

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

SABRIÉLE ALVES SOARES DE MATTOS¹

NELSON MARIO VICTORIA BARIANI²

**ANÁLISE DE UM MODELO DE PREVISÃO LOCAL DAS INUNDAÇÕES DO RIO
URUGUAI NO MUNICÍPIO DE ITAQUI
(ARTIGO)**

**Itaqui
2018**

¹ Acadêmica do curso *Lato Sensu* de Especialização em Ciências Exatas e Tecnologias, da UNIPAMPA. Graduada em Matemática pela Universidade Federal de Pelotas, Especialista em Orientação, Supervisão e Gestão escolar pela Universidade Internacional Uninter..

² Professor-Doutor e Orientador do Curso de Especialização em Ciências Exatas e Tecnologias, da Universidade Federal do Pampa.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo geral realizar uma análise das inundações do rio Uruguai na cidade de Itaqui, RS, a partir de dados fluviométricos de postos situados a montante, nos Municípios de Porto Xavier, Garruchos, São Borja, e no próprio Itaqui, com base no ano de 2014, a fim de propor uma relação simplificada que possa ser usada como modelo de previsão. Para isso, as principais variáveis hidráulicas e hidrológicas envolvidas no processo foram pesquisadas na literatura, sendo feita uma análise preliminar da viabilidade de aplicação de um modelo baseado na analogia com variáveis elétricas. Nesse intuito, perfis de hidrogramas de cotas fluviométricas obtidas através da Agência Nacional de Águas e da Prefeitura Naval Argentina foram elaborados e analisados, comparando os parâmetros altura, largura, área e tempo de propagação da onda. Com isso, procurou-se equacionar uma correlação empírica de decaimento exponencial das alturas dos picos de inundação entre Garruchos e Itaqui, em analogia ao modelo de amortecimento de ondas em circuitos RLC. O coeficiente de determinação $R^2 = 1$, para a função de decaimento exponencial obtida por correlação, mostrando ótimo ajuste, foi interpretado como um indicador favorável para a aplicação do modelo de análogo elétrico. Dessa forma, o trabalho poderá contribuir para a previsão, planejamento e estratégias de agentes públicos ou privados para a elaboração de meios de prevenção aos impactos das inundações do rio Uruguai, também podendo contribuir para posteriores estudos acerca desse tema.

Palavras-chave: Inundações. Impactos sócio-ambientais. Técnicas de previsão

ABSTRACT

The present work has the general objective of analyzing the Uruguay river floods in the city of Itaqui, RS, using fluviometric data from upstream stations in the municipalities of Porto Xavier, Garruchos, São Borja, and Itaqui itself, based in 2014 data, in order to propose a simplified relationship that can be used as a forecast model. For this, the main hydraulic and hydrological variables involved in the process were investigated in the literature, being made a preliminary analysis of the feasibility of applying a model based on the analogy with electric variables. In this sense, hydrograph profiles of fluviometric heights obtained through the National Water Agency and the Argentine Navy were elaborated and analyzed, comparing the parameters height, width, area and time of wave propagation profiles. Thus, we attempted to equate an empirical correlation of exponential decay of the heights of the flood spikes between Garruchos and Itaqui, in analogy to the model of damping waves in RLC circuits. The coefficient of determination $R^2 = 1$, for the exponential decay function obtained by correlation, showing a good fit, was interpreted as a favorable indicator for the application of the electric analog model. In this way, the work can contribute to the forecasting, planning and strategies of public or private agents for the elaboration of means of prevention to the impacts of the floods of the Uruguay river, also being able to contribute to further studies on this topic.

Keywords: Floods. Socio-environmental impacts. Forecasting techniques.

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A bacia hidrográfica do rio Uruguai possui área extensa de aproximadamente 384.000 km^2 dos quais 176.000 km^2 estão localizados no sul do Brasil e, destes, 130.000 km^2 localizam-se no estado do Rio Grande do Sul, na região oeste, o que corresponde a 2% do território nacional (Figura 1).

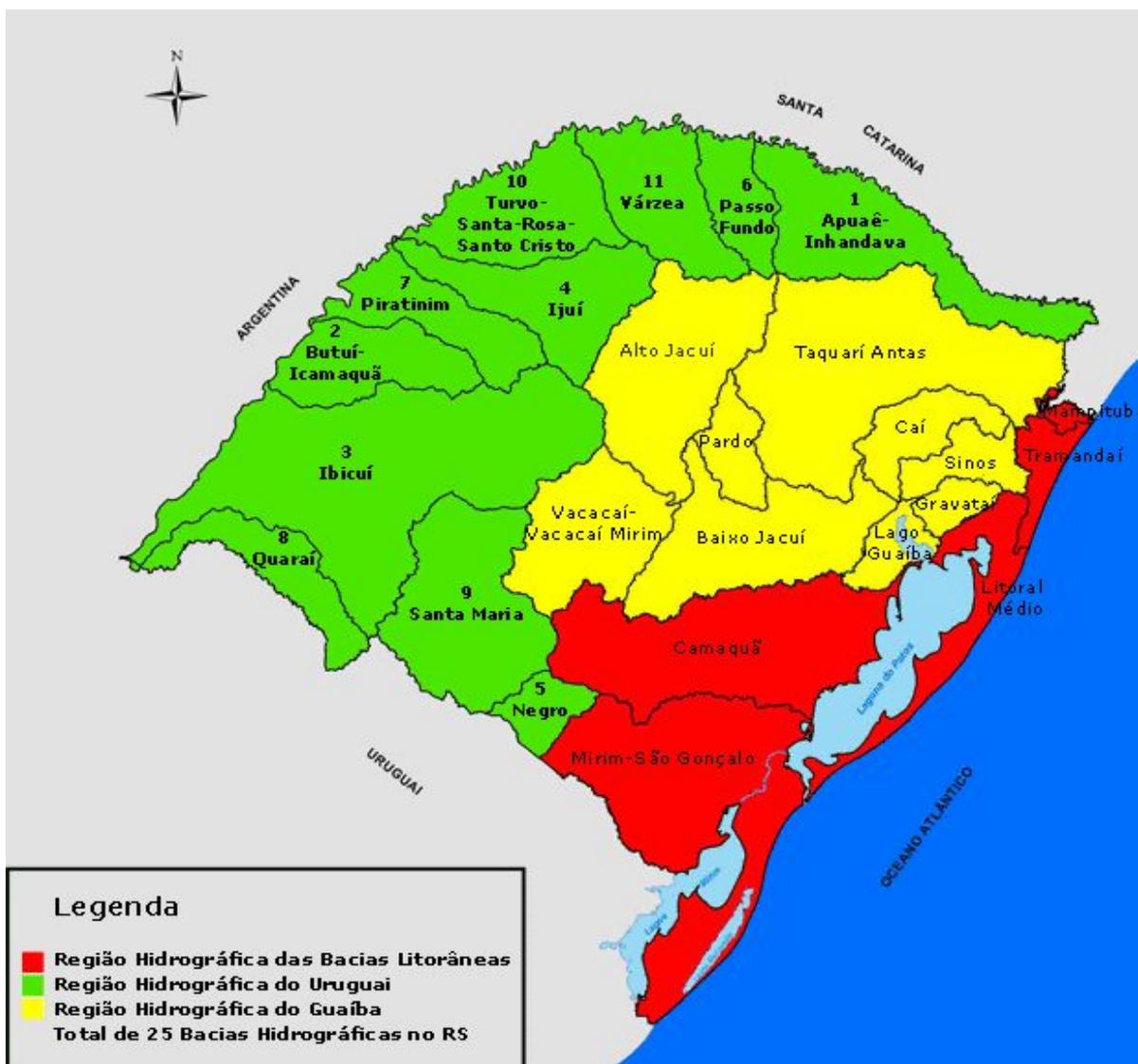


Figura 1- Mapa Hidrográfico da Bacia do rio Uruguai no Rio Grande do Sul

Fonte: <<http://www.proriouruguai.rs.gov.br/porta1/modelo.php?cont=nossasaguas>>

O rio Uruguai nasce da união com os rios Canoas e Pelotas na Serra Geral, na divisa entre os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, e deságua na foz do rio da Prata, entre a Argentina e o Brasil. Seus principais afluentes brasileiros são: rio do Peixe, rio Japocó, rio do Passo Fundo, rio da Várzea, rio Ijuí, rio Peperi-Guaçu, rio Ibicuí, rio Quaraí e

rio Negro, como mostra a Figura 1.

A elevada extensão da bacia do rio Uruguai apresenta intensa atividade agrícola, mercantil e industrial, sendo que o grande volume de águas que o rio comporta é favorável para o potencial hidrelétrico, o que motivou a instalação das usinas hidrelétricas de Machadinho, Itá, Foz do Chapecó e Binacional de Salto Grande (Uruguai).

As características de relevo plano e suavemente ondulado da região sudoeste e a localização dos centros urbanos às margens do rio Uruguai, como por exemplo, Porto Xavier, Garruchos, São Borja e Itaqui, têm amplificado os efeitos sócio-econômicos das inundações que surgem do acúmulo das precipitações na bacia de captação, formada por uma hierarquia de sub-bacias com sua correspondente rede de microbacias (LINO, 2017).

Com isso, as inundações do rio Uruguai têm estado relacionadas com diversas perdas materiais e humanas ao longo de décadas, sendo consideradas como fenômenos da natureza, cuja principal causa são as precipitações pluviométricas intensas e concentradas que, ao transbordar do leito dos rios, lagos, canais e áreas represadas, invadem outros ambientes. Isso ocorre, devido ao fato de a vazão da água excede a capacidade de escoamento do corpo hídrico alvo de estudo em um certo trecho (RIGHI & ROBAINA, 2010).

Segundo Pena et al. (2017) "A ocorrência das enchentes tem duas causas principais: as naturais e as antrópicas, pois trata-se de um fenômeno comum da natureza, mas que é intensificado pela ação humana." A agressão à natureza causada pelo desmatamento por falta de consciência ambiental, provoca uma quebra do ciclo natural da água, que quando alterado, pode trazer prejuízos para a sociedade, penalizando a habitação imprópria em áreas de várzea e propiciando problemas de saúde pública, assim como de prejuízo financeiro por destruição ou deterioramento de instalações, entre outros (SAURESSIG, 2012).

A vazão do Rio Uruguai nas hidrelétricas, em particular a de Foz do Chapecó, entre Águas de Chapecó e Alpestre, é um bom indicador dos efeitos das precipitações nas bacias de captação em Santa Catarina. Como as usinas são de fio d'água, não têm capacidade para acumular volumes expressivos. Portanto, quase toda a água que chega no lago formado pela barragem, é liberado pelo vertedouro ou na geração das turbinas. Na enchente de 2014 a vazão atingiu os 30000 m³/s, alimentando uma grande onda de inundação (FOZ DO CHAPECÓ ENERGIA S.A., 2018).

Por outro lado, o incremento da frequência de eventos extremos, associado com o aumento das temperaturas médias e suas consequências no ciclo da água, no atual contexto de mudanças climáticas regionais e globais, tem estimulado a demanda por sistemas de

predições de inundações, incrementando a necessidade de modelos de predição locais confiáveis (HUNTER et al., 2007; KNEBL et al., 2005).

Grandes progressos têm acontecido na área de modelagem de inundações devido ao advento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), estimativas de precipitação por radar, e modelos digitais de elevação (DEM) de alta resolução. No entanto, o tempo requerido para processar as informações e convertê-las num mapa de inundação é crítico na maioria das aplicações para permitir alta eficiência na predição (KNEBL et al, 2005).

A modelagem de fenômenos hidráulicos-hídricos envolve uma matemática relativamente mais complexa, composta por equações diferenciais que descrevem o escoamento de fluidos. Segundo a Wikipedia, as equações que regem o comportamento do movimento dos fluidos começaram a ser deduzidas de forma sistemática a partir do século XVIII. Leonard Euler (1707-1783) foi considerado o responsável pela formulação matemática do escoamento de fluidos invíscidos, com a dedução das chamadas equações de Euler. Porém, a representação matemática do comportamento dos fluidos somente ganhou força a partir do século XIX, graças aos estudos dos franceses Claude Navier (1785-1836) e Simeon Poisson (1781-1840), que em 1827 e em 1831, introduziram nas equações de Euler, os efeitos da viscosidade, analisando as forças intermoleculares em um escoamento de fluido. Em 1843, estas equações foram re-deduzidas pelo francês Barre de Saint-Venant (1797-1886) e em 1845, pelo inglês George Stokes (1819-1903), que, avaliando macroscopicamente o movimento do fluido e as forças que lhe dão origem, introduziram pela primeira vez, o conceito de tensão de cisalhamento como uma função linear da taxa de deformação bem como o conceito de pressão termodinâmica num ponto qualquer do escoamento como sendo igual à média aritmética das tensões normais agindo naquele ponto. Assim obtiveram as equações vetoriais para a conservação da quantidade de movimento, conhecidas hoje como as Equações de Navier-Stokes. Em um canal com fluxo de água em regime não permanente tanto as velocidades como as alturas mudam com o tempo e com o espaço. Baseado no teorema de transporte de Reynolds aplicado a um volume de controle é possível obter duas equações diferenciais parciais de segunda ordem, hiperbólicas, que descrevem o movimento da água no canal em estado transiente, estas equações são chamadas de equações de Saint-Venant. A dificuldade de encontrar soluções analíticas para as equações de Navier-Stokes ou Saint-Venant decorre do fato que são equações diferenciais parciais não-lineares, e a teoria matemática dessa classe de equações ainda não está suficientemente desenvolvida para permitir a obtenção de soluções analíticas em regiões

arbitrárias e condições de contornos gerais. Por essa razão é que, no estudo do movimento de fluidos e de seus efeitos, se utilizam ensaios experimentais, como testes em túneis de vento, tanques d'água ou medições em estações fluviométricas. Devido às limitações de custo, tempo e equipamento, é comum a realização de medidas em apenas alguns pontos da região em que ocorrem os fenômenos de interesse. Por exemplo, a pressão e as velocidades do escoamento sobre a fuselagem de um avião são determinadas apenas em alguns pontos, e o mesmo acontece para um curso de água. No entanto, nem sempre os tratamentos teóricos ou experimentais são satisfatórios (CENEDESE, 2005).

Por outro lado, tem sido questionado até que ponto as atuais técnicas de medição hidrométricas disponíveis geram suficiente informação para permitir a convergência dos modelos a soluções satisfatórias (HUNTER et al., 2007). Em outras palavras, a complexidade de implementação dos atuais modelos hidrológicos-hidráulicos, e a qualidade das informações necessárias para alimentar os mesmos têm impactado a utilidade prática dos modelos na previsão de inundações em nível local.

Neste cenário, o estudo de modelos simples que possam ter um caráter preditivo de razoável precisão, com base em dados prontamente disponíveis que permitam previsões rápidas com tempo de antecedência suficiente para executar ações de evacuação ou prevenção, aparece como uma alternativa interessante.

Dentro deste panorama, o presente trabalho tem como objetivo fazer uma abordagem teórico-prática, analisando as principais variáveis envolvidas nas inundações ocorridas na cidade de Itaqui, RS, e sua relação com os hidrogramas de cotas prontamente disponíveis na Internet, correspondentes ao posto fluviométrico existente na cidade e os correspondentes a municípios a montante. Para isso foram analisados através de pesquisa bibliográfica, dentro do tempo disponível para este trabalho, os principais modelos existentes, seus princípios físicos e os aspectos conceituais e práticos das variáveis utilizadas, com foco na utilização dos hidrogramas de cotas das estações fluviométricas da região. Para este trabalho, foram analisados os hidrogramas de cotas das inundações registradas em 2014, com consulta de apoio a dados de outras enchentes, como a de 1983 que apresentou as máximas cotas registradas até o momento.

Com base nas análises realizadas, foi fundamentada a possível utilização de um modelo de análogo elétrico para previsão das cotas em Itaqui, além de propor um modelo empírico simplificado de ajuste aos dados da enchente de 2014, que pode ser usado para previsão aproximada das cotas.

Desta forma, o presente trabalho foi elaborado a fim de estabelecer relações simples que permitam a previsão das cotas do rio Uruguai na cidade de Itaqui a partir de um mínimo conjunto de variáveis de entrada, com o intuito de colaborar para o planejamento de estratégias para a prevenção de impactos catastróficos.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O levantamento de informações teóricas gerais e específicas referentes a ocorrência das inundações do rio Uruguai no município de Itaqui e adjacentes foi embasado em trabalhos técnicos tais como a dissertação de mestrado de Saueressig (2012), a qual realizou o levantamento dos dados entre os anos 1980 a 2010, visando estabelecer o zoneamento das áreas de risco a inundação da área urbana do município de Itaqui-RS, localizado às margens do rio Uruguai na região oeste do RS. Também importante foi o trabalho de Righi & Robaina (2010), o que realizaram um levantamento da ocorrência de enchentes nos municípios que margeiam o rio Uruguai no estado do Rio Grande do Sul no período compreendido entre 1980 a 2005. Um trabalho recente de Lino et al. (2017) forneceu dados morfométricos e climatológicos das sub-bacias hidrográficas analisadas, sendo importante na elaboração de critérios de seleção e simplificação de variáveis. No referente à modelagem das enchentes por modelos hidráulico-hidrológicos, a revisão de Hunter et al. (2007), Collier (2007), a revisão de trabalho de doutorado de Santos (2009) e as aplicações de Knebl (2005), assim como textos clássicos (COLLISCHONN & TASSI, 2008; TASSI & COLLISCHONN (2018); TUCCI (2005), permitiram elaborar a discussão sobre a importância das variáveis citadas e sua inclusão ou simplificação no modelo proposto. Finalmente, a análise do modelo hidrológico com análogo elétrico foi baseada no trabalho isolado de Collier (1998), e em textos ou artigos que trabalham as equações clássicas da eletricidade nos circuitos RC e RLC.

Referente a análise de cotas do rio Uruguai foram utilizados os dados históricos da Agência Nacional de Águas (ANA) medidos em estações brasileiras assim como os dados medidos e gerenciados pela prefeitura naval da Argentina (PNA, 2018). Em situação de enchente as informações da Argentina são atualizadas cada 3 hs, permitindo um bom detalhamento dos hidrogramas.

Nas seções seguintes serão melhor detalhados estes procedimentos.

2.1. Área de estudo e estações de monitoramento

A Figura 2 apresenta a extensão da bacia hidrográfica do rio Uruguai, bem como as sub-bacias hidrográficas e os exutórios - pontos de saída da vazão coletada pela bacia durante uma precipitação. As regiões abrangidas por este estudo compreendem unidades hidrográficas que formam parte das sub-bacias 74 e 75.

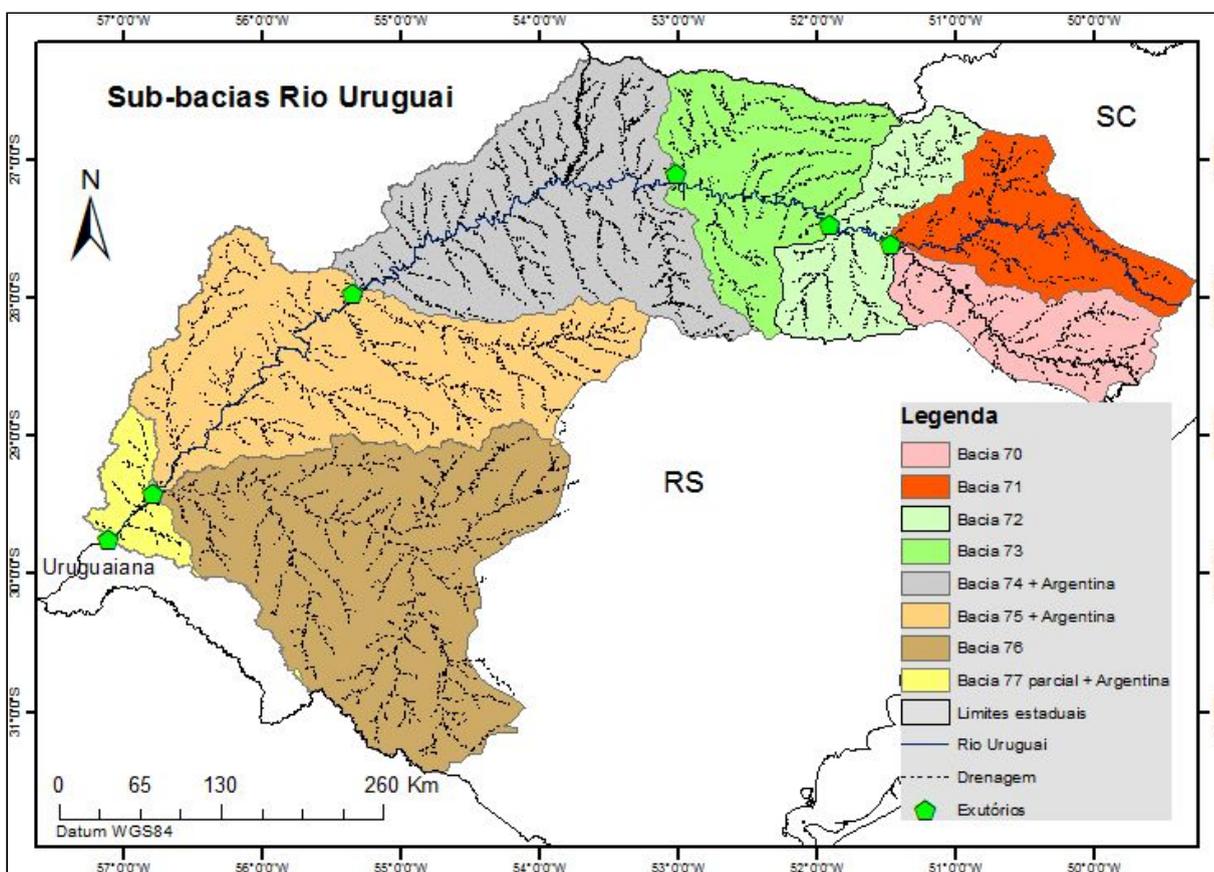


Figura 2 - Extensão da bacia hidrográfica do rio Uruguai e divisão das sub-bacias segundo a Agência Nacional de Águas. Incluem-se as porções das sub-bacias em território argentino. Fonte: Lino et al. (2017)

A Tabela 1 apresenta estações fluviométricas consultadas no trabalho para a coleta de dados hidrométricos.

Tabela 1- Estações fluviométricas do rio Uruguai consultadas (ANA, 2009)

Código	Estação-Município	Latitude	Longitude	Operadora	País
74830000	San Javier	-27 53 00	-55 08 00	DNCPVN-564	Argentina
75550000	Garruchos	-28,182222	-55,643333	ANA-CPRM	Brasil
75550001	Garruchos	-28 10 00	-55 39 00	Eletrosul	Brasil
75550002	Garruchos Jusante	-28 12 00	-55 42 00	Eletrosul	Brasil
75550100	Garabi	-28 13 00	-55 43 00	Brasil	Eletrosul
75550103	Garruchos	-28 11 00	-55 39 00	DNCPVN	Argentina
75770000	Santo Tomé	-28 33 00	-56 02 00	DNCPVN-580	Argentina
75780000	Passo São Borja	- 28 39 59.04	-55 58 46.92	ANA-CPRM	Brasil
75890000	Alvear	-29 06 00	-56 33 00	DNCPVN-582	Argentina
75900000	Itaqui	- 29 07 39	- 56 33 45	ANA-CPRM	Brasil
75900001	Itaqui	-29 08 00	-56 33 00	Eletrosul	Brasil
77140000	Paso De Los Libres	-29 43 00	-57 05 00	DNCPVN-599	Argentina
77150000	Uruguaiana	-29 44 53	-57 05 22	ANA-CPRM	Brasil
77150001	Uruguaiana	-29 45 00	-57 04 00	Eletrosul	Brasil

Fonte: os autores

Observa-se que as sub-bacias do rio Uruguai encontram-se tanto em território brasileiro quanto argentino, abrangendo, no Brasil, os estados de Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

No Rio Grande do Sul, as diferentes unidades hidrográficas e suas denominações estão representados na Figura 3.

As bacias mencionadas foram analisadas geograficamente para sustentar a seleção de um conjunto mínimo de variáveis para a proposta de um modelo de previsão local de altura de cota em Itaqui, RS.

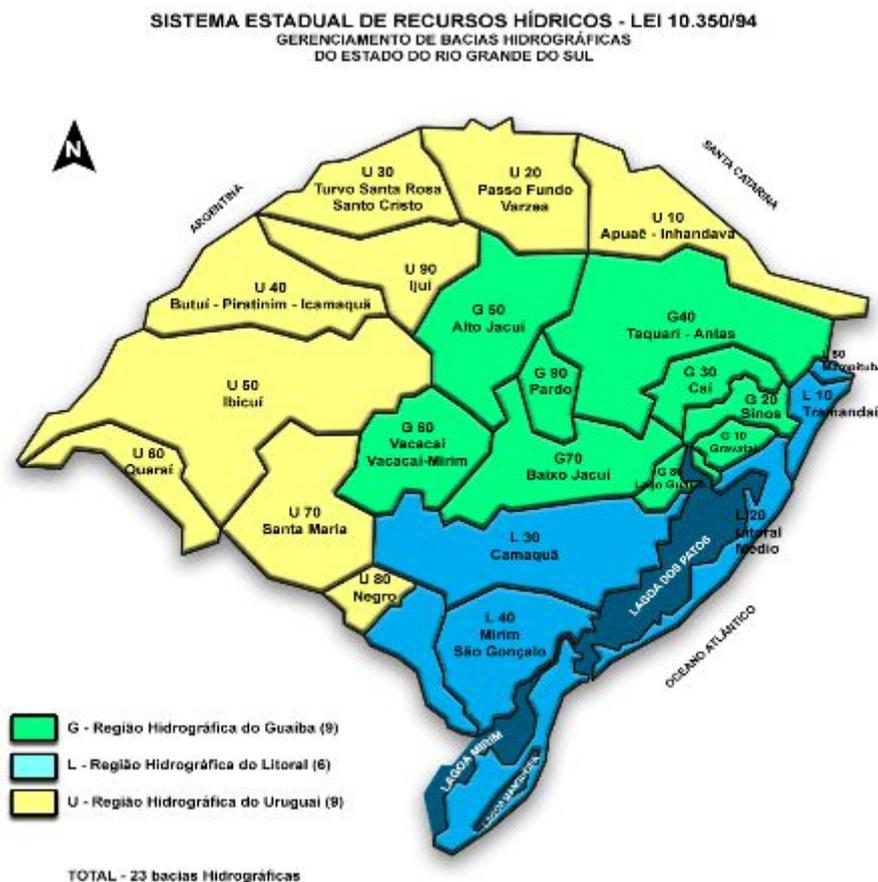


Figura 3. Sub-bacias hidrográficas de acordo com a denominação estadual
 Fonte: <http://riograndedosul-rs.blogspot.com/2010/08/bacias-hidrograficas.html>

2.2. Procedimentos de análise de dados

Para a análise dos dados fluviométricos foram elaboradas tabelas e gráficos a fim de estabelecer uma relação funcional entre os níveis hidrométricos do rio Uruguai para o município de Itaqui e os de municípios situados a montante, com o auxílio de programas de planilha eletrônica. Mediante estes programas foi possível analisar diferentes modelos empíricos de correlação que se adaptassem à situação sob estudo. O ajuste dos modelos foi avaliado mediante o coeficiente de determinação (R^2).

Para a fundamentação dos modelos utilizados foram considerados os conceitos de amortecimento de ondas elétricas. A relação estabelecida entre os níveis fluviométricos (cotas) entre diferentes estações do rio Uruguai foi fundamentada nos modelos de amortecimento de ondas, conforme explicado posteriormente.

2.3. Modelagem de inundações

Segundo Paes & Brandão (2007), modelagens são aproximações dos fenômenos existentes na realidade de um sistema, havendo continuamente a possibilidade da incerteza.

Uma revisão sobre a modelagem de processos de inundação pode ser encontrada em Hunter et al. (2007). O artigo reconhece que os atuais modelos apresentam problemas em termos de carga computacional, adequação dos modelos às condições locais, preparação dos dados de entrada, adequação dos resultados aos objetivos do usuário final. Afirma que o objetivo de produzir modelos “o mais realísticos que possível” deve ser balanceado com a necessidade de controlar os problemas anteriormente mencionados, procurando modelos confiáveis, razoáveis em termos de gasto computacional e volume de dados de entrada, e capazes de gerar a informação hidráulica desejada num formato e nível de detalhe apropriados. A partir do artigo de revisão mencionado, que analisa modelos de complexidade reduzida, foi possível identificar as principais variáveis envolvidas nos mesmos e fundamentar as hipóteses para o modelo simplificado proposto neste trabalho.

2.3.1. Dimensões e variáveis da modelagem de inundações

O domínio espacial no qual acontece o fluxo de água pode ser analisado em uma, duas ou três dimensões, incluindo assim processos como turbulências ou diferentes tipos de distribuições de velocidades. O escoamento da água sobre o solo é um processo distribuído, porque o caudal, velocidade e altura da lâmina de água variam no tempo e no espaço.

O cálculo destas variáveis pode ser efetuado através das equações de Saint-Venant. Estas são equações diferenciais a derivadas parciais, que permitem o cálculo do caudal e da altura da lâmina de água como funções do tempo e do espaço. Para analisar as possibilidades de simplificação, foram consideradas como base as equações de Saint-Venant (Equação 1; HUNTER, 2007), expressas em função da velocidade média da seção, μ , cuja versão em duas dimensões é:

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + \mu \frac{\partial \mu}{\partial x} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f - S_0 \right) \quad \text{(Equação 1)}$$

(i) (ii) (iii) (iv) (v)

μ : velocidade média da seção do rio.

t: tempo;

x: coordenada longitudinal do canal;
g: aceleração da gravidade;
h: altura, coordenada vertical;
 ∂ : variação, derivada parcial

Onde,

(i) representa a aceleração local e descreve a variação da quantidade de movimento da água devida à variação da velocidade em função do tempo;

(ii) representa a aceleração convectiva e descreve a variação da quantidade de movimento ao longo do canal, em função da posição;

(iii) representa as diferenças das pressões hidrostáticas resultantes em diferentes profundidades do canal;

(iv) representa a ação do atrito com as margens e o fundo do canal;

(v) representa a ação da gravidade e é proporcional ao declive do fundo do canal.

A simplificação do modelo foi analisada e discutida com base na referida equação, que, segundo Simões et al. (2011), “O equacionamento geral compõe um sistema de equações diferenciais parciais do tipo hiperbólico e não linear (em ambos os casos, unidimensional e bidimensional)”.

2.4. Hidrogramas

O hidrograma é a representação gráfica da variação da vazão (Q) ao longo do tempo (minutos, horas, dias). Em pontos com seção conhecida, ele pode ser analisado em função da cota do rio (h), pois a relação funcional entre vazão e cota (curva chave) é conhecida naquele ponto. A forma do hidrograma revela características tanto da precipitação quanto da bacia hidrográfica e os processos de circulação de água acontecidos. Durante este trabalho os hidrogramas foram analisados seguindo os conceitos e metodologias descritos em Collischonn & Tassi (2008).

2.5. Modelagem do Amortecimento de Ondas usando o símil elétrico

Para considerações de modelagem hidrológica utilizando a analogia de um circuito elétrico foi considerado o trabalho de Collier (1998). O modelo é baseado na semelhança do

comportamento de um circuito hidráulico-hidrológico (trecho de um rio) e de um circuito elétrico. Segundo esta analogia, as variáveis ou parâmetros hidráulico-hidrológicos podem ser associadas com a resistência, a capacitância e a indutância de um circuito elétrico RLC, como aparece na Figura 4. Assim, temos:

- a voltagem representa o volume de precipitação
- a corrente representa a vazão;
- a resistência está relacionada com a oposição à passagem da água pela superfície,
- a capacitância representa o armazenamento (carga) produzido pela chuva, águas subterrâneas, nascentes, afluentes, ou a perda de água (descarga) por retenção pela vegetação, evapotranspiração, inundação, entre o corpo de água e o ambiente.
- a indutância representa efeitos de turbulência que utilizam parte da energia e modificam o perfil de velocidades da água.

Estabelece-se assim uma analogia entre os termos das equações de Saint-Venant e os das equações elétricas.

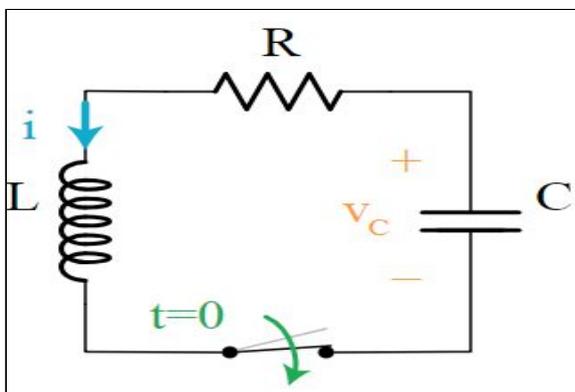


Figura 4. Modelo de circuito RLC

Fonte: <https://pt.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-circuit-analysis-topic/ee-natural-and-forced-response/a/ee-rlc-natural-response-variations>

2.5.1. Circuito RLC

As seguintes descrições podem ser encontradas em textos tradicionais de física, e foram extraídas da Internet³. Uma analogia razoável pode ser traçada entre as oscilações RLC subamortecidas de um circuito elétrico e as acontecidas no circuito hidráulico.

³ Link: https://courses.physics.ucsd.edu/2015/Summer/physics2cl/documents/Phys2CL_Exp2_2010.pdf

Sinteticamente, tanto nas ondas elétricas (circuito RLC subamortecido) quanto nas hidráulicas observa-se que a amplitude da onda, representada pela máxima variação de cota, decresce com o avanço da onda, sendo o fator $e^{-t/2\tau}$ o responsável por isso (Figura 5).

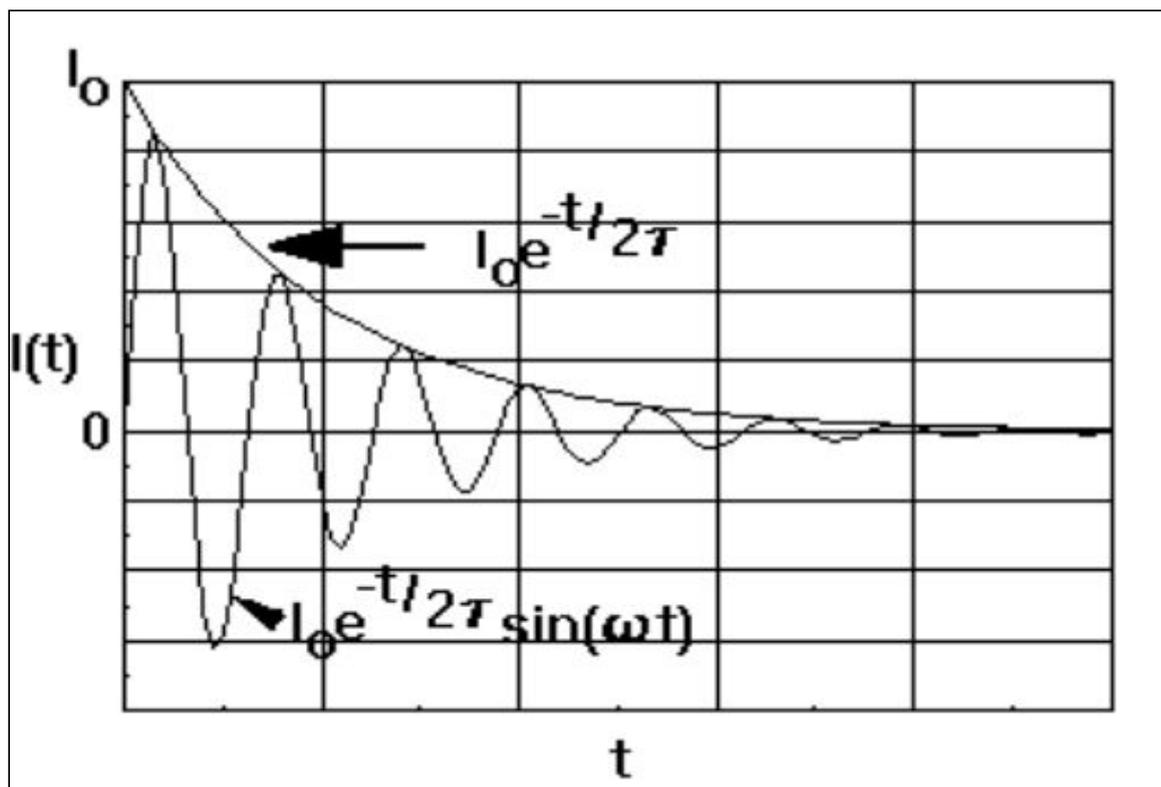


Figura 5 - Gráfico de Oscilações subamortecidas em circuito RLC, com curva envolvente exponencial. A amplitude máxima (I_0) é amortecida pelo fator exponencial ($e^{-t/RC}$) diminuindo assim a amplitude da onda representada no tempo pela função $\sin(\omega t)$, onde ω (frequência angular) está relacionado com a largura do pico, que pode aumentar no tempo.

Fonte:

<https://pt.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-circuit-analysis-topic/ee-natural-and-forced-response/a/ee-rlc-natural-response-variations>

Outro elemento perceptível na analogia é que a frequência da onda, representada pela inversa da largura do pico, também muda.

Um parâmetro importante do circuito elétrico (ou hidráulico), que pode ser usado na modelagem, é o tempo de decaimento, definido como o tempo em que a amplitude da onda decai num fator e^{-1} , corresponde a $t = 2\tau$, onde

$$\tau = L/R \quad (\text{Equação 2})$$

Para o circuito RLC, durante o processo de descarga (após as precipitações no análogo hidráulico), as equações que descrevem o comportamento das variáveis do circuito⁴ são apresentadas nas equações 3 e 4:

$$L \frac{d^2i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = 0 \quad (\text{Equação: 3})$$

$$i = K_1 e^{s_1 t} + K_2 e^{s_2 t} \quad (\text{Equação: 4})$$

Onde

i: intensidade de corrente (vazão);

d: variação, derivada parcial

t: tempo

L: indutância

R: resistência

C: capacitância

A fim de estabelecer uma solução para o circuito RLC procede-se à solução da equação característica (Equações 5, 6 e 7). Por tratar-se de sistemas de 2ª ordem, pois possuem dois elementos armazenadores de energia (indutor e capacitor), as equações ficam de 2ª ordem, e dependem do valor do discriminante delta da equação de segundo grau, a qual pode ser resolvida pela fórmula de Baskara.

$$s^2 + \frac{R}{L} s + \frac{1}{LC} = 0 \quad (\text{Equação: 5})$$

Onde,

S: variável da derivada da intensidade de corrente

L: indutância

R: resistência

C: capacitância

$$s = \frac{-R \pm \sqrt{R^2 - 4L/C}}{2L} \quad (\text{Equação: 6})$$

Determinante da equação: $R^2 - 4L/C$

Para a discussão do discriminante é interessante utilizar novas variáveis:

⁴ Link:

<https://www.york.cuny.edu/academics/departments/earth-and-physical-sciences/physics-lab-manuals/physics-ii/time-constant-of-an-rc-circuit>

$$s = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \quad (\text{Equação: 7a})$$

Onde,

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (\text{Equação 7b})$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{Equação 7c})$$

Finalmente, dependendo do sinal do discriminante $\alpha^2 - \omega^2$, a Tabela 2 apresenta as possibilidades de soluções para o circuito RLC.

Tabela 2: Interpretação de possíveis soluções.

Relação	Sinal de $\alpha^2 - \omega^2$	Denominação	Ai(t)
$\alpha > \omega_0$	+	amortecimento supercrítico	2 exponenciais decrescentes
$\alpha = \omega_0$	0	amortecimento crítico	t . exponencial decrescente
$\alpha < \omega_0$	-	amortecimento subcrítico	seno de amplitude decrescente

Fonte: Os autores

2.5.2. Circuito RC

Também é interessante considerar as equações de um circuito RC, que são uma simplificação do caso anterior. Neste circuito, utiliza-se somente um resistor e um capacitor, que representam uma situação simplificada de carga (chuva, captação de água da bacia pelo canal do rio) ou descarga (perdas por atrito, saídas e inundações laterais, vegetação, evaporação).

Processo de descarga:

$$V_C - V_R = 0 \quad (\text{Equação 8})$$

Onde,

V: voltagem

C: capacitor

R: resistor

Utilizando a lei de ohm para o resistor ($V=R.I$), e a relação de voltagem do capacitor ($V_C=q/C$), e considerando a definição de intensidade de corrente como a derivada ou diferencial em função do tempo da carga ($I=dq/dt$), substituindo na Equação 8, temos:

$$-\frac{dq(t)}{dt} - \frac{q(t)}{RC} = 0 \quad (\text{Equação 9})$$

d: variação tempo

q: constante

t: tempo

R: resistência

C: capacitância

Cuja solução analítica é:

$$V_C(t) = V_R(t) = V_S e^{-t/RC} \quad (\text{Equação 10})$$

Durante o processo de carga temos as Equações 11 e 12:

$$V_C - V_R - V_C = 0 \quad (\text{Equação 11})$$

$$V_S - IR - \frac{q}{C} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde $I = dq/dt$ nos leva às equações 13 e 14:

$$V_C - \frac{dq(t)}{dt} R - \frac{q(t)}{C} = 0 \quad (\text{Equação 13})$$

$$\frac{dq(t)}{dt} + \frac{q(t)}{RC} = \frac{V_S}{R} \quad (\text{Equação 14})$$

Cuja solução, para condição inicial com o capacitor totalmente descarregado são as Equações 15 e 16:

$$V_C(t) = V_S(1 - e^{-t/(RC)}) \quad (\text{Equação 15})$$

$$V_R(t) = V_S e^{-t/(RC)} \quad (\text{Equação 16})$$

É interessante relacionar também o valor do decaimento com o chamado tempo de vida média, tempo no qual a amplitude da onda cai para a metade, Equações 17, 18 e 19:

$$\frac{V_S}{2} = V_S e^{T_{1/2}/(RC)} \quad (\text{Equação 17})$$

$$\ln \frac{1}{2} = - \frac{T_{1/2}}{RC} \quad (\text{Equação 18})$$

$$T_{1/2} = RC \ln 2 \quad (\text{Equação 19})$$

O gráfico de carga e descarga, que pode ser visto no osciloscópio para ondas quadradas, fica representado na Figura 6, onde, a constante de tempo de um circuito RC é o intervalo de tempo necessário tanto para a carga do capacitor e resistor R até a carga total

quanto para a descarga.

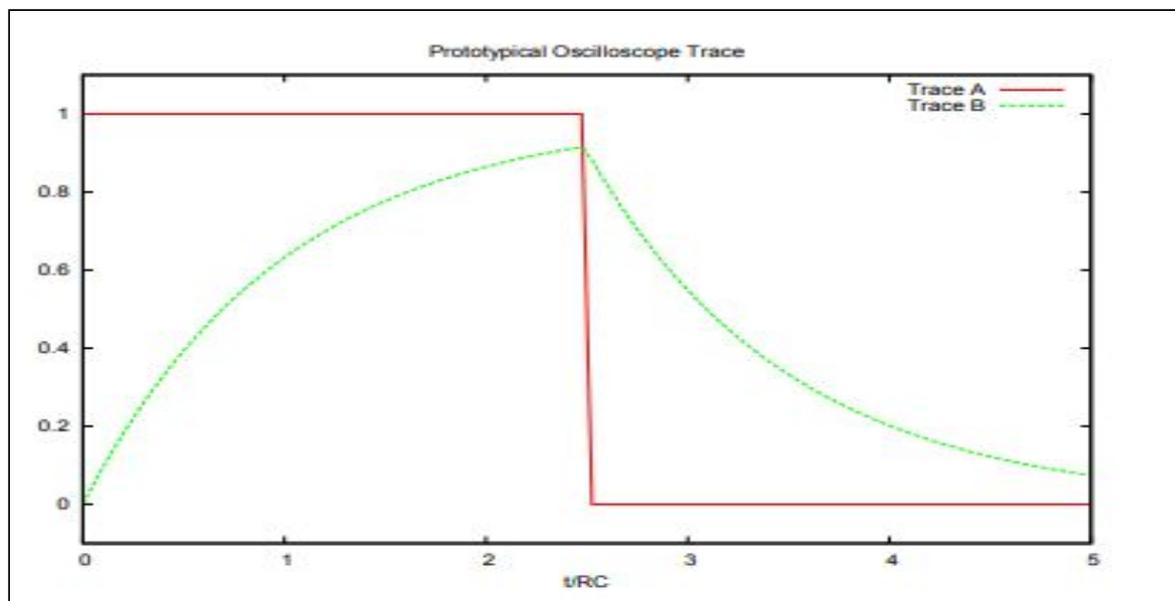


Figura 6 - Gráfico de carga e descarga do capacitor (Voltagem ou carga vs tempo)

Fonte: <https://pt.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-circuit-analysis-topic/ee-natural-and-forced-response/a/ee-rc-natural-response-variations>

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DO CONJUNTO DE VARIÁVEIS UTILIZADAS NA MODELAGEM E OS RESULTADOS

Com base nos estudos bibliográficos mencionados, realizou-se a discussão sobre o conjunto mínimo de variáveis a serem utilizadas na modelagem. Posteriormente procurou-se conceitualizar e achar os parâmetros do modelo de análogo elétrico para a região sob estudo.

3.1. Influência das características das bacias hidrográficas

A morfometria da bacia (forma, declividade, comprimento e características da rede de drenagem, grau de ramificação) assim como as características de uso e cobertura do solo tem grande influência no comportamento do hidrograma e na determinação das principais variáveis que representam os fenômenos hidrológicos. Procedemos, então, à descrição das bacias envolvidas neste trabalho, a partir das Figuras 1, 2 e 3 e informações correlatas.

3.1.1. Influência da grande bacia

Analisando seu trajeto, podemos identificar as principais variáveis que influenciam a vazão do rio Uruguai: captação de água de chuva pelas sub-bacias hidrográficas, influência da vazão de saída de reservatórios de centrais hidroelétricas, características do canal (rugosidade, sinuosidade), forma e parâmetros morfométricos da sub-bacia, comprimento da rede de drenagem da sub-bacia, declividade do canal.

Todos estes fatores devem estar representados em uma modelagem detalhada da bacia.

Mas o objetivo deste trabalho é a utilização de um modelo simplificado para aplicação no caso da previsão de enchentes em Itaqui, RS. Por esse motivo, a análise estará focada em minimizar o número possível de variáveis.

Nesse sentido, é possível concluir que a informação contida no hidrograma de uma estação do rio Uruguai inclui o efeito de todas as variáveis a montante da mesma. Será suficiente então selecionar as estações mais próximas a montante de Itaqui cujos hidrogramas mantenham uma relação forte com o hidrograma da estação Itaqui, e permitam um tempo razoável de previsão.

3.1.2. Sub-bacias escolhidas para o modelo

As sub-bacias e municípios considerados neste trabalho são os que, encontrando-se a montante da cidade de Itaqui, possuem estações fluviométricas (Figura 7), e permitem, pela sua distância, um tempo de previsão maior de 3 dias, considerado adequado para a execução de providências tais como mudanças de moradores das áreas afetadas.

As cotas e correspondentes vazões registradas nas referidas estações foram consideradas dentro do conjunto inicial de variáveis de análise para o modelo de previsão.

Dentre as sub-bacias analisadas para o rio Uruguai, estabeleceu-se que o conjunto mínimo a ser considerado para o modelo local compreende as bacias que serão descritas a continuação.

A bacia hidrográfica (U030) dos rios Turvo - Santa Rosa - Santo Cristo situa-se a norte-noroeste do estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 27°07' a 28°13' de latitude Sul e 53°24' a 55°20' de longitude oeste. Abrange a província geomorfológica planalto meridional. Possui área de 11.056,23 km², abrangendo municípios como Horizontina, Ijuí, Porto Xavier, Santa Rosa, Santo Ângelo e Três de Maio, com população estimada em 371.199 habitantes. Os principais cursos de água são os rios Turvo, Santa Rosa, Santo Cristo, Amandaú e Comandai. Nesta bacia se encontram as estações fluviométricas de Porto Xavier (Brasil, ANA) e San Javier (Argentina, Prefectura Naval), indicadas na Tabela 1. As características mais impermeáveis da bacia e sua forma mais uniforme fazem que apresente um hidrograma rápido com menor tempo de concentração, que foi escolhido como ponto de início do modelo, servindo de alerta ao início de uma onda de enchente.

A bacia hidrográfica do rio Ijuí (U090) situa-se a norte-noroeste do estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 28°00' a 29°05' de latitude Sul e 53°11' a 55°21' de longitude oeste. Abrange a província geomorfológica planalto meridional. Possui área de 10.703,78 km², abrangendo municípios como Cruz Alta, Ijuí, Santo Ângelo, Tupanciretã, e uma parte de Porto Xavier, com população estimada em 341.569 habitantes. Os principais cursos de água são os rios Caxambu, Potiribu, Conceição, Ijuizinho e o rio Ijuí. Os principais usos da água se destinam a irrigação e ao abastecimento público (SEMA,

2018). A importância desta bacia é que alimenta o pulso de enchente criado na bacia anterior, aumentando o volume de água contido no mesmo, o que pode ser analisado na comparação entre hidrogramas, como será feito posteriormente.

A bacia hidrográfica do rio Piratinim (U040) situa-se a noroeste do estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 28°00' a 29°05' de latitude sul e 54°05' a 56°00' de longitude oeste. Abrange a província geomorfológica planalto meridional. Possui área de 7.596,07 km², abrangendo municípios como Bossoroca, Santo Antônio das Missões, São Luís Gonzaga, São Miguel das Missões e Garruchos, com população estimada em 70.639 habitantes. Os principais cursos de água são os arroios Inhacapetum, Itu, Chuní, Ximbocú e o rio Piratinim. Os principais usos da água se destinam a irrigação, dessedentação animal e abastecimento humano. Pode ocorrer insuficiência hídrica nos meses de baixa vazão, principalmente no verão. As estações fluviométricas brasileira e argentina de Garruchos se encontram nesta sub-bacia, medindo assim a vazão criada pelas precipitações na própria bacia, além da acumulada no rio nas bacias anteriores.

A bacia hidrográfica dos rios Butuí-Icamaquã (U110) situa-se a nordeste do estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 28°30' a 29°15' de latitude sul e 54°40' a 56°30' de longitude oeste. Abrange a província geomorfológica planalto meridional. Possui área de 8.144,81 km², abrangendo municípios como Itacurubi, Itaqui e São Borja, com população estimada em 74.656 habitantes. Os principais cursos d'água são os arroios Iquariçu, Piauí, Cabijú e os rios Butuí, Butuí-Mirim, Itacurumbi e Icamaquã. Os principais usos da água na bacia se destinam a dessedentação animal, abastecimento humano e irrigação. A declividade média nesta bacia e no canal do rio Uruguai é menor que nas bacias anteriores, diminuindo assim a velocidade da água e aumentando a retenção da mesma pela vegetação e pelas áreas de várzea e inundação. Segundo Saueressig (2012), "o município de Itaqui localiza-se em uma região de relevo de coxilhas e predominantemente de planícies de inundação", onde se encontra a área urbana, bordejando o curso d'água, a qual recebe parte dos transbordamentos provenientes do acúmulo dos níveis pluviométricos dos afluentes, represas hidrelétricas, barragens e córregos a montante."

Essas características permitem um período de aproximadamente 3 dias para a movimentação de pulsos de enchente entre São Borja e Itaqui, sem tendência a aumento da

vazão.

Observam-se também nesta bacia vários trechos do rio com curvas de 90° (Figura 7b), produzindo assim maior atrito e turbulência que tem o efeito de achatá-lo e alargá-lo as ondas de enchente.



Figura 7a - Municípios com estações fluviométricas cujos dados foram selecionados para alimentar o modelo de previsão

Fonte: Os autores. Adaptado de Banco Atlas - Spring - INPE.

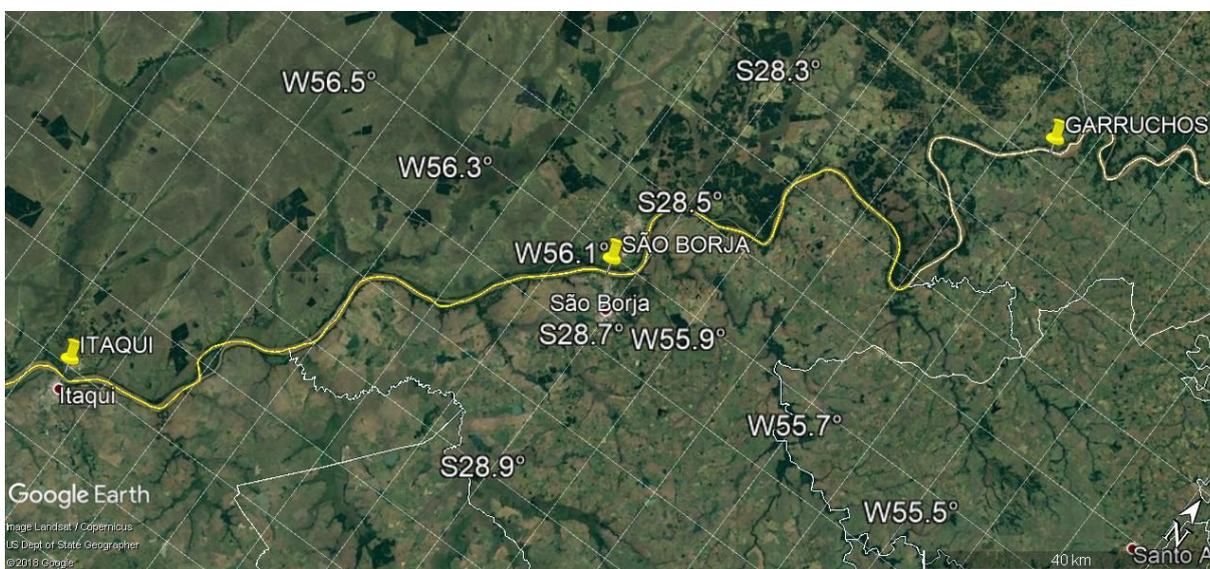


Figura 7b. Carta-imagem do trecho do rio Uruguai entre Garruchos e Itaqui.

Fonte: Preparado e exportado do Google Earth pelos autores

Outras características relevantes das sub-bacias para este trabalho continuarão sendo discutidas nos próximos itens.

3.2 Variáveis Relacionadas à Climatologia da Região

Segundo Righi & Robaina (2010) "O clima da região hidrográfica do Uruguai é temperado, apresentando uma regular distribuição intra-anual de chuvas, porém com alguma elevação no período de maio a setembro, coincidindo com o inverno". Com isso, a precipitação média anual é de 1784 mm, com temperatura média anual variando entre 16 e 20°C, e evaporação, média anual de 1041 mm.

A climatologia do estado do Rio Grande do Sul considera-se que possui estações bem definidas pois acentua-se na região a atuação da massa polar Atlântica (continental e marítima) e a frente polar Atlântica, conhecida como frente fria devido a sua posição latitudinal em relação aos avanços das massas polares. A chegada da frente fria caracteriza eventos de formação de chuvas de intensidades variadas. As variações entre as bacias hidrográficas são de pequena magnitude podendo notar-se uma tendência aos índices de precipitações anuais crescentes no sentido norte/sul.

As sub-bacias estudadas apresentam amplitudes térmicas que variam de 0 °C no inverno até temperaturas que muitas vezes ultrapassam 30 °C nos dias quentes e úmidos no verão.

No entanto, a aceleração de mudanças climáticas nas passadas décadas, e as mudanças no uso do solo, notadamente na substituição da floresta amazônica por áreas de cultivo e pecuária, tem modificado a antiga dinâmica regional. Observa-se atualmente estações menos definidas, e o aumento da frequência de eventos de chuva intensos, que podem acontecer em qualquer época do ano. Massas quentes e úmidas provenientes do norte são agora mais presentes na região, e seu encontro com as frentes frias em qualquer época do ano tem aumentado a probabilidade de eventos de enchentes ou alagamentos.

Dessa maneira, a ocorrência das enchentes no rio Uruguai são reflexo das condições climáticas e seus efeitos sócio-econômicos são magnificados devido a localização, relevo e construção das cidades próximo ao leito do rio Uruguai.

3.3. Seleção de Variáveis para modelagem

3.3.1. Relação entre vazão e cota

Segundo Colischonn & Tassi (2008), a medição de vazão é um processo caro, o que

impede medições de vazão muito freqüentes. Normalmente a medição de vazão em rios exige uma equipe de técnicos qualificados e equipamentos como molinete, guincho e barcos. Em função disso, as medições de vazão são realizadas com o objetivo de determinar a relação entre o nível da água do rio em uma seção e a sua vazão. Esta relação entre o nível (ou cota) e a vazão é denominada a curva-chave de uma seção. Com a curva-chave é possível transformar medições diárias de cota, que são relativamente baratas, em medições diárias de vazão. Isto é o que acontece nos postos fluviométricos considerados, escolhidos em regiões do rio favoráveis para obter a relação entre vazão e cota. Como o presente trabalho tem o foco na previsão de enchentes e não na estimativa de vazões, é suficiente saber da existência de uma relação funcional monótona crescente entre vazão e cota, ou seja, quanto maior seja a cota maior será a vazão do rio. Desta forma, os hidrogramas serão construídos utilizando a variável cota e não vazão, devido à facilidade de obtenção da primeira variável.

3.3.2. Variáveis usadas na modelagem de enchentes

Em Hunter et al. (2007) pode ser encontrada uma revisão sobre modelos de inundações e as variáveis envolvidas. No trabalho de Knebl et al. (2005), foram usados volumes de precipitações a partir de dados de radar, espacializados em GIS, junto com dados de estações pluviométricas. Também foram calibrados parâmetros de modelos de infiltração, para saber o volume da chuva derivado para reservatórios subterrâneos; estes parâmetros dependem do tipo e características do uso do solo, que pode ser trabalhado em ambientes GIS em forma de classes de pixels que representam características uniformes, que são atribuídas por meio de mapas disponíveis em diferentes fontes.

Adicionalmente, os autores mencionados usaram a topografia da região para definir características do escoamento no canal, utilizando para isso Modelos de Elevação (DEM) disponíveis na internet (USGS, 2018).

Com relação a estas variáveis, o presente trabalho optou por explorar a dependência das mesmas com a cota das estações a montante. Como as cotas das estações a montante de Itaqui contém informações que guardam uma relação funcional com o volume de precipitações, e com a fração do mesmo que efetivamente participa do escoamento superficial, foi considerada a hipótese de que as dependências da cota em Itaqui com as variáveis anteriormente mencionadas estará representada na dependência das cotas das

estações anteriores. Caso esta hipótese se confirme como adequada, vários erros reportados nas informações tanto de estações pluviométricas, muito pontuais, quanto nos dados de radar, que dependem da calibração da refletividade em volume de chuva, não tem intervenção no presente trabalho. As dificuldades, tempo de processamento e incertezas associadas à caracterização dos pixels das sub-bacias envolvidas em termos de tipo e uso do solo também são eliminados desta forma. O uso das cotas das estações a montante como forma de avaliar o efeito da chuva e da infiltração permite assim eliminar a necessidade de processamento de grande número de informações e os erros envolvidos nas mesmas. Com relação à variável topográfica, sua importância reside na determinação da velocidade de escoamento no canal. No presente trabalho, a variável topográfica foi considerada através da velocidade das ondas de enchente, que pode ser calculada diretamente por meio dos hidrogramas dos postos fluviométricos, pois conhecemos a distância entre eles e o tempo necessário para a movimentação da onda.

Outras variáveis consideradas por Knebl et al. (2005) incluem as perdas prévias ao início do escoamento por interceptação da vegetação e armazenamento em depressões do terreno. Estes parâmetros também foram considerados importantes no caso do avanço das ondas de enchente pelo canal. A consideração dos mesmos no presente trabalho vem através da relação funcional que os mesmos guardam com o amortecimento das ondas de enchente. Também fica incluída na mesma relação funcional a variável evapotranspiração, que contribui para diminuir o efeito da água acumulada na bacia no escoamento superficial.

Coincidentemente, no trabalho de revisão de Hunter et al. (2006), afirma-se que a aplicação de modelos simplificados para representar a vazão em trechos de rios depende da definição de condições de contorno e parâmetros do modelo adaptados à região sob estudo. Nesse sentido, os modelos de inundação geralmente demandam três conjuntos chave de informações:

- (i) dados topográficos em forma de grade;
- (ii) uma estimativa da resistência ao fluxo em cada célula da grade;
- (iii) dados das entradas e saídas de vazão que descrevam as condições de contorno.

As condições de contorno foram avaliadas, no presente trabalho, através das cotas das estações a montante da cidade de Itaqui,

Posteriormente, na construção do análogo elétrico do trecho do rio considerado (continuação deste trabalho), as variáveis hidráulicas ficarão representadas por suas

equivalentes elétricas.

4. ANÁLISE DOS REGISTROS DAS INUNDAÇÕES: HIDROGRAMAS

A análise das curvas das cotas do rio Uruguai em função do tempo, daqui em diante chamadas de hidrogramas, nos postos fluviométricos mencionados na metodologia, são a base deste trabalho para a definição dos parâmetros do modelo de previsão proposto. Para esse fim, as curvas serão analisadas primeiramente desde a perspectiva hidrológica, para posteriormente realizar a analogia com o caso elétrico, estabelecendo as bases para a proposta futura do modelo do trecho do rio considerado.

4.1. Análise dos hidrogramas com variáveis hidrológicas

A Figura 8 apresenta hidrograma do nível fluviométrico do rio Uruguai correspondente a um período de inundação durante o ano de 2014.

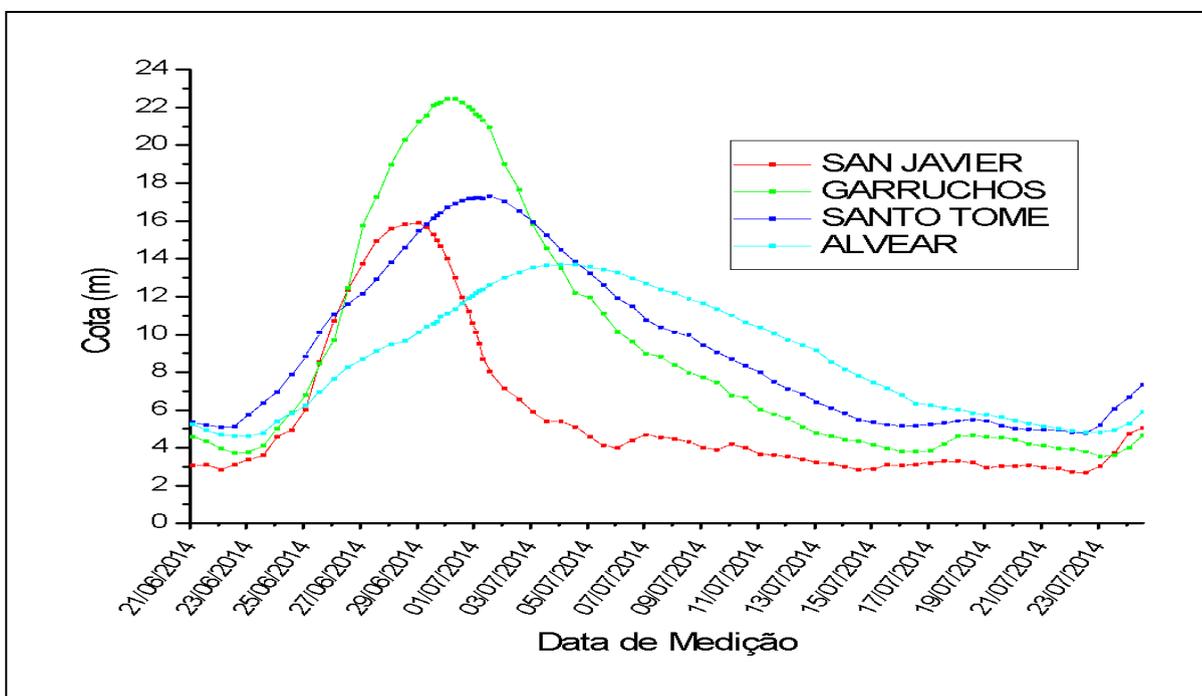


Figura 8 - Hidrograma dos pulsos de cheias do rio Uruguai para estações situadas em San Javier (Porto Xavier), Garruchos, Santo Tomé (São Borja), Alvear (Itaqui)

Fonte: Os autores

Segundo Collischonn & Tassi (2008), durante as chuvas intensas, a maior parte da

vazão que passa por um rio é a água da própria chuva que não consegue penetrar no solo e escoar imediatamente, atingindo os cursos d'água e aumentando a vazão. É desta forma que são formados os picos de vazão e as cheias ou enchentes. O escoamento rápido que ocorre em consequência direta das chuvas é chamado de escoamento superficial. Esta causa é interpretada como a origem dos picos.

Nos períodos secos entre a ocorrência de eventos de chuva a vazão de um rio é mantida pelo esvaziamento lento da água armazenada na bacia, especialmente da água subterrânea. Assim, o escoamento lento que ocorre durante as estiagens pode ser chamado de escoamento subterrâneo, porque a maior parte da água está chegando ao rio via fluxo de água através do subsolo (COLLISCHONN & TASSI, 2008). O escoamento subterrâneo é considerado o agente que define a linha de base fundamental do rio. Pode ser observado na Figura 8 que a linha de base difere em cada posto, devido às características do perfil topográfico da seção do rio em cada local, principalmente em termos de largura e condições de contorno. No entanto, em ocasiões de chuvas sucessivas pode ser considerada outra linha de base correspondente ao nível do rio antes da precipitação. Observa-se que a linha de base do posto Porto Xavier/San Javier é a mais baixa, ao redor da cota 3 m da régua linimétrica local, o que pode ser interpretado como consequência da maior altura deste posto e consequente maior declividade que facilita o escoamento mais rápido das águas a níveis mais baixos que nos outros postos. Na mesma linha de raciocínio vem a linha de base do posto de Garruchos, porém aumentando conforme a altura do posto é menor, ficando ao redor de 4 m. Nos postos situados nas regiões mais baixas (São Borja/Santo Tomé e Itaqui/Alvear) a linha de base fica ao redor de 5 m, como esperado, porém com uma leve inversão, indicando que a declividade é similar e outros fatores locais podem influenciar a altura desta linha de base. Esta interpretação está de acordo com Tassi & Collischonn (2018), que afirmam “bacias hidrográficas íngremes e com boa drenagem têm hidrogramas mais rápidos, geralmente com pouco escoamento de base”.

Na Figura 9, a linha de base foi subtraída para facilitar a comparação dos perfis dos pulsos de onda.

Com base nos conceitos estabelecidos em Tassi & Collischonn (2018), e supondo as cotas proporcionais às vazões, como já mencionado, podemos realizar as observações elencadas a continuação:

- 1) O pulso de onda de enchente criado no posto de Porto Xavier/San Javier corresponde a características de uma bacia de captação relativamente menor que as outras, de forma pouco alongada, com condições de contorno de barrancos de paredes altas rochosas e solos que permitem a rápida criação do pulso de enchente. Por esses motivos o perfil apresenta boa simetria, com pouco amortecimento, e maior sensibilidade a pequenos picos de chuva que aparecem na cauda final do pico. A cota máxima acontece no dia 29/06/2014, em horário interpolado das 20:45, com valor de cota relativa (com relação à linha de base) de 13.25 m.
- 2) O pulso de enchente detectado no posto de Garruchos apresenta um perfil com maior altura e área, o que sugere um aumento da vazão de escoamento devida à maior bacia de captação de água deste posto, a menor declividade, e a maior sinuosidade do canal do rio Uruguai em Garruchos. A ausência de retardo entre os pulsos, que coincidem na sua ascensão, indica que o pulso foi alimentado em forma contínua durante o trajeto entre Porto Xavier e São Borja, com poucas perdas laterais. A cota máxima acontece no dia 01/07/2014, em horário interpolado das 02:22, e cota máxima relativa de 18.80 m.
- 3) O pulso de enchente observado no posto de São Borja/Santo Tomé apresenta diminuição na altura e equivalência na largura com relação ao perfil do pico do posto de Garruchos. Isto indica uma situação de perda de vazão por retenção em depressões e vegetação, correspondentes às cotas mais altas (> 13 m relativos), mas com pouca perturbação da forma do pulso em cotas mais baixas, indicando características de atrito semelhantes a Garruchos. O valor do máximo da cota é atingido no dia 02/07/2014, no horário interpolado de 02:23, com cota máxima relativa de 12.14 m.
- 4) Para o posto de Itaqui, o hidrograma apresenta uma clara tendência ao amortecimento, aumentando a largura do pico com relação ao posto de São Borja, porém sem alteração da área sob o mesmo, indicando que a massa de água se movimentou em estado de equilíbrio entre saídas e entradas, mas com um aumento do atrito que é atribuído à presença de vegetação na várzea do rio ocupada pela inundação, com efeito de alongamento e maior retardo. A cota máxima acontece no dia 05/07/2014, em horário interpolado das 00:4,

com valor relativo de 9.08 m. As mudanças observadas na forma do pico são coerentes com o fato da topografia mudar para coxilhas e várzeas mais amplas, porém com equilíbrio entre entradas e saídas de água devido ao denso sistema hídrico das regiões planas percorridas.

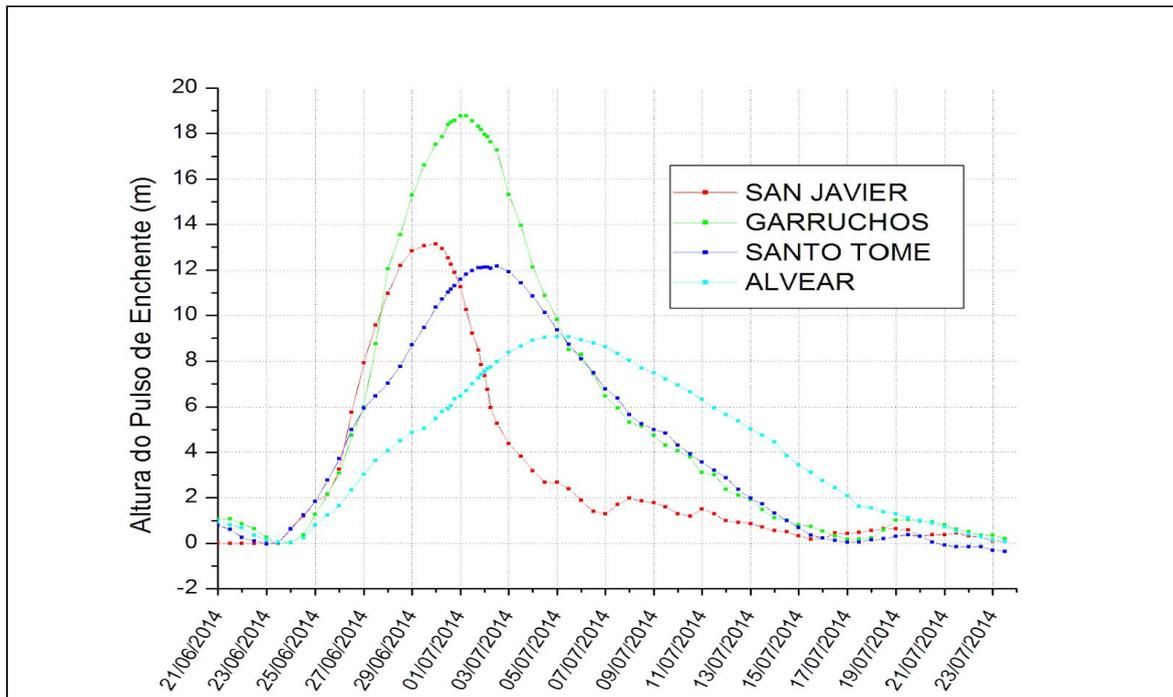


Figura 9. Perfis de histogramas da Figura 8 com a linha de base subtraída

Fonte: os autores

As observações anteriores são coerentes com os princípios da hidrologia encontrados em Tassi & Collischonn (2018), Collischonn & Tassi (2008), Tucci (2005) e com as hipóteses formuladas, sugerindo a boa adequação das mesmas ao caso estudado.

Embora dados mais detalhados não serão apresentados neste trabalho, a análise realizada em outros anos de inundações, incluindo municípios a jusante como Uruguaiana, também são coerentes com as conclusões gerais elaboradas anteriormente. Como ilustração, na Tabela 3 são encontradas as cotas máximas absolutas nas enchentes de 1983, 2014 e 2017 nos municípios de São Borja, Itaqui e Uruguaiana.

Ao elaborar a Tabela 3 com os níveis hidrométricos do rio Uruguai para os municípios de Itaqui, São Borja e Uruguaiana, foi apresentada a média aritmética para o nível máximo das Inundações, na qual se observa que conforme diminui a altura geográfica (com relação ao nível do mar) do local, a amplitude das cotas também diminui.

Tabela 3 - Nível Máximo do rio Uruguai

Anos	Municípios		
	São Borja	Itaqui	Uruguaiana
1983	16,00m	14,30m	13,58
2014	14,00	13,20m	11,82m
2017	14,88m	13,23m	12,10m
Média do Nível dos rios	14,96m	13,56m	12,50m

Fonte: os autores.

Resumindo, as águas precipitadas em uma determinada bacia hidrográfica são encaminhadas para os pontos mais baixos do terreno, atingindo riachos e rios que as conduzem a seus destinos, provocando a variação de vazão ao longo do tempo em uma dada seção do rio, com isso, o hidrograma de uma onda de cheia é a representação dessa vazão. Uma onda de cheia ao transitar em um dado trecho do rio pode sofrer um efeito de amortecimento, ou seja, a velocidade do rio é diminuída por atrito ou o volume do rio é retido em regiões adjacentes, afetando assim parte da vazão afluente fazendo com que a vazão de saída seja menor do que a vazão de entrada.

5. ADEQUAÇÃO DA MODELAGEM POR ANALOGIA ELÉTRICA PARA PREVISÃO DE ENCHENTES EM ITAQUI

Como objetivo final deste trabalho, será realizada a análise da adequação da proposta de um modelo de previsão em Itaqui, RS, baseado na analogia do circuito hidráulico/hidrológico do rio Uruguai com o circuito elétrico, para o trecho Porto Xavier - Itaqui do.

Segundo Collier (1998), a analogia entre circuitos hidráulicos e elétricos não é nova, mas sua aplicação em trechos de rios não tinha sido descrita claramente na literatura até seu trabalho. Da mesma forma, não se encontram na literatura aplicações desta analogia para o rio Uruguai. É evidente que a modelagem hidráulica percorreu outros caminhos mais vinculados ao chamado hidrograma unitário.

Na analogia cuja aplicação está sendo avaliada preliminarmente, as variáveis hidráulicas serão representadas através de variáveis elétricas, de acordo com as equivalências apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Comportamento das variáveis hidrológicas locais e adequação da analogia com o caso elétrico.

Variável hidráulica-hidrológica	Variável elétrica	Comentários
Vazão de entrada produzida pela chuva, proporcional ao volume da precipitação	Voltagem aplicada pela fonte	Existe aumento entre o posto de Porto Xavier e Garruchos, diminui em São Borja e mantém em Itaqui.
Atrito e perda de velocidade pela vegetação, infiltração, rugosidade do canal ampliado, efeito da declividade	Resistência	Pequeno entre Porto Xavier e Garruchos, considerável para São Borja e maior ainda para Itaqui.
Volume de escoamento. Armazenamento de água no pulso de onda, e descargas por perdas em depressões e por evapotranspiração, relacionada à resistência aerodinâmica da vegetação	Relacionado com a carga elétrica armazenada no capacitor, e sua Capacitância	Acumulando entre Porto Xavier e Garruchos, para depois entrar em descarga até São Borja e Itaqui
Mudanças na velocidade, turbulências, pressão, devidas a mudanças na seção transversa do rio e na sinuosidade	Relacionado com a energia magnética armazenada na Indutância	Grande em Garruchos por causa de meandros e um pouco menor em São Borja e Itaqui, produzida por causa de mudança da largura e da direção do canal do rio Uruguai.

Fonte: os autores

Na Tabela 5 temos a descrição das características dos picos de enchente de 2014 em termos de altura, largura e área, dando suporte quantitativo às observações qualitativas anteriores.

Tabela 5: Características dos picos de enchente de 2014.

Local do pulso de enchente	Áltura (m)	Largura (dias)	Área sob a curva (Volume)	Data e hora do máximo
San Javier (Porto Xavier)	13.14927	5.25	94.58975	29/06 - 22:00
Garruchos	18.7748	7.5	172.45034	01/07 - 03:45
Santo Tomé (São Borja)	12.17921	10.5	134.90696	02/07 – 06:38
Alvear (Itaqui)	9.05055	15	134.98362	05/07 – 02:12

Fonte: os autores

Os dados da Tabela 5 servem de subsídio para realizar uma proposta preliminar de modelo de previsão baseado na analogia elétrica.

Observa-se que o pico (amplitude) cresce entre Porto Xavier/San Javier e Garruchos, o que indica uma vazão crescente que seria representada por uma voltagem que pode ser constante ou crescente até Garruchos e posteriormente nula ou decrescente, aplicada ao circuito.

A largura do pico, pequena em Porto Xavier/San Javier, aumentando em Garruchos e diminuindo a valores similares em São Borja e Itaqui pode ser associado com a resistência ou dissipação de energia por atrito conforme o pulso de enchente avança.

A área sob o gráfico ou integral pode ser associada com o volume de água armazenado no pulso de inundação, assim como a carga é armazenada no análogo elétrico da capacitância.

5.2. Modelagem empírica e adequação do modelo elétrico

Na Figura 10 podemos observar o gráfico contendo as cotas máximas relativas (com relação ao nível de base) em função do número de horas. Este gráfico permite um primeiro

modelo empírico simples adaptado ao caso da enchente de 2014. Observa-se a semelhança do gráfico obtido para os máximos das cotas em cada estação em função do tempo de progressão da onda de enchente entre as estações com aquele correspondente ao processo de carga e descarga de um capacitor (Figura 6). Para facilitar o ajuste com uma exponencial decrescente, conforme esperado na analogia elétrica, estabeleceu-se o tempo zero no momento do máximo de Garruchos, que seria usado como ponto de partida da previsão da cota em Itaqui. Por esse motivo o máximo de Porto Xavier aparece em tempo negativo.

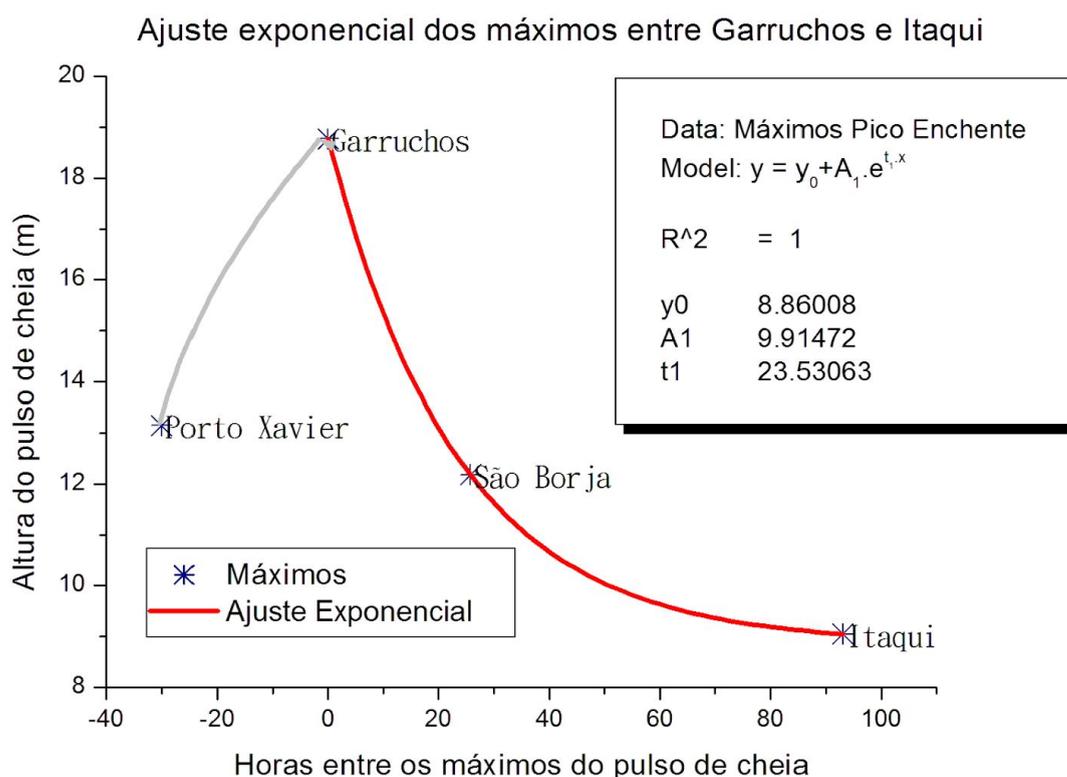


Figura 10: Ajuste exponencial das alturas máximas dos picos com relação à base nas estações de Porto Xavier, Garruchos, São Borja e Itaqui. O ajuste exponencial corresponde às 3 últimas estações, e pode ser usado como modelo empírico de previsão.

Fonte: os autores.

Os resultados do ajuste exponencial, de acordo com a Equação 9, podem ser melhor apreciados na Tabela 6. O coeficiente de determinação foi $R^2 = 1$ para o ajuste conseguido.

Equação de ajuste:

$$y = y_0 + A_1 \cdot e^{-x/t_1} \quad (\text{Equação 9})$$

Tabela 6 - Ajuste das alturas máximas dos pulsos de onda a uma função exponencial decrescente. Não teve erro para os pontos considerados.

Parametro	Valor	Erro
y_0	8.86008	--
A_1	9.91472	--
t_1	23.53063	--

Fonte: os autores.

Observa-se que o ajuste exponencial entre as amplitudes dos picos de inundação medidos e o tempo é perfeito, pois o coeficiente de determinação tem valor unidade ($R^2 = 1$).

Embora os resultados são preliminares e o número de pontos considerados é mínimo, a tendência indica um comportamento de decaimento exponencial da altura do pico, analogamente ao que acontece num circuito RLC amortecido, segundo a (Equação 10),

$$Q = Q_0 \cdot e^{-(R/2L)t} \quad (\text{Equação 10})$$

Mostra que a carga elétrica, considerada análoga ao volume de água armazenado no pico de enchente, decai exponencialmente com o tempo.

Conclui-se a partir destes resultados preliminares, que o modelo que utiliza uma analogia entre variáveis hidráulicas/hidrológicas e variáveis elétricas tem potencial de sucesso na sua aplicação no trecho do rio Uruguai entre Porto Xavier e Itaqui, podendo contribuir para a previsão de enchentes.

5.3. Etapas futuras da modelagem

A partir dos resultados aqui mostrados, podem ser construídas correlações com funções exponenciais que se ajustem às equações preditas nos circuitos elétricos. Posteriormente podem ser deduzidos os parâmetros elétricos a partir dos coeficientes empíricos das correlações. Estes parâmetros podem ser testados e validados com pulsos de

enchente diferentes dos utilizados para cálculo dos mesmos. Uma vez calibrados os parâmetros, o erro entre os valores calculados e os preditos pode ser estabelecido. Durante o processo todo, podem ser ajustadas conceitualmente as analogias entre variáveis hidráulicas e elétricas, melhorando o modelo.

Embora não foi o foco deste trabalho, foi perceptível o grande valor didático da analogia para o estudo de fenômenos elétricos e hidráulicos de forma comparativa, o que promove um interesse e clareza particular a assuntos normalmente difíceis de serem tratados em sala de aula, o que pode ser explorado em trabalhos futuros.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As inundações são um fenômeno natural, mas que devido a influências humanas tem se tornado um problema ambiental que afeta a população em termos de segurança, qualidade de vida, prejuízos econômicos e desarmonia com a natureza, em numerosos lugares do mundo. As intensas e desequilibradas chuvas na era do aquecimento global criam eventos de enchente muito rapidamente, o que tem afetado a capacidade de previsão para evitar danos. Na cidade de Itaqui, RS, durante a enchente de 2014 aconteceu o maior prejuízo social na sua história, quando 30 % da população foi deslocada de suas casas e viu muitos bens materiais serem perdidos, assim como problemas de saúde. Métodos de previsão confiáveis porém rápidos são ainda necessários para diminuir os impactos sociais e econômicos.

A geração do escoamento é um dos temas mais complexos da hidrologia, não porque a física envolvida seja complexa, mas sim porque a variabilidade das características da bacia é muito grande, e porque a água pode tomar vários caminhos desde o momento em que atinge a superfície, na forma de chuva, até o momento em que chega ao curso d'água. A matemática do problema também reveste certa complexidade pela formulação de equações diferenciais não lineares. Numerosas variáveis devem ser consideradas para uma modelagem “ajustada com a realidade”, mas mesmo assim a confiabilidade das medições necessárias e a complexidade do processamento de dados dificulta a obtenção de resultados confiáveis. A bacia hidrográfica do rio Uruguai corresponde a um dos principais rios para o estado do Rio Grande do Sul, o qual ao longo dos anos vem sendo analisado com a intenção de prevenir ou minimizar o efeito das inundações, tendo em vista que as maiores cidades regionais e sua população margeiam o rio.

Com o levantamento de informações bibliográficas, geográficas, climatológicas e fluviométricas foi possível selecionar 4 estações fluviométricas da bacia, e escolher como variáveis de estudo as cotas do rio Uruguai em cada uma delas. Assim, foi possível realizar uma discussão sobre as principais variáveis que afetam os hidrogramas.

Embora o estudo aqui apresentado está focado em dados das inundações de 2014, também foram revisadas outras informações de inundações ocorridas nos anos de 1983, 2014 e 2017 para os municípios de Itaqui, São Borja, Garruchos, e Uruguaiana, que mostraram comportamentos concordantes com os de 2014 apresentados neste trabalho.

Para contribuir na simplificação do modelo de previsão a ser utilizado, analisou-se a analogia entre modelos hidráulicos e elétricos, propondo uma associação inicial entre as principais variáveis hidráulicas e elétricas. Este tipo de analogia tem sido pouco aplicada na literatura, provavelmente por se tratar de uma aplicação tipicamente interdisciplinar.

Como consequência desta análise, um modelo empírico de ajuste às cotas máximas em cada posto fluviométrico revelou a existência de um decaimento exponencial, da mesma forma que acontece nos circuitos elétricos RLC. O modelo apresentou coeficiente de correlação unitário, indicando um ajuste perfeito com a exponencial, nos pontos analisados.

Conclui-se que a analogia entre variáveis hidráulicas e elétricas para modelos de previsão de enchentes na cidade de Itaqui tem alto potencial de contribuir na busca de um modelo rápido e confiável, que permita minimizar as perdas sócio-econômicas provocadas por inundações, por meio do convencimento da população sobre a situação real do rio.

Assim, busca-se contribuir com uma base para estudos mais avançados, que visem análises mais detalhadas e longas para identificação de parâmetros de calibração dos modelos, assim como o aprimoramento do arcabouço conceitual por trás dele.

A modelagem sugerida, baseado em cotas, tem perspectivas de ser facilmente associado com os impactos sócio-ambientais, podendo vir a ser utilizado em trabalhos de planejamento entre o poder público e a comunidade. Com isso, fica avançado o trabalho para o possível acesso a um modelo de previsão facilmente relacionável ao espaço urbanizado através das cotas, com tempo suficiente para ações no sentido da compreensão, por parte da comunidade, dos possíveis efeitos da inundação e a importância da prevenção e mitigação da vulnerabilidade ao perigo, permitindo ações mais amplas que a assistência e a recuperação pós-desastre.

O valor didático do trabalho na melhor compreensão da física dos problemas analisados também foi apreciado durante o desenvolvimento do mesmo.

7. REFERÊNCIAS

- ANA. Agência Nacional de Águas-Ministério do Meio Ambiente. **Inventário das Estações Fluviométricas**. 2ª edição. Brasília: ANA, SGH, 2009. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/infoidrologicas/InventariodasEstacoesFluviometricas.pdf>>. Acesso em: 15/08/2018.
- CENEDESE, E. **Solução das Equações de Burgers e de Navier-Stokes Bidimensionais Utilizando a Técnica da Transformada Integral Generalizada**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Ilha Solteira, SP, 2005. Disponível em: <http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/pos-graduacao/dissertacao_ecenedese.pdf>. Acesso em 15/11/2018.
- COLLIER, C.G. **Modelling a river catchment using an electric circuit analogue**. Hydrology and Earth System Sciences, 2(1), 9-18 (1998). Acessível em: <<https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/2/9/1998/hess-2-9-1998.pdf>>. Acesso em 15/11/2018.
- COLLIER, C.G. **Flash flood forecasting: What are the limits of predictability?** Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 133: 3–23 (2007). Acessível em: <<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/qj.29>>. Acesso em 15/11/2018.
- COLLISCHONN, W., TASSI, R. – IPH/ UFRGS. **Introduzindo hidrologia**. Versão 5. 2008. Disponível em: <<http://197.249.65.74:8080/biblioteca/bitstream/123456789/687/1/INTRODU%C3%87AO%20A%20HIDROLOGIA.pdf>> Acesso em: 25/09/2018.
- FOZ DO CHAPECÓ ENERGIA S.A.. <http://www.fozdochapeco.com.br/usina/>. Acesso em: 1/11/2018,
- HUNTER N. M., PAUL D. BATES B , MATTHEW S. HORRITT C , MATTHEW D. WILSON D. **Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review**. Geomorphology 90 (2007) 208–225. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X07001304>> Acesso em: 1/10/2018
- KNEBL, M.R., YANG, Z. -L., HUTCHISON, K, MAIDMENT, D.R. **Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event**. Journal of Environmental Management 75 (2005) 325–336. Disponível em: <<http://www.geo.utexas.edu/climate/Research/Reprints/FloodModeling05.pdf>>. Acesso em 15/11/2018.
- LINO, J.; OLIVEIRA DE SOUZA, D.; SATO, E.; BERNARDES, T.; FIRMINO, M. **Padrões Meteorológicos e Morfológicos Associados à Eventos de Inundação na Bacia do rio Uruguai - Estudo de Caso para o Município de Uruguaiana/RS**. Revista Brasileira de Farmácia, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/321605356_Padros_Meteorologicos_e_Morfologicos_Associados_a_eventos_de_Inundacao_na_Bacia_do_rio_Uruguai_-_Estudo_de_Caso_para_o_Municipio_de_UruguaianaRS>. Acesso em 15/11/2018.
- PAES, R. P.; BRANDÃO, J. L. B. **Análise da translação de onda de cheia efluente do reservatório da UHE Manso na bacia hidrográfica do rio Cuiabá, Mato Grosso**. 192p. Dissertação Mestrado,

USP, São Carlos, São Paulo, 2007. Disponível em:

<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-02062011-131557/publico/PAES_Rafael.pdf>. Acesso em 15/11/2018.

PENA, R. A. **O problema das enchentes**. Brasil Escola, 2017. Disponível em:

<<http://brasilecola.uol.com.br/geografia/enchentes.htm>>. Acesso em: 15/11/2018

PNA, Prefectura Naval da Argentina-Autoridade Marítima. Disponível em:

<<http://sitiowcontingencia.prefecturanaval.gov.ar/alturas/index.php>>. Acesso em: 15/11/2018.

RIGHI, E.; ROBAINA, L. E. **Enchentes do rio uruguai no rio grande do sul entre 1980 e 2005: Uma análise geográfica**. Sociedade Natureza, v. 22, n. I, p. 35–54, 2010. Disponível em:

<<http://www.scielo.br/pdf/sn/v22n1/04.pdf>>. Acesso em: 15/11/2018

ROBAINA, L. E.S. **Espaço Urbano: relação com acidentes e desastres naturais no Brasil**. Periódicos UFSM. 2008. Disponível em:

<<https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/viewFile/9841/5900>>. Acesso em: 15/11/2018

SANTOS, L.L. **Modelos Hidráulicos-hidrológicos: Conceitos e Aplicações**. Revista Brasileira de Geografia Física Recife, RBGF-PE, Vol.2, n.03, set-dez, 01-19, 2009. Disponível em:

<<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/viewFile/232624/26638>> Acesso em: 15/11/2018.

SAUERESSIG, S. R. **Zoneamento das Áreas de Risco a Inundação da Área Urbana de Itaqui-RS**. 101 p. Dissertação, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, agosto 2012. Disponível em:

<http://w3.ufsm.br/ppggeo/images/dissertacoes/dissertacoes_2012/Silene%20Raquel%20Saueressig%20-%20dissertao.pdf>. Acesso em: 15/11/2017

SIMÕES, A. L. A.; BRITO, R.J.R.; SCHULZ, H. E.; PORTO, R. M.; LOBOSCO, R. J. **Aspectos Numéricos e Físicos de Soluções das Equações de Saint-Venant**. 6o Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia/3o Congresso de Engenharia de Moçambique. CLME'2011/IIICEM, At Maputo, Volume: 1. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/259398961_ASPECTOS_NUMERICOS_E_FISICOS_DE_SOLUCOES_DAS_EQUACOES_DE_SAINTE-VENANT>. Acesso em: 20/09/2018.

SOUZA, D. O.; LINO, J. F. L.; BERNARDES, T.; SATO, E. N.; FIRMINO, M. B. M. **Padrões meteorológico e morfológico associados à eventos de inundação na bacia do rio Uruguai: estudo eventos de inundação na bacia do rio Uruguai: estudo de caso para o município de Uruguaiana-RS**. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/321605356_Padrees_Meteorologicos_e_Morfologicos_Associados_a_eventos_de_Inundacao_na_Bacia_do_rio_Uruguai_-_Estudo_de_Caso_para_o_Municipio_de_UruguaianaRS>. Acesso em: 10/10/2018.

TASSI, RUTINÉIA & COLLISCHONN, WALTER. **Notas de aula de Hidrologia**. Acessível em:

<<http://www.hidroengnet.com.br/rutiwalter.pdf>>. Acesso em: 15/11/2018.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. ABRH, Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2005, 678p.

USGS, United States Geological Survey. **Digital Elevation Models Related Data**. Acessível em: <<https://ita.cr.usgs.gov/elevation.html>>. Acesso em 15/11/2018.