos valores de vazão. Nota-se, valores próximos a reta identidade inferindo em boa estimativa das vazões pelos modelos testados.

Os valores de R^2a , σF e ER% variaram de 0,94 a 0,99 e 0,05 a 0,27, respectivamente, enquanto que a média dos valores de ER% variaram entre 5,31 a 16,96, (Figura 2). Os resultados indicam bom ajuste dos modelos e baixo erro na estimativa das vazões e, portanto, pelo método da conveniência geográfica, a região pode ser considerada como hidrologicamente homogênea.

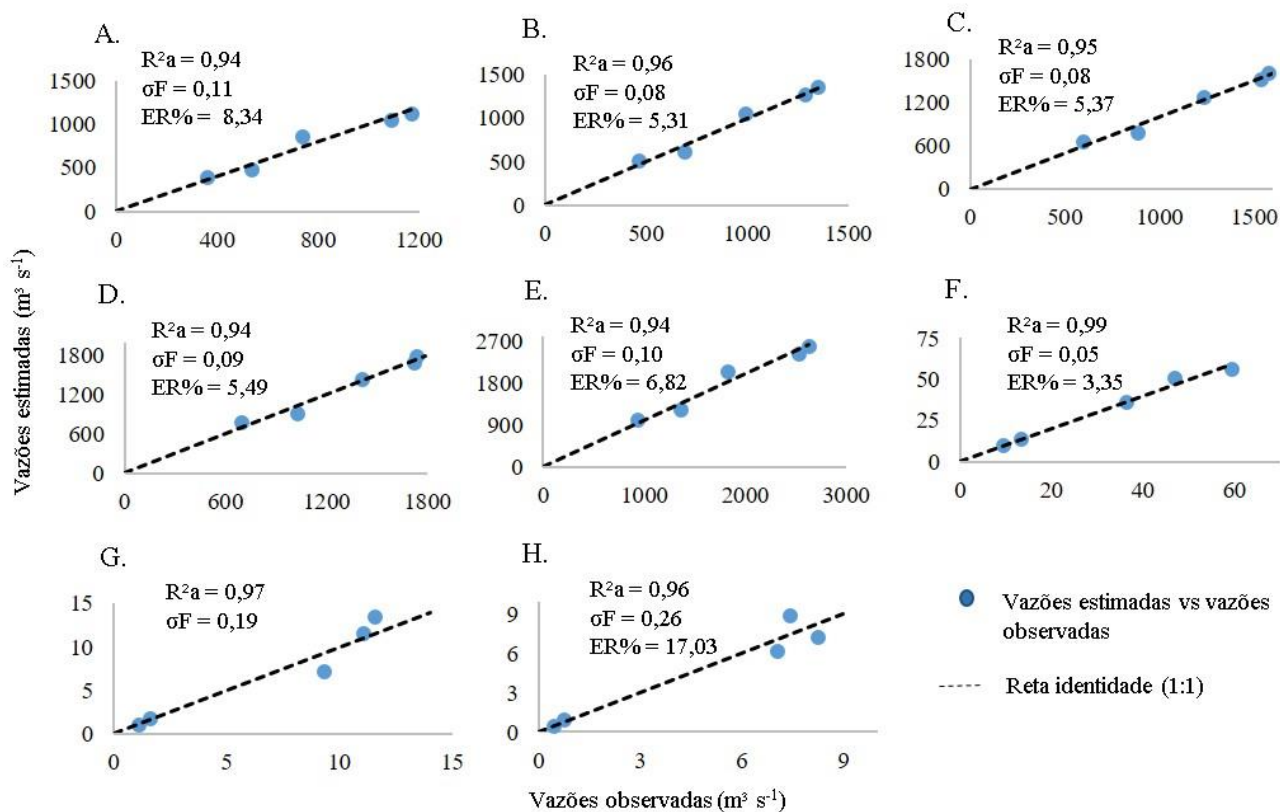


Figura 2. Vazões máximas com períodos de retorno de 10 anos (A), 20 anos (B), 50 anos (C), 100 anos (D) e 500 anos (E), média de longa duração (F), mínima com permanência de 90% (G) e 95% (H) observadas versus vazões estimadas, coeficiente de determinação ajustado (R^2a), erro padrão fatorial (σF) e erro percentual médio (ER%), obtidas das equações de regressão múltipla pelo Método Tradicional para a bacia hidrográfica do rio Pardo - BA, acompanhada da suas retas de identidade

3.4. Estimativa de vazões

Na Figura 3 estão apresentadas vazões máximas, médias e mínimas estimadas a cada 10 km para o rio Pardo. Os valores de vazões máximas variaram de $257,79 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$ a $2669,89 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$ para os diferentes períodos de retorno analisados. As vazões médias de longa duração estimadas foram entre $4,86 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$ a $59,82 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$ para toda a extensão do rio principal. As estimativas de vazões mínimas com Q_{90} e Q_{95} , variaram de $0,42 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$ a $14,64 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$ e $0,02 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$ a $8,95 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$, respectivamente.

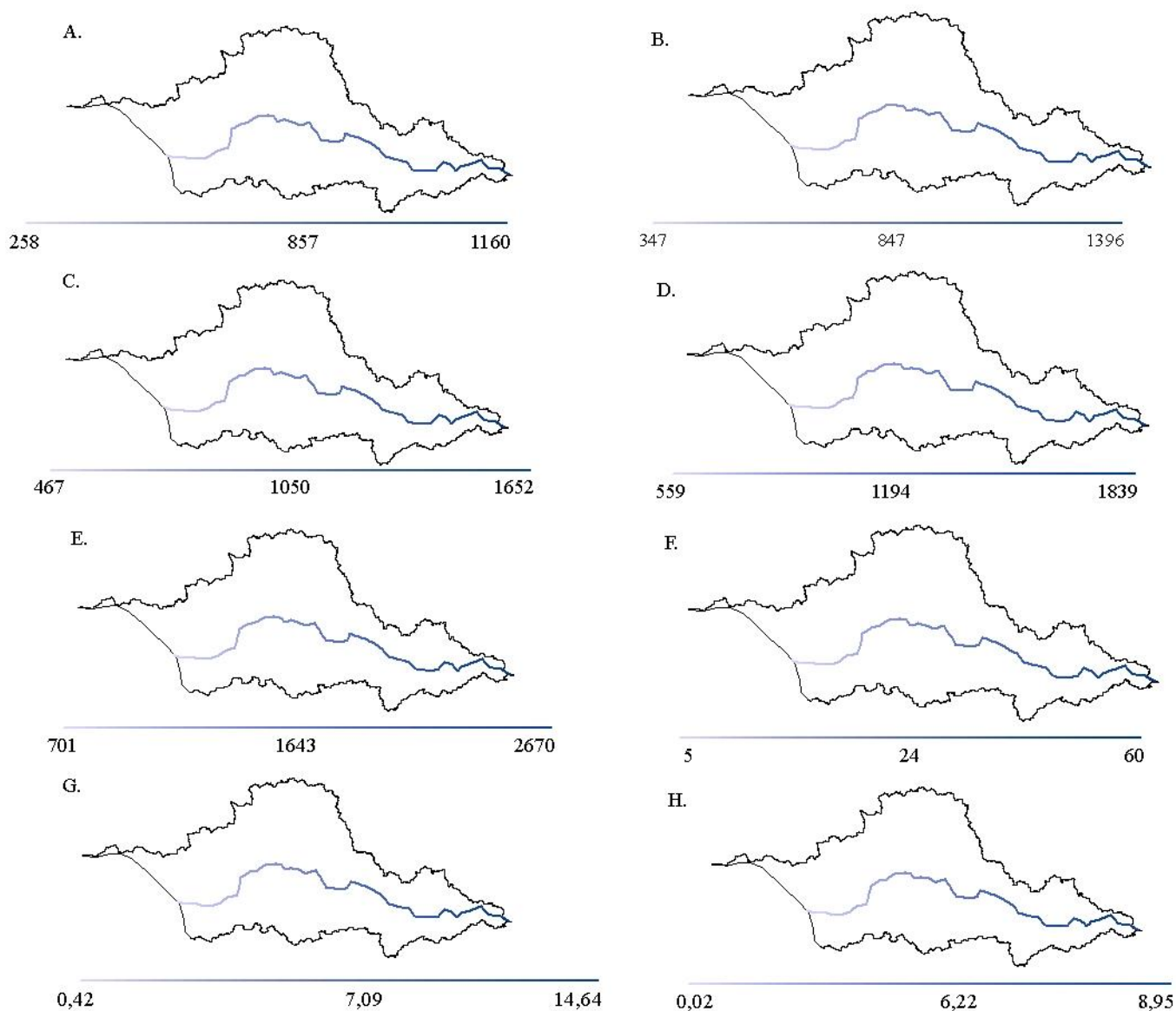


Figura 3. Vazões máximas ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) com período de retorno de 10 anos ($Q_{\text{max}10}$) (A), 20 anos ($Q_{\text{max}20}$) (B), 50 anos ($Q_{\text{max}50}$) (C), 100 anos ($Q_{\text{max}100}$) (D) e 500 anos ($Q_{\text{max}500}$) (E), vazão média de longa duração ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) (Q_{mld}) (F) e vazões mínimas ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) com recorrência de 90% (Q_{90}) (G) e 95 % (Q_{95}) (H) na curva de permanência, estimadas a cada 10km para o rio Pardo - BA

3.5. Ajustes das equações para os afluentes

Para os afluentes foi possível o ajuste apenas do modelo de regressão linear, visto que os mesmos não dispunham de estações fluviométricas para o período considerado neste trabalho. Os modelos foram ajustados com intercepto passando pela origem, de acordo com o proposto por Novaes (2005). Os coeficientes angulares das equações ajustados para cada afluente estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Coeficientes angular da reta (b) para Q_{90} e Q_{mld} ajustados a partir do método da conservação de massas para estimativa das vazões em afluentes de níveis 5 e 6 (Ottocodificação) que drenam diretamente para calha do rio Pardo

Rios	Q_{90} ($m^3 s^{-1}$) (.10 ⁻³)	Q_{mld} ($m^3 s^{-1}$) (.10 ⁻³)	Rios	Q_{90} ($m^3 s^{-1}$) (.10 ⁻³)	Q_{mld} ($m^3 s^{-1}$) (.10 ⁻³)	Rios	Q_{90} ($m^3 s^{-1}$) (.10 ⁻³)	Q_{mld} ($m^3 s^{-1}$) (.10 ⁻³)
Prata	1,6	4,9	Manjerona	0,6	2,8	Galante	0,2	1,3
Angelim	1,5	4,6	Verruga	0,5	2,4	Anta	0,2	1,4
Nado	1,4	4,5	Largo	0,4	2,2	Mamoeiro	0,1	1,2
Catolé	1,2	4,2	Vereda	0,3	1,8	757858*	0,1	1,2
Maiquinique	0,9	3,4	Salitre	0,2	1,4			

* Rio sem nomenclatura na base de dados da Agência Nacional das Águas

O método da conservação de massas permite que a estimativa de vazões seja realizada com maior consistência, visto que essa metodologia é capaz de garantir a continuidade dos valores de vazão entre afluentes e rio principal. Assim como evidenciado em outros estudos de regionalização, o método da conservação de massas se mostrou eficiente para a estimativa de vazões mínimas e média para a bacia hidrográfica do rio Pardo.

Estudo utilizando o método da conservação de massas também foi realizado por Molina et al. (2014), que ao testarem diferentes métodos de regionalização de vazões para a bacia hidrográfica do rio Amambai no Mato Grosso do Sul, constaram que o método da conservação de massas foi o que apresentou menores erros relativos e maiores coeficientes de Nash e Sutcliffe, dentre as metodologias testadas, sendo a mais indicada para obtenção de informações de vazões mínimas na bacia hidrográfica. Moreira et al. (2010) ao compararem diferentes métodos de regionalização de vazões, constataram que o método da conservação de massas foi o único que garantiu a continuidade das vazões para a bacia do rio Paracatu.

4. CONCLUSÕES

1. O método tradicional é eficaz para estimar vazões da parte baiana do rio Pardo, além de constatar que a área de estudo pertencente a uma única região hidrologicamente homogênea o que possibilita a utilização das equações para toda a extensão analisada.

2. Para a estimativa de vazões os modelos de distribuição de probabilidade Gumbel e Log-Normal 3 Parâmetros apresentaram melhores resultados.

3. A utilização exclusiva da área de drenagem como variável dos modelos de regionalização proporcionou bons resultados para a maioria das vazões consideradas neste estudo, com exceção da vazão de referência Q_{95} (vazão com 95% de permanência da série histórica), que além da área de drenagem, também foi utilizado o comprimento total da rede dos cursos d'água.

4. Na estimativa de vazões a cada 10km as vazões máximas para diferentes períodos de retorno variaram de 257,79 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) a 2669,89 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$). A vazão média de longa duração variou de 4,86 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) a 59,82 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$). As vazões mínimas com ocorrência de 90 % e 95% da curva de permanência variaram 0,42 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) a 14,64 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) e 0,05 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) a 9,02 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), respectivamente.

5. O método da conservação de massas permitiu a continuidade nos valores de vazão, se mostrando eficiente na estimativa de vazões afluentes. A não existência de estações fluviométricas limitou a aplicação do método apenas a modelos de regressão linear.

6. LITERATURA CITADA

Amorim, E. L. C.; Netto, A. P. O.; Mendiondo, E. M. Estudo de métodos para a regionalização de vazão. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, 2005.

ANA - Agência Nacional Das Águas. Hidro 1.2 - Sistema de Gerenciamento de Dados Hidrometeorológicos. ANA. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/HidroWeb>>. Acesso em: 17 jun 2016.

ANA - Agência Nacional Das Águas. HidroWeb. ANA. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/hidroweb>>. Acesso em: 17 jun 2016.

ANA - Agência Nacional Das Águas. www.ana.gov.br. ANA. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/HidroWeb>>. Acesso em: 17 jun 2016.

Beskow, S.; Norton, L. D.; Mello, C. R. D. Hydrological prediction in a tropical watershed dominated by Oxisols using a distributed hydrological model. *Water Resources Management*, v. 27, p. 341-363, 2013.

Castro, A.; Ruhoff, A. L. Estudo de regionalização de vazões médias na região do médio Uruguai. EMBRAPA, Campinas, p. 2-8, Dezembro 2009.

Eagleson, P. S. Dynamics of flood frequency. *Water Resource Research*, n. 8, p. 878-898, 1972.

ELETOBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S. A. Metodologia para regionalização de vazões. Rio de Janeiro. 1985.

- ESRI - Environmental Systems Research Institute. ArcGIS Desktop. [S.l.]: [s.n.], v. 10.0, 2011.
- Euclides, H. P.; Ferreira, P. A.; Faria Filho, R. F.; Oliveira, E. P. Atualização dos estudos hidrológicos na bacia hidrográfica do rio Pardo em Minas Gerais. Atlas Digital do Estado de Minas Gerais, Viçosa, 2011.
- IBGE - Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. Censo Demográfico 2010. [S.l.]. 2010.
- Javeed, Y.; Apoorva, K. V. Flow Regionalization Under Limited Data Availability – Application of IHACRES in the Western Ghats. Aquatic Procedia, v. 4, p. 933, 2015.
- Lopes, T. R. Prado, G.; Zolin, C. A.; Paulino, J.; Antoniel, L. S.; Regionalização de vazões máximas e mínimas para a bacia do rio Ivaí - PR. Irriga, v. 21, p. 188-201, 2016.
- Mishra, A. K.; Coulibaly, P. Development in hydrometric networks design: A review. Reviews of Geophysics, p. 1-24, 2009.
- Molina, S. K. M.; Almeida, I. K.; Steffen, J. L.; Alves Sobrinho, T. Caracterização da disponibilidade hídrica e comparação de metodologias de regionalização de vazões. Revista de Geociências. v. 33, n. 3, p. 506-515. São Paulo-SP.2014.
- Moreau, M. S.; Moreau, A. M. S. S.; Amorim, R. R. Meio físico e interações socioeconômicas da Bacia do Rio Pardo – BA. Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2003.
- Moreira, M. C.; Pruski, F. F.; Silva, D. D.; Silva, J. M. A. Comparação dos valores de Q_{7,10} estimados por diferentes métodos de regionalização de vazões. Engenharia na Agricultura. v. 18, n. 6., p. 522-528. Viçosa - MG. 2010.
- Naghattini, M.; Pinto, E. J. D. A. Hidrologia estatística. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 600 p.
- NERC. Flood Studies Report. London. 1975.
- Novaes, L. F. Modelo para quantificação da disponibilidade hídrica na bacia do Paracatu. Dissertação (mestrado em engenharia agrícola)-Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG. 2005.
- Pereira, S. B. Evaporação no lago de Sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Ambiental)-Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa–MG, 2004.
- Silva Junior, C. A.; Reis, J. A. T.; Caiado, M. A. C. Análise regional de curva de permanência de vazões para a bacia hidrográfica do rio Itapemitim (ES). XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013.

Silvapalan, M.; Takeuchi, K.; Franks, S. W.; Gupta, V. K.; Karambiri, H. Lakshmi, V. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, p. 857-880, 2003.

Sousa, H. T.; Pruski, F. F.; Bof, L. H. N.; Cecon, P. R.; Souza, J. C. SisCAH - Sistema computacional para Análise Hidrológica. 1. ed. Viçosa: Agência Nacional das Águas, v. 1, 2009.

Sousa, H. T.; Pruski, F. F.; Bof, L. H. N.; Cecon, P. R.; Souza, J. C. SisCoRV - Sistema Computacional para Regionalização de Vazões. 1. ed. Viçosa: Agência Nacional das Águas, v. 1, 2013.

Tucci, C. E. M. Hidrologia ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora Universidade/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.

Tucci, C. M. E. Regionalização de Vazões. Porto Alegre: Editora Universidade/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2002. 256 p.

USGS - United States Geological Survey. Earth Explorer. earthexplorer.usgs.gov. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: jun 2017.

CAPÍTULO 3 – Programa para estimativa de vazões da parte baiana da bacia hidrográfica do rio Pardo

Resumo: A bacia hidrográfica do rio Pardo tem papel importante na economia local. Entretanto, as variações sazonais e uso inadequado do recurso tem propiciado conflitos pelo seu uso. Visando uma gestão participativa e igualitária é essencial conhecer a quantidade de água disponível. Todavia, os métodos de estimativa de vazão podem exigir dos profissionais conhecimento adicional acerca de hidrologia e geoprocessamento para a sua correta aplicação. Visando facilitar a obtenção de dados quantitativos de vazão, foi desenvolvido um software que permite ao usuário interação com mapas e obtenção de vazões máximas para diferentes períodos de retorno, média de longo período e mínimas com 90% (Q_{90}) e 95% (Q_{95}) de permanência na curva para a porção baiana da bacia hidrográfica do rio Pardo. O programa, desenvolvido em linguagem Java, utiliza o kit de desenvolvimento ArcGIS Runtime SDK, tendo como base cartográfica o Open Street Map. O software desenvolvido, denominado Q Pardo, permite a obtenção de vazões máximas, médias e mínimas de forma rápida e simplificada para toda extensão do rio Pardo e afluentes (níveis 5 e 6 da ottocodificação) localizado na parte baiana da bacia.

Palavras Chave: Recursos hídricos; regionalização de vazões, hidrologia, vazão máxima, geoprocessamento

CHAPTER 3 - Flow estimation program in Bahia part of the Pardo river basin

Abstract: The Pardo river basin has an important role in the local economy. However, seasonal variations and inadequate use of the resource has led to conflicts over its use. Aiming at participatory and egalitarian management, it is essential to know the amount of water available. However, the estimation methods may require professionals to have additional knowledge about hydrology and geoprocessing for their correct application. In order to facilitate the quantitative flow data obtaining, a software was developed to allows the user to interact with maps and obtain maximum flows for different return periods, long period average and minimums with 90% (Q_{90}) and 95% (Q_{95}) Of permanence in the curve for the Bahia portion of the Pardo river basin. The software, developed in Java language, uses the ArcGIS Runtime SDK development kit, based on cartography of Open Street Map. The developed software, called Q Pardo, allows to obtain maximum, medium

and minimum flows in a quick and simplified way for All extension of the Pardo river and their tributaries (levels 5 and 6 of ottocodification) located in the Bahia part of the basin.

Key words: water resources; Regionalization of flows, hydrology, maximum flow, geoprocessing

1. INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do rio Pardo tem papel importante no desenvolvimento da região norte do estado de Minas Gerais e sudoeste e sul do estado da Bahia, sendo o rio principal e seus tributários fornecedores de água para abastecimento público, produção agrícola, animal (IBGE, 2006). O uso inadequado do solo e desmatamento vem acentuando as variações sazonais de disponibilidade hídrica da região, acarretando extensos períodos de seca e, conseqüente prejuízos à economia local (INSA, 2011).

Na busca por uma gestão participativa e descentralizada do recurso, é de suma importância conhecer o regime de vazões dos mananciais (IBIAPINA et al., 1999). Todavia, a insuficiência ou até inexistência de dados fluviométricos dificultam na elaboração de projetos que necessitam de informações tais como vazões máximas, médias e mínimas, imprescindíveis para a gestão adequada do recurso (Razavi & Coulibaly, 2013; Tucci, 2013).

Visando minimizar problemas decorrentes da carência de dados fluviométricos em bacias hidrográficas, hidrólogos de todo o mundo tem recorrido a métodos de estimativa de vazões (Blöschl & Sivapalan, 1995; Sivapalan et al., 2003; e Yadav et al., 2007). A regionalização de vazões é o método de estimativa fluviométrica mais aplicado internacionalmente, sendo atualmente a metodologia recomendada por órgãos governamentais nacionais e internacionais.

Diversos são os métodos que podem ser utilizados para a regionalização de vazões, entretanto, tais métodos requerem conhecimento acerca do tratamento das séries históricas de dados de vazão, geoprocessamento, podendo ainda necessitar de complexo conhecimento de técnicas de modelagem e entendimento de processos físicos ambientais, a depender do método de regionalização utilizado. Todos esses fatores podem configurar como dificuldade adicional no planejamento ambiental e urbano, uma vez que os diversos profissionais que fazem uso das vazões de referência, médias e máximas podem não ter pleno domínio da técnica de regionalização.

Portanto a existência de uma ferramenta de disponibilização de dados regionalizados de fácil acesso, capaz de fornecer prontamente o dado de vazão necessário para condução de determinado projeto é de grande importância para o eficiente planejamento e gestão de recursos e contribuição relevante para a elaboração de projetos de obras hidráulicas.

Neste contexto, objetivou-se com o presente trabalho o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para disponibilização de dados de vazões máximas, para diferentes períodos de retorno, vazões médias de longa duração, vazões mínimas com permanência de 90% e 95% na série histórica, que permita ao usuário, com base no conceito de arquitetura integrada em SIG, a estimativa de vazões no local desejado da parte baiana da bacia hidrográfica do rio Pardo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A elaboração do software foi dividida nas seguintes etapas: (i) estudos de regionalização de vazões e levantamento das características físicas da bacia hidrográfica; (ii) obtenção de variáveis explicativas; e (iii) Desenvolvimento da ferramenta computacional para às informações hidrológicas.

2.1. Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Pardo está contida entre os paralelos $-14,62^\circ$ e $-16,1^\circ$ e entre os meridianos $-42,81^\circ$ e $-39,2^\circ$, sendo o estudo realizado na parte baiana da bacia, visto que a porção do estado de Minas Gerais já se encontra regionalizada por Euclides et al. (2011). A região estudada (Figura 4) possui área de drenagem de 19.872,05 km², que equivale a 61,03 % da área total da bacia, compondo 22 municípios com população residente de cerca de 757.073 habitantes (IBGE, 2010).

2.2. Estudos de regionalização de vazões e levantamento das características físicas da bacia hidrográfica

A regionalização de vazões consiste na transferência de informações de vazões de bacias hidrográficas com dados para bacias hidrográficas sem dados, bastando para isso, existir similaridade hidrológica entre elas (Bloschl & Silvapalan, 1995).

No estudo, foram aplicadas equações de regionalização de vazões da porção baiana da bacia hidrográfica do rio Pardo geradas por Carvalho et al. (2017)¹. Para a regionalização

¹ Referente ao capítulo 2 que compõe o presente trabalho de dissertação.

do rio Pardo foi aplicada a metodologia de regressões múltiplas (Tabela 2) descrito pela ELETROBRÁS (1987). Os afluentes de níveis 5 e 6 da ottocodificação que drenam suas águas para o rio Pardo foram regionalizados pelo método da conservação de massas (Tabela 3), proposto por Pereira (2004) e adaptado por Novaes (2005).

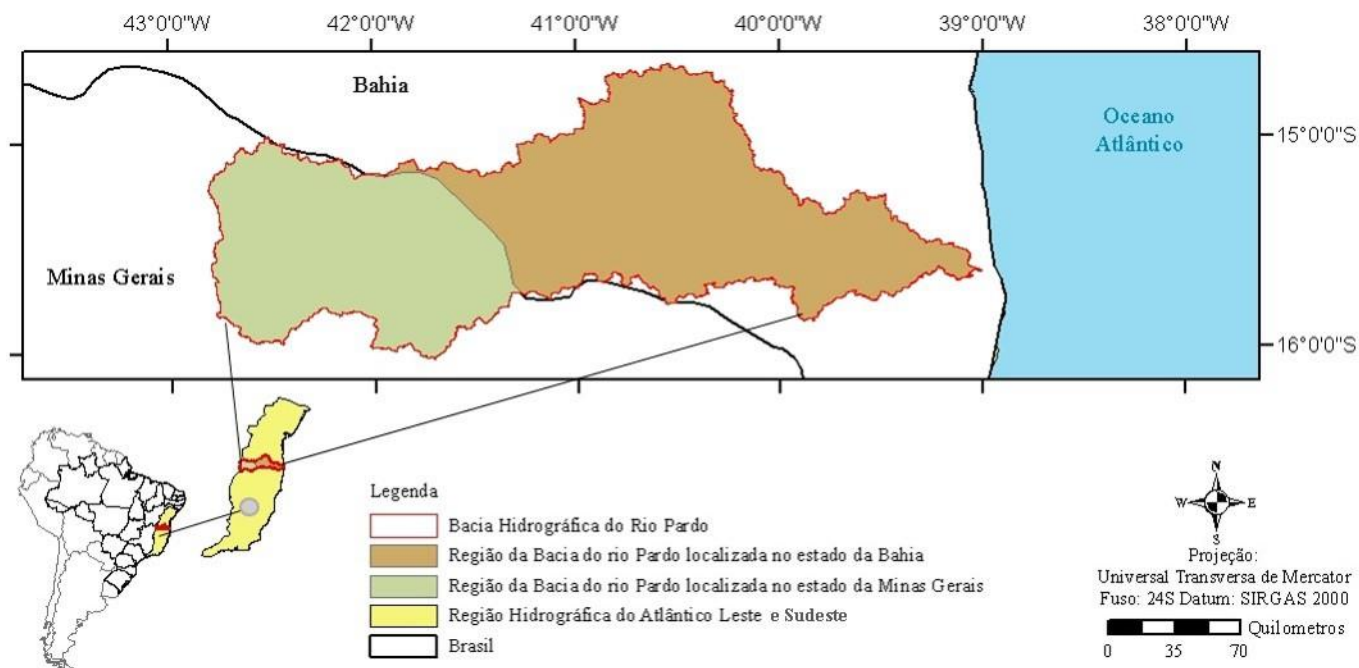


Figura 4. Bacia hidrográfica do rio Pardo

Com intuito de obter as informações morfológicas da bacia hidrográfica, foram utilizadas imagens do tipo Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) com resolução de 30 metros junto ao portal Earth Explorer (USGS, 2016). De posse das imagens, realizou-se preenchimento de depressões espúrias, sendo posteriormente determinada direção de escoamento e escoamento acumulado. Tais parâmetros são necessários para geração do modelo digital de elevação (MDE) e modelo digital de elevação graficamente condicionado (MDEGC), indispensáveis para a delimitação da bacia hidrográfica. A hidrografia foi obtida considerando o acúmulo de 15.000 células a partir do MDEGC.

Todos os procedimentos foram realizados utilizando a extensão hydrology do software ArcGIS 10.0 (ESRI, 2011), sendo os shapefiles gerados convertidos em formato MapPackage para posterior incorporação ao software.

2.3. Obtenção de variáveis explicativas

A aplicação das equações de regionalização está condicionada a determinação das variáveis área (A) e comprimento total da rede de drenagem (Lt) para a obtenção das vazões na posição da hidrografia desejada. Visando a estimativa da vazão em toda extensão da bacia hidrográfica, foram calculados valores de A e Lt a montante de pontos localizados na hidrografia gerados com espaçamento entre si de 1 km. Em virtude da quantidade de procedimentos envolvidos e ainda o caráter repetitivo do processo, foram desenvolvidos modelo em ambiente do Model Builder (ArcGIS 10.0) para o cálculo automático dos valores de A e Lt correspondentes aos diferentes pontos da hidrografia.

Por meio da extensão Model Builder é possível criar modelos estruturados em sequência contínua de ferramentas e dados de entrada. No Model Builder os dados de entrada são caracterizados por elipses de cor azul escuro, os dados de saída definidos por elipses de cor verde, as ferramentas disponíveis representadas por retângulos de cor amarela e iteradores por hexágonos de cor alaranjada. Além destes o software permite a identificação de variáveis da tabela de atributos da feição que são representadas por elipses de cor azul clara.

Para determinação da área de drenagem foi utilizado o iterador Iterate Feature Selection que tem a função de coletar informações de cada ponto existente na feição da camada de pontos, sendo estes utilizados como entrada para a ferramenta Snap Pour Point. O Snap Pour Point tem como função identificar no escoamento acumulado da bacia hidrográfica o pixel da hidrografia mais próximo ao ponto coletado pelo iterador.

De posse do pixel referente ao ponto e da direção de escoamento da bacia hidrográfica, é possível delimitar a área de drenagem a montante desse ponto por meio da ferramenta Watershed. A área de drenagem gerada em formato raster é transformada em formato vetorial utilizando a ferramenta Raster to Polygon. O polígono obtido é submetido a correção de possíveis erros na delimitação da área e posterior extração das informações em formato de tabela, sendo utilizadas para tanto as ferramentas Dissolve e Zonal Geometry as Table, respectivamente. O procedimento descrito para obtenção dos valores de área referente aos pontos da hidrográfica se encontram representados na Figura 5A.

O comprimento total da rede de drenagem de determinado ponto foi obtido por meio do recorte da hidrografia realizado tendo como referência os limites da área de drenagem correspondente ao mesmo ponto. Para determinação dos Lt para todos os pontos hidrografia foi desenvolvido um modelo no ambiente do Modelbuilder cujos dados de entradas foram hidrografia e áreas de drenagem referente a cada ponto (Figura 5B). O

iterador utilizado neste modelo foi o Iterate Feature Classes, que tem como função buscar as diferentes feições de área de drenagem dentro da geobase para servirem de moldes para recorte da hidrografia por meio da ferramenta Clip. Para quantificar o comprimento total dos afluentes pertencentes a hidrografia recortada e extração da informação em formato de tabela foi utilizada a ferramenta Summary Statistics.

2.4. Desenvolvimento da ferramenta computacional para às informações hidrológicas

O software, denominado Programa de estimativa de vazões da bacia hidrográfica do Pardo (QPARDO), foi desenvolvido em linguagem de programação Java para o sistema operacional Windows, com armazenamento em uma base de dados local. Criado em ambiente de desenvolvimento integrado Eclipse (IDE), o programa utilizou o kit de desenvolvimento de software ArcGIS Runtime SDK, que permite a criação de projetos com aplicação de interface, exportando ficheiros para posterior distribuição.

O SDK conta com layouts, mapas e plantas disponibilizados em formatos geográficos nos quais dinamizam o projeto, facilitando a identificação da bacia hidrográfica e manuseio de camadas. No entanto, a ESRI, fabricante do produto, impõe como condicionante que todo o projeto se assente sobre esta SDK.

O programa foi desenvolvido em fluxo híbrido, ou seja, utilizando o ArcGIS server para inserção da basemaps do Open Street Map e, ArcGIS Desktop, para incorporação da bacia hidrográfica e hidrografia geradas diretamente do ArcMap.

Após a inserção dos shapefiles, realizou-se a implementação das equações de regionalização e vinculação das variáveis a tabela de dados. Posteriormente, criou-se um código para localização das coordenadas da tabela mais próximas ao ponto selecionado, sendo este demarcado em mapa. Os valores de área (A) e comprimento total da rede de drenagem (Lt) selecionados são inseridos nas equações de regionalização e calculadas as vazões, sendo estas apresentadas ao usuário.

A base de dados foi configurada em projeção Universal Transversa de Mercator; datum, SIRGAS 2000; zona 24 Sul.

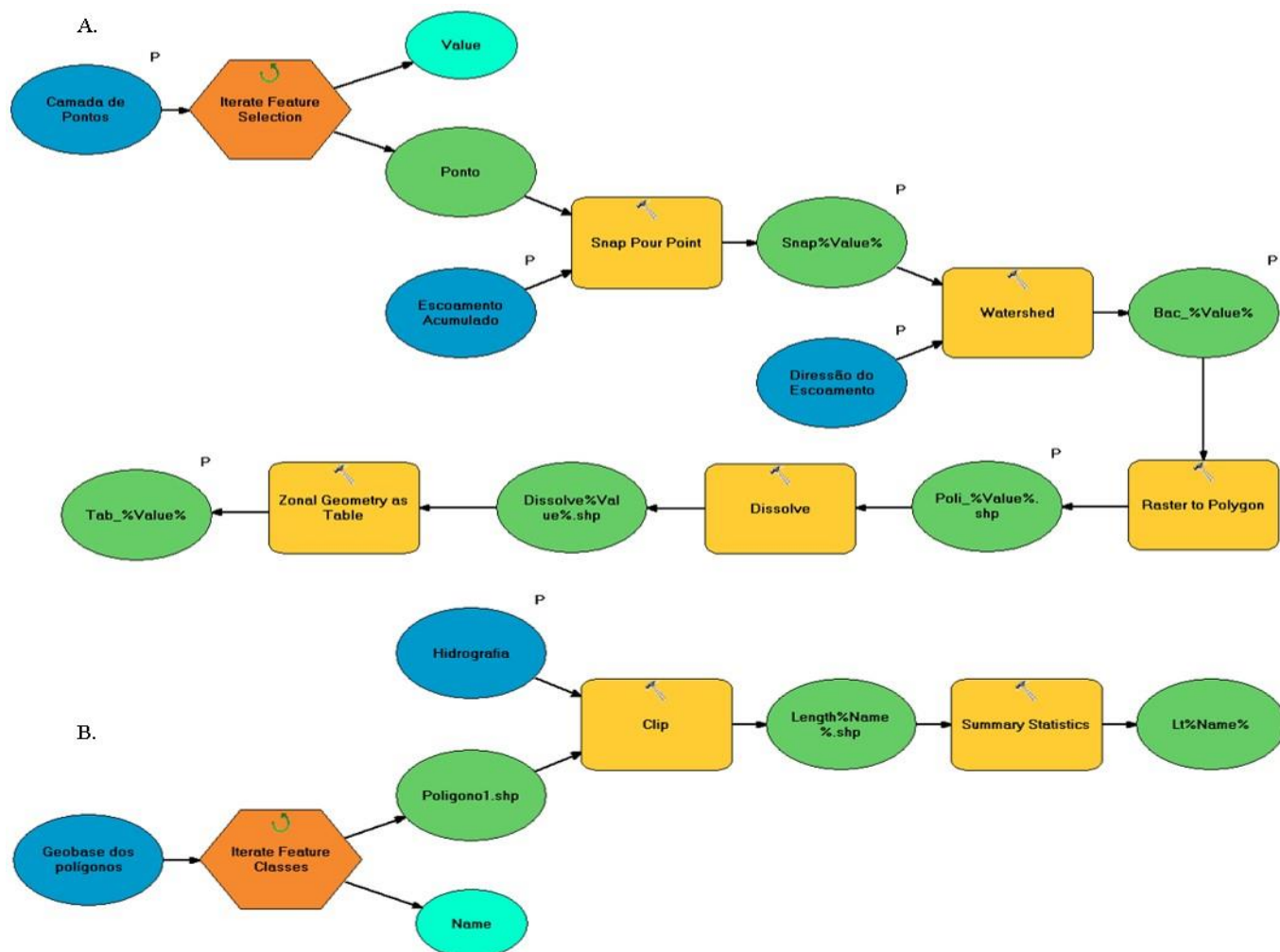


Figura 5. A - Modelo para geração de área de drenagem correspondente a pontos espaçados a cada 1km para a bacia hidrográfica do rio Pardo; B - Modelo para geração automática do comprimento total da rede de drenagem a cada 1km no rio Pardo

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O QPARDO foi desenvolvido para o sistema operacional Windows, sendo necessária a instalação do componente Java versão 8. Por utilizar banco de dados do Open Street Map, é necessária conexão com a internet para seu funcionamento. Na Figura 6 é mostrada a tela de abertura do software.

Ao iniciar o programa é necessário clicar no botão “Carregar Camadas”. Feito isso serão carregados os mapas referentes a hidrografia do rio Pardo e seus afluentes, bem como limites da bacia (Figura 7). Uma vez carregado o mapa da bacia, o usuário poderá dar início ao processo de consulta de vazões.

O processo de consulta de vazões a partir do QPARDO poderá ser feito de duas maneiras. Na primeira delas é possível a obtenção de informações de vazão clicando

diretamente na posição da hidrografia na qual se deseja conhecer as vazões. Esta forma de consulta, entretanto, exige conhecimento prévio acerca da bacia no que diz respeito à distribuição geográfica da posição pretendida da hidrografia.



Figura 6. Tela de abertura do Programa para estimativa de vazões da parte baiana da bacia hidrográfica do rio Pardo (QPARDO)

As consultas no QPARDO podem, ainda, serem feitas a partir da inserção das coordenadas geográficas do local desejado. É importante salientar que as coordenadas não precisam, necessariamente, de correspondência exata com a posição do leito do rio. Ao inserir uma coordenada, que pode inclusive ser da sede de determinada fazenda ou outro empreendimento onde pretende-se solicitar outorga de uso da água, por exemplo, será retornado a partir do programa, os resultados referentes à posição do rio mais próxima da coordenada inserida. Todavia é de grande importância que o usuário verifique o ponto da hidrografia apresentado como resposta à consulta e se certifique que este é realmente a posição da hidrografia pretendida para estimativa das vazões, visto que o ponto de menor distância em relação à coordenada inserida pode não ser o desejado.

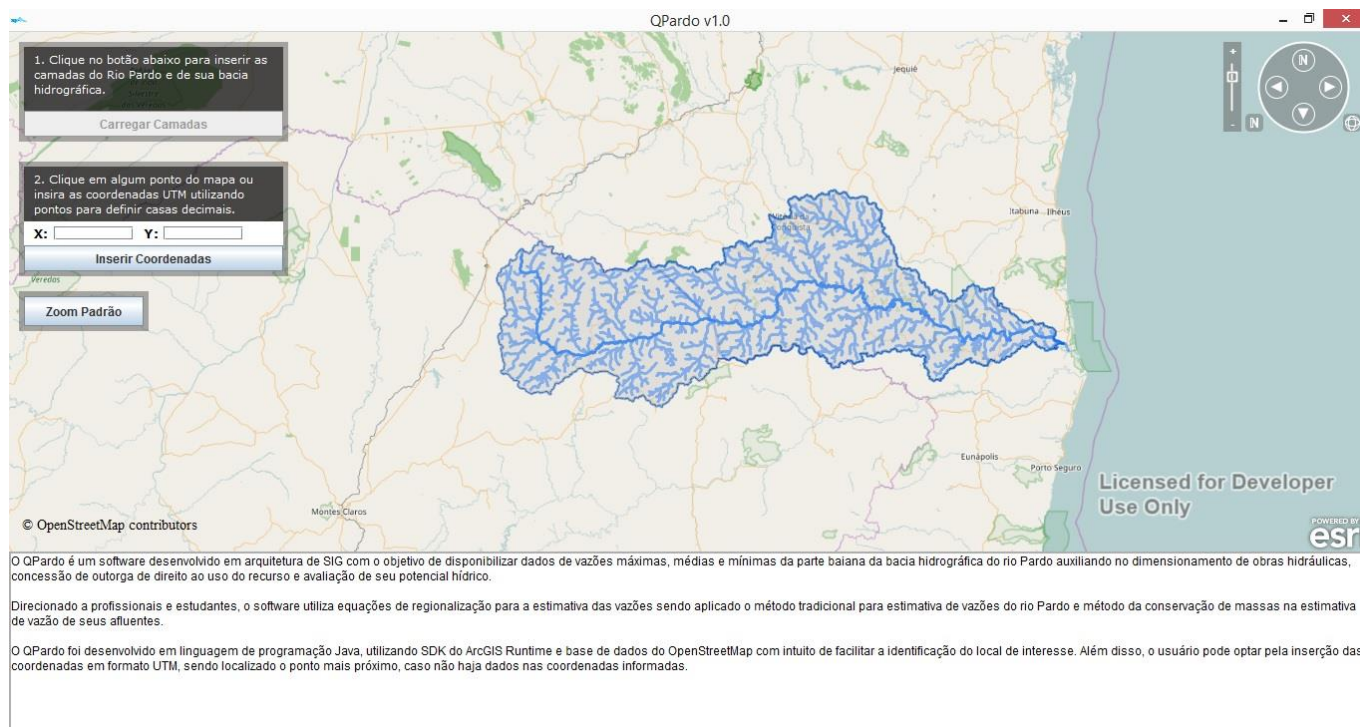


Figura 7. Tela inicial do software com camadas carregadas

No que se refere ao que foi mencionado, especial atenção deverá ser dada para situações em que o local da consulta se encontrar próximo à confluências. Nesse caso o resultado da consulta poderá estar associado ao afluente se este se encontrar mais próximo do ponto referente às coordenadas inseridas, conduzindo a erro na obtenção dos dados de vazão, caso o objetivo da consulta seja o rio principal e não o afluente. Esta recomendação vale também caso o usuário opte pela consulta clicando diretamente na hidrografia.

Ao identificar o ponto da hidrografia pretendido, são disponibilizadas no programa, além dos dados estimados de vazões máximas, médias e mínimas, informações acerca das coordenadas geográficas do ponto da hidrografia consultada, área de drenagem e comprimento total dos cursos a montante deste.

Como o intuito de exemplificar a aplicação do software, foi selecionada uma seção no rio Pardo situado no município de Mascote com coordenadas X 466.542,78 e Y 8.278.350,49. Ao realizar a consulta a partir da inserção de coordenadas no campo “Inserir Coordenadas”, o ponto mais próximo das coordenadas inseridas foi apresentado (Figura 8).

No painel abaixo do mapa (Figura 8) estão dispostas as informações desejadas para o ponto selecionado. É possível verificar as coordenadas do ponto utilizado no cálculo e respectivos valores de área e comprimento total da rede de drenagem, além de vazões

calculadas ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$). Para o rio Pardo estão disponíveis informações de vazões máximas para os períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 500 anos, vazões mínimas com 90% e 95% de permanência e vazão média de longa duração.

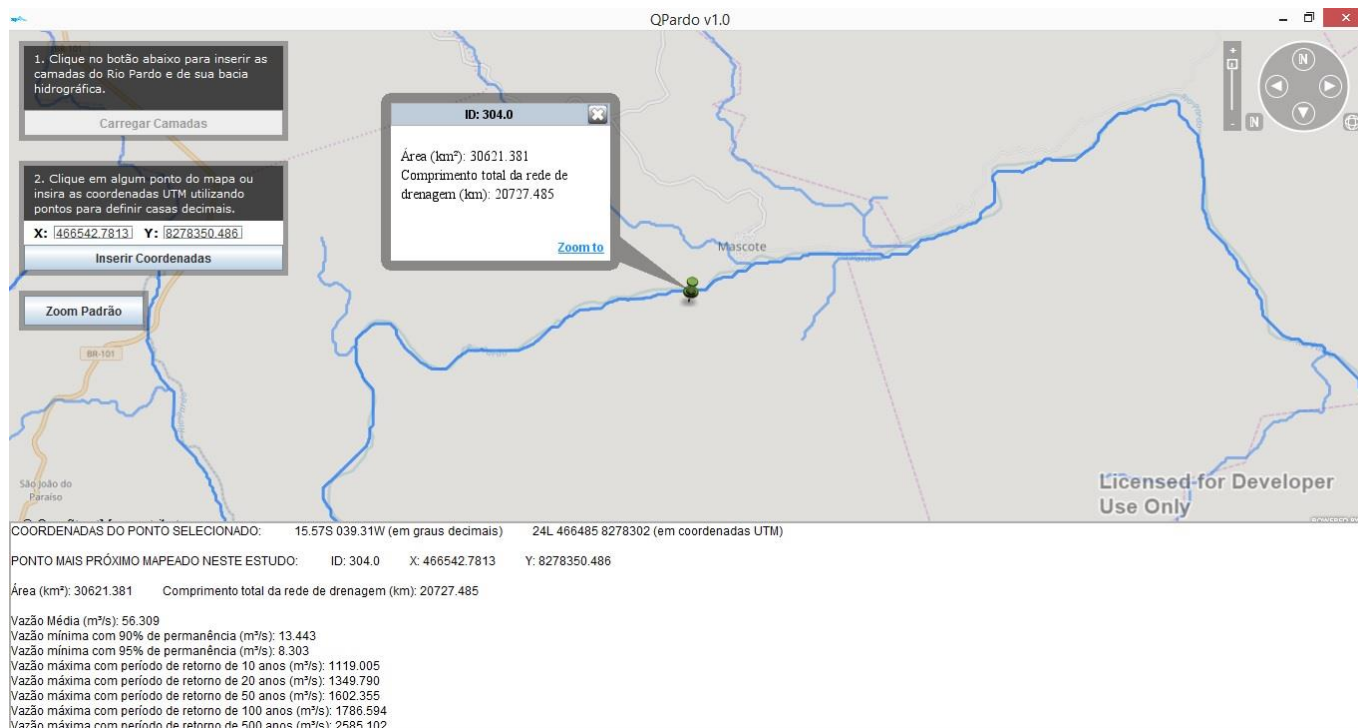


Figura 8. Localização do ponto da hidrografia mais próximo das coordenadas inseridas.

No ponto estudado a vazão Q_{95} calculada foi de 8,303 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$). A Agência Nacional das Águas utiliza a vazão mínima com 95% de permanência (Q_{95}) como base para emissão de outorgas preventivas e de direito ao uso de recursos hídricos, sendo esta submetida a balanço hídrico para abstração de outorgas já concedidas e estimado a vazão possível de ser outorgada para o ponto solicitado (ANA, 2014).

Atualmente a porção baiana do rio Pardo possui 425 diferentes outorgas de direito ao uso do recurso hídrico (ANA, 2017) sendo calculados pelo Sistema de Controle de Balanço Hídrico (SCBH) (ANA, 2014). Todavia, o Sistema utiliza dados pontuais de vazões para estimativa da Q_{95} podendo acarretar em problemas de superestimativa ou subestimativas das vazões a serem outorgadas, a depender da localização do ponto solicitado.

A vazão média de longa duração (Q_{mld}) calculada no ponto estudado foi de 53,309 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$). A Q_{mld} é caracterizada pela maior vazão possível de ser regularizada no ponto,

possibilitando o dimensionamento de reservatórios para abastecimento doméstico, dessedentação animal e agricultura irrigada (ANA, 2014).

As vazões máximas com diferentes períodos de retorno variaram de 1119,003 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) à 2585,102 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$). As vazões máximas possibilitam o dimensionamento de obras hidráulicas como canais, galerias fluviais e vertedores permitindo a drenagem do escoamento e controle de inundações (Tucci, 2013).

Visando o detalhamento da localização do ponto desejado, o usuário poderá aproximar a tela clicando no botão “Zoom to” presente na caixa de diálogo do ícone localizador, sendo apresentada ainda informações de área e comprimento total da rede de drenagem para o ponto.

Na primeira delas é possível a obtenção de informações de vazão clicando diretamente na posição da hidrografia na qual se deseja conhecer as vazões

Caso o usuário opte pela consulta manual, deverá navegar no mapa e clicar diretamente na posição da hidrografia na qual se deseja conhecer as vazões. Para ilustração da consulta manual tomou-se como exemplo um ponto situado no rio Catolé Grande localizado a montante da cidade de Itapetinga-BA (Figura 9).

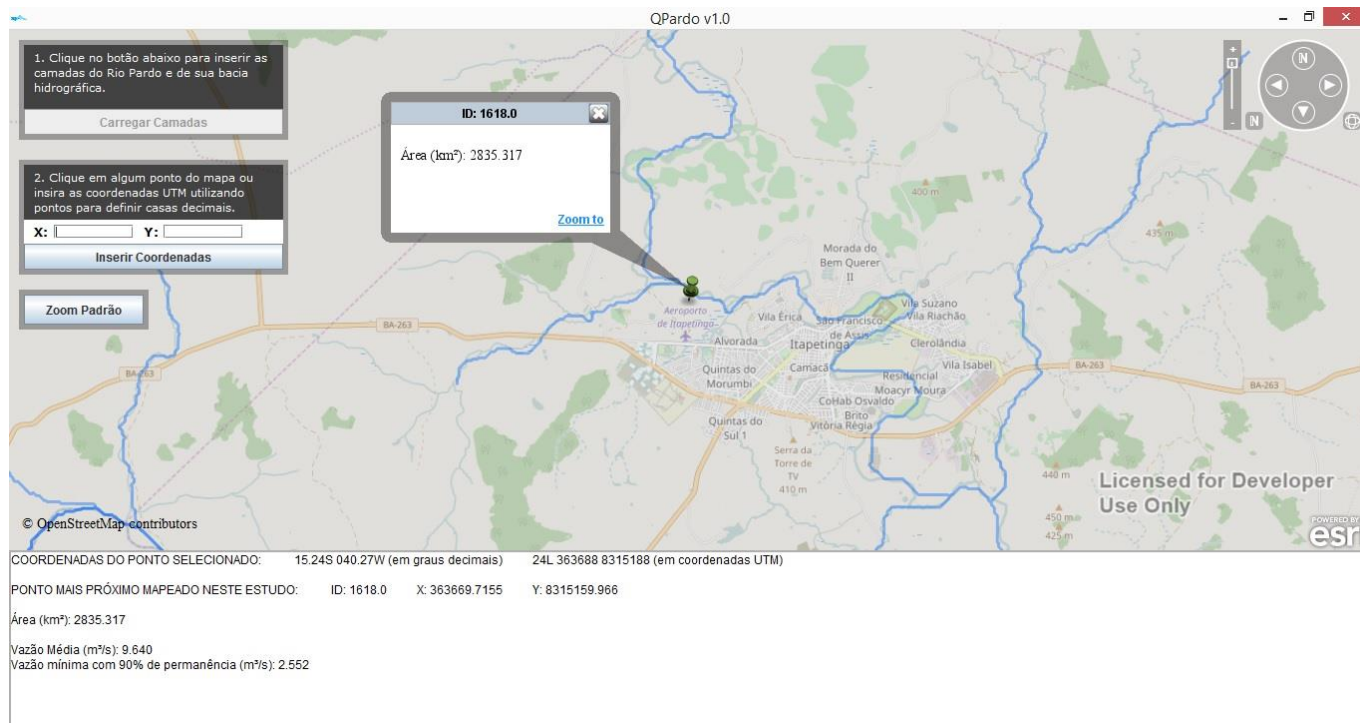


Figura 9. Exemplo de aplicação de localização manual do ponto para estimativa de vazões.

As informações disponíveis para afluentes são vazão mínima com 90% de permanência (Q_{90}) e vazão média de longa duração (Q_{mld}). A Q_{90} utilizada como critério para concessão de outorga em rios localizados no estado da Bahia, competindo ao Instituto Estadual de Meio Ambiente outorgar o rio Catolé Grande. (ANA, 2014). A Q_{90} obtida para o ponto estudado no rio Catolé Grande foi $2,552 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$ e vazão média de longa duração (Q_{mld}) $9,64 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$.

4. CONCLUSÕES

1. O software se mostrou eficiente na disponibilização de dados de vazão para a porção baiana da bacia hidrográfica do rio Pardo, propiciando a utilização de forma simplificada por profissionais, órgãos governamentais e estudantes.

2. Os modelos gerados possibilitaram a obtenção das variáveis área e comprimento total da rede de drenagem de forma automatizada, entretanto, exigiu um longo tempo de processamento.

3. A ferramenta propicia ao usuário fácil identificação do ponto desejado ou inserção de coordenadas, não necessitando de conhecimentos aprofundados acerca de Sistema de Informações Geográficas (SIG) e regionalização de vazões.

5. LITERATURA CITADA

ANA – Agência Nacional das Águas. Outorgas ANA 2001 a 2016. Sistema Nacional de Informações de Recursos hídricos. Disponível em: < <http://portal1.snirh.gov.br/ana> >. Acesso em: jan 2017.

ANA - Agência Nacional Das Águas. Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos. 1. ed. Brasília: ANA, v. 1, 2014.

Bloschl, G.; Sivapalan, M. Scale issues in hydrological modelling: a review. *Hydrological Processes*, v. 9, n. 3-4, 1995.

ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S. A. Metodologia para regionalização de vazões. Rio de Janeiro. 1985.

ESRI -Environmental Systems Research Institute. ArcGIS Desktop. [S.l.]: [s.n.], v. 10.1, 2011.

Euclides, H. P. Estudos de vazão máxima, mínima e média de longo período para as sub-bacias dos rios Verde Grande, Pardo e Jequitaiá. *Tecnologias para elaboração de projetos hidroagrícolas em bacias hidrográficas*, Viçosa, 1994. 03-61.

- Ibiapina, A. V. et al. Evolução da hidrometria no Brasil. In: _____ O estado das águas no Brasil. Brasília: Agência Nacional das Águas, 1999.
- INSA - Instituto Nacional Do Semiárido. Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas. 1. ed. Campina Grande: INSA, v. 1, 2011.
- IBGE - Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. Censo Demográfico 2010. [S.l.]. 2010.
- IBGE - Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. Censo Agropecuarário 2006. [S.l.]. 2006.
- Novaes, L. F. Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na bacia do Paracatu. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005.
- Pereira, S. B. Evaporação no lago Sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2004.
- Razavi, T.; Coulibaly, P. Streamflow Prediction in Ungauged Basins: Review of Regionalization Methods. *Journal of Hydrology Engineering*, p. 958-975, 2013.
- Sivapalan, M. et al. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins(PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, p. 857-880, 2003.
- Tucci, C. E. M. Hidrologia ciência e aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora Universidade/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.
- USGS - United States Geological Survey. Earth Explorer. earthexplorer.usgs.gov. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: jun 2016.
- Yadav, M.; Wagener, T.; Gupta, H. V. Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. *Water Resources Research*, v. 44, p. 1756-1774, 2007.

RECOMENDAÇÕES

1. Considerar diferentes métodos de regionalização propiciando ao usuário do software a escolha da metodologia para o cálculo das vazões.
2. Vinculação do software com a base de dados de outorgas de direito ao uso do recurso hídrico da Agência Nacional das Águas, permitindo a criação rotineira para calcular a vazão ser outorgada em determinado ponto da hidrografia por meio de balanço hídrico.
3. Aperfeiçoar o software para inserção de diferentes camadas e criação de mapas.
4. Expansão do software para todo o estado da Bahia.
5. Disponibilizar os dados por meio de uma plataforma SIGweb de forma a facilitar o acesso às informações.
6. Estimativa das diferentes vazões em períodos sazonais.

APÊNDICE

1. Características morfométricas das áreas de drenagem das estações fluviométricas

Tabela 4. Características morfométricas das áreas de drenagem das estações utilizadas no estudo

Estações	A (km ²)	P (km)	Lt (Km)	Lm (Km)	Lp (Km)	Dd (adm)	Kf (adm)	Kc (Adm)
53630000	16297,65	866,65	9926,27	369223	367454	0,6090	0,3425	1,9008
53650000	18537,47	1023,19	11431,4	421434	419665	0,6167	0,3279	2,1042
53690000	26081,22	1260,46	16760,48	556948	555179	0,6426	0,2977	2,1854
53880000	29419,45	1500,72	19282,58	664069	662300	0,6554	0,2278	2,4499
53950000	30644,27	1581,10	20170,66	710852	709083	0,6582	0,2133	2,5290

em que A é área; P é o perímetro; Lt é o comprimento total da rede de drenagem; Lp é o comprimento do rio principal; Lm é o comprimento do percurso de escoamento do ponto mais remoto até a foz; Dd é densidade de drenagem; Kf é o fator de forma; Kc é coeficiente de compacidade.

ANEXO

1. Normas da Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental

REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL INSTRUÇÕES AOS AUTORES

Composição sequencial do artigo:

a) Título: engloba, com no máximo 15 palavras, o conteúdo e o objetivo do trabalho, incluindo-se os artigos, as preposições e as conjunções, apenas a primeira letra da primeira palavra deve ser maiúscula; entretanto, quando o título tiver um subtítulo, ou seja, com dois pontos (:), a primeira letra da primeira palavra do subtítulo (ao lado direito dos dois pontos) deve ser maiúscula; enfim, o título não deverá ter as palavras efeito, avaliação, influência nem estudo.

b) Nome(s) do(s) autor(es):

- O arquivo do artigo enviado no ato da submissão não deverá conter o(s) nome(s) do(s) autor(es) nem a identificação de sua(s) instituição(ões), visto que este arquivo será disponibilizado para os consultores no sistema; entretanto, o nome(s) do(s) autor(es) será(ão) informado(s) ao sistema pelo autor correspondente quando da submissão. Antes de o autor correspondente iniciar o processo de submissão todos os autores já deverão estar cadastrados no sistema. Torna-se necessário que o autor correspondente inclua seu nome como autor definindo, assim, sua posição em relação aos demais.

- O artigo deverá ter, no máximo, seis autores.

- Em relação ao que consta na primeira versão do artigo submetida à Revista, não serão permitidas alterações posteriores na sequência nem nos nomes dos autores.

c) Resumo: no máximo com 15 linhas e não ter abreviaturas.

d) Palavras-chave: no mínimo três e no máximo cinco, não constantes no Título, separadas por vírgula e com todas as letras minúsculas.

e) Título em inglês: terá a mesma normatização do título em Português.

f) Abstract: no máximo com 15 linhas devendo ser tradução fiel do Resumo. A casa decimal dos números deve ser indicada por ponto ao invés de vírgula.

g) Key words: terá a mesma normatização das palavras-chave e deverá ser uma tradução fiel das palavras-chave.

h) Introdução: destacar a relevância da pesquisa, inclusive através de revisão de literatura, em no máximo 1 (uma) página. Não devem existir, na Introdução, equações, tabelas, figuras nem texto teórico básico sobre determinado assunto mas, sim, referente a resultados de pesquisa. O último parágrafo deve apresentar o objetivo da pesquisa.

i) Material e Métodos: deve conter informações imprescindíveis que possibilitem a repetição da pesquisa por outros pesquisadores.

j) Resultados e Discussão: os resultados obtidos devem ser discutidos e interpretados à luz da literatura. Não apresentar os mesmos resultados em tabelas e figuras. k) Conclusões: devem ser numeradas e escritas de forma sucinta, isto é, sem comentários nem explicações adicionais baseando-se apenas nos resultados apresentados. Não devem possuir abreviaturas.

l) Agradecimentos (facultativo).

m) Literatura Citada:

- O artigo submetido deve ter no mínimo 70% de citações de periódicos sendo pelo menos 40% dos últimos oito anos.

- Não serão aceitas citações bibliográficas do tipo apud ou citado por, ou seja, as citações deverão ser apenas das referências originais.

- Citações de artigos no prelo, comunicação pessoal, folder, apostila, monografia, trabalho de conclusão de curso de graduação, relatório técnico e trabalhos em congressos, não são aceitas na elaboração dos artigos. Os trabalhos em congressos serão aceitos apenas quando inexisterem publicações em periódicos sobre o tema em questão.

- Em determinada contextualização, citação de mais de uma referência bibliográfica deve, primeiro, atender a ordem cronológica e depois a ordem alfabética dos autores; já em

citação de mais de uma referência bibliográfica dos mesmos autores não se deve repetir seu nome; entretanto, os anos de publicação devem ser separados por vírgula.

- O artigo deverá ter no mínimo 15 e no máximo 30 referências bibliográficas. Para a contribuição na modalidade de revisão de literatura não existe limite máximo de referências bibliográficas.

Para os artigos escritos em Inglês, título, resumo e palavras-chave deverão, também, constar em Português, vindo primeiro no idioma principal.

A contribuição na forma de Revisão de Literatura deverá ter a seguinte composição sequencial: título, Resumo, Palavras-chave, Título em inglês, Abstract, Key words, Introdução, Itens sobre temas da revisão, Conclusões, Literatura Citada.

Edição do texto

a) Word do Microsoft Office 2010: O artigo deverá ser editado apenas nesta versão do Word.

b) Texto: fonte Times New Roman, tamanho 12. Não deverão existir, no texto, palavras em negrito nem em itálico, exceto para o título, itens e subitens, que deverão ser em negrito, e os nomes científicos de espécies vegetais e animais, que deverão ser em itálico. Em equações, tabelas e figuras não deverão existir itálico nem negrito. As equações deverão ser escritas no aplicativo MS Equation. Evitar parágrafos muito longos devendo, preferencialmente, ter no máximo 60 palavras.

c) Espaçamento: duplo em todo o texto do manuscrito.

d) Parágrafo: 0,5 cm. e) Página: Papel A4, orientação retrato, margens superior e inferior de 2,54 cm e esquerda e direita de 3,00 cm, no máximo de 15 páginas, incluindo tabelas e figuras. As páginas e as linhas deverão ser numeradas; a numeração das linhas deverá ser contínua, isto é, dando continuidade de uma página para outra.

f) Todos os itens em letras maiúsculas, em negrito e centralizados, exceto Resumo, Abstract, Palavras-chave e Key words, deverão ser alinhados à esquerda e apenas a primeira letra maiúscula. Os subitens deverão ser alinhados à esquerda, em negrito e somente a primeira letra maiúscula.

g) As grandezas devem ser expressas no SI (Sistema Internacional) e a terminologia científica deve seguir as convenções internacionais de cada área em questão.

h) Tabelas e Figuras (gráficos, mapas, imagens, fotografias, desenhos):

- As tabelas e figuras devem ser autoexplicativas e apresentar largura de 9 ou 18 cm, com texto em fonte Times New Roman, tamanho 9 e ser inseridas logo abaixo do parágrafo no qual foram citadas a primeira vez. Exemplos de citações no texto: Figura 1; Tabela 1. Tabelas e figuras que possuem praticamente o mesmo título deverão ser agrupadas em uma única tabela ou figura criando-se, no entanto, um indicador de diferenciação. A letra indicadora de cada subfigura em uma figura agrupada deve ser maiúscula e com um ponto (exemplo: A.), posicionada ao lado esquerdo superior da figura. As figuras agrupadas devem ser citadas no texto, da seguinte forma: Figura 1A; Figura 1B; Figura 1C. As tabelas e figuras com 18 cm de largura ultrapassarão as margens esquerda e direita de 3 cm, sem qualquer problema. O total de figuras somado ao total de tabelas, não deverá ser superior a 6, ou seja, um artigo que tenha 2 tabelas poderá ter no máximo 4 figuras; no entanto, nesta contagem uma figura que seja o resultado do agrupamento de várias figuras, será considerada uma única figura.

- As tabelas não devem ter tracejado vertical e o mínimo de tracejado horizontal. Nas colunas os valores numéricos deverão ser alinhados pelo último algarismo. Exemplo do título, o qual deve ficar acima da tabela: Tabela 1. Estações do INMET selecionadas (sem ponto no final). Em tabelas que apresentam a comparação de médias, segundo análise estatística, deverá haver um espaço entre o valor numérico (média) e a letra. As unidades deverão estar entre parêntesis.

- As figuras não devem ter bordadura e suas curvas (no caso de gráficos) deverão ter espessura de 0,5 pt, podendo ser coloridas mas possuindo, sempre, marcadores diversos de legenda, visto que legendas baseadas apenas em cores quando xerocadas, desaparecerão. Exemplo do título, o qual deve ficar abaixo da figura: Figura 1. Perda acumulada de solo em função do tempo de aplicação da chuva simulada (sem ponto no final). Para não se tornar redundante as figuras não devem ter dados constantes em tabelas. Se o título e a numeração dos eixos x e/ou y forem iguais em figuras agrupadas, deixar só um título centralizado e a numeração em apenas um eixo. Gráficos, diagramas (curvas em geral) devem vir em imagem vetorial. Quando se tratar de figuras bitmap (mapa de bit), a resolução mínima deve ser de 300 bpi. Os autores deverão primar pela

qualidade de resolução das figuras tendo em vista a boa compreensão sobre elas. As unidades nos eixos das figuras devem estar entre parêntesis mas sem ser separadas do título por vírgula. Não deverão existir figuras possuindo curvas com r^2 inferior a 0,60; nesses casos, apenas colocar no manuscrito a equação e o respectivo valor de r^2 .

Exemplos de citações no texto

- a) Quando a citação possuir apenas um autor: Zonta (2010) ou (Zonta, 2010).

- b) Quando a citação possuir dois autores: Mielniczuk & Tornquist (2010) ou (Mielniczuk & Tornquist, 2010).

- c) Quando a citação possuir mais de dois autores: Pezzopane et al. (2010) ou (Pezzopane et al., 2010).

- d) Quando a autoria do trabalho for uma instituição/empresa, a citação deverá ser de sua sigla, em letras maiúsculas. Exemplo: EMBRAPA (2010).

Lista da Literatura Citada

As bibliografias citadas no texto deverão ser dispostas na lista em ordem alfabética começando pelo último sobrenome do primeiro autor e, em ordem cronológica crescente e conter os nomes de todos os autores. São apresentados, a seguir, exemplos de formatação:

- a) Livros Paz, V. P. S.; Oliveira, A.; Perreira, F. A.; Gheyi, H. R. Manejo e sustentabilidade da irrigação em regiões áridas e semiáridas. 1.ed. Cruz das Armas: UFRB, 2009. 344p.

- b) Capítulo de livros Antuniassi, U. R.; Baio, F. H. R. Tecnologia de aplicação de defensivos. In: Vargas, L.; Roman, E. S. Manual de manejo e controle de plantas daninhas. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. Cap.5, p.173-212.

c) Revistas Silva, V. G. de F.; Andrade, A. P. de; Fernandes, P. D.; Silva, I. de F. da; Azevedo, C. A. V.; Araujo, J. S. Productive characteristics and water use efficiency in cotton plants under different irrigation strategies. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, p.451-457, 2010.

d) Dissertações e teses Paixão, F. J. R. da. Doses de nitrogênio e conteúdo de água do solo no cultivo da mamoneira, variedade BRS Energia. Campina Grande: UFCG, 2010. 76p. Tese Doutorado

e) Trabalhos apresentados em congressos (Anais, Resumos, Proceedings, Disquetes, CD Roms) Centeno, C. R. M.; Azevedo, C. A. V.; Santos, D. B. dos; Lira, V. M. de; Lima, V. L. A. de. Coeficiente de cultivo da mamona BRS energia irrigada com diferentes níveis de água salina. In: Congresso Latino-Americano e do Caribe de Engenharia Agrícola, 9, e Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 39, 2010, Vitória. Anais... Jaboticabal: SBEA, 2010. CD Rom.

No caso de CD Rom o título da publicação continuará sendo Anais, Resumos ou Proceedings mas o número de páginas será substituído pelas palavras CD Rom. Para as revistas disponibilizadas na internet não colocar informação alguma de endereço da página, conforme o exemplo acima (item c).

Outras informações sobre normatização de artigos

a) Não colocar ponto no final das palavras-chave, key words e títulos de tabelas e figuras.

b) Na descrição dos parâmetros e variáveis de uma equação deverá haver um traço separando o símbolo de sua descrição e ponto e vírgula no final de cada descrição havendo ponto, entretanto, na última. A numeração de uma equação deverá estar entre parêntesis e alinhada à direita: exemplo: (1). As equações deverão ser citadas no texto, conforme os seguintes exemplos: Eq. 1; Eqs. 3 e 4.

c) Todas as letras de uma sigla devem ser maiúsculas; já o nome por extenso de uma instituição deve ter maiúscula apenas a primeira letra de cada palavra.

d) Nos exemplos seguintes de citações no texto de valores numéricos o formato correto é o que se encontra no lado direito da igualdade: 10 horas = 10 h; 32 minutos = 32 min; 5 litros = 5 L; 45 mililitros = 45 mL; $1/s = L s^{-1}$; $27^{\circ}C = 27^{\circ}C$; $0,14 m^3/min/m = 0,14 m^3 min^{-1} m^{-1}$; 100 g de peso/ave = 100 g de peso por ave; 2 toneladas = 2 t; 2 mm/dia = 2 mm d⁻¹ ; $2 \times 3 = 2 \times 3$ (devem ser separados); $45,2 - 61,5 = 45,2-61,5$ (devem ser juntos). A % é a única unidade que deve estar junto ao número (45%). Quando no texto existirem valores numéricos seguidos que possuem a mesma unidade, colocar a unidade somente no último valor. Exemplos: 20 m e 40 m = 20 e 40 m; 56,1%, 82,5% e 90,2% = 56,1, 82,5 e 90,2%.

e) Quando pertinente, deixar os valores numéricos no texto, tabelas e figuras com no máximo duas casas decimais.

f) Os títulos das bibliografias listadas devem ter apenas a primeira letra da primeira palavra maiúscula, com exceção de nomes próprios. O título de eventos deverá ter maiúscula apenas a 1ª letra de cada palavra.