

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

JULIANO SANTOS FINCK

**ESTUDO PRELIMINAR DE SISTEMA DE ALERTA PARA
A PARTE BRASILEIRA DA BACIA DO RIO URUGUAI
UTILIZANDO MODELO DE PREVISÃO COTA-COTA**

Porto Alegre

2018

JULIANO SANTOS FINCK

**ESTUDO PRELIMINAR DE SISTEMA DE ALERTA PARA
A PARTE BRASILEIRA DA BACIA DO RIO URUGUAI
UTILIZANDO MODELO DE PREVISÃO COTA-COTA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas e Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan

Coorientador: Dr. Francisco Fernando Noronha Marcuzzo

Porto Alegre

JANEIRO DE 2018

JULIANO SANTOS FINCK

ESTUDO PRELIMINAR DE SISTEMA DE ALERTA PARA A PARTE
BRASILEIRA DA BACIA DO RIO URUGUAI UTILIZANDO MODELO DE
PREVISÃO COTA-COTA

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 12/01/2018 pela Comissão avaliadora constituída por:

Banca Examinadora

.....
Professor Orientador Fernando Mainardi Fan
Departamento de Obras Hidráulicas
Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH

.....
Msc. Vinícius Alencar Siqueira
Bolsista de Doutorado pelo CNPq no PPGRHSB do IPH-UFRGS
Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH

.....
Msc. Franco Turco Buffon
Gerência de Hidrologia e Gestão Territorial – GEHITE / SUREG-PA
Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - CPRM

Aprovado em: __/__/____

Conceito: _____

*Out of the night that covers me
Black as the pit from pole to pole
I thank whatever gods may be
For my unconquerable soul*

*In the fell clutch of circumstances
I have not winced nor cried aloud
Under the bludgeoning of fate
My head is bloody, but unbowed*

*Beyond this place of wrath and tears
It looms but the Horror of the shades
And yet the menace of the years
Finds, and shall find me, unafraid*

*It matters not how strait is the gate,
How charged with punishments are the scrolls,
I am the master of my fate:
I am the captain of my soul*

466-64

AGRADECIMENTOS

Sou grato à oportunidade de ter cursado ensino superior na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, instituição esta financiada pelos impostos da sociedade brasileira, motivo esse um pelos quais sinto o dever de retornar em grandes esforços concretos.

Agradeço à CPRM pela disponibilização dos dados para estações fluviométricas utilizadas nesse estudo.

Agradeço aos dados das estações do Uruguai que foram fornecidos por Rodolfo Chao, *Director de División Servicio Hidrológico*.

Agradeço aos meus colegas da CPRM: Andrea Germano, Francisco Marcuzzo e Guilherme Guimarães, os quais se mostraram amigáveis e profissionais em suas sugestões durante a realização desse trabalho.

Agradeço também ao orientador e professor Fernando Fan pela sua paciência, eficácia e modéstia durante os momentos em que lhe procurei para orientação.

Agradeço ao professor Dieter Wartchow e ao falecido professor Roberto Souza por serem docentes sensíveis e humildes, e adicionarem uma faceta filosófica e humanitária voltada a responsabilidade social que temos como cientistas, que mantereí comigo;

Agradeço à minha família pelos valores esculpidos e, apesar de algum ou outro receio, por me permitir a liberdade necessária para reinventar meus caminhos;

Agradeço ainda às companheiras e aos companheiros que participaram desses últimos 7 anos.

RESUMO

A habitação em zonas de risco de inundação tem propiciado perdas socioeconômicas e necessitam de soluções. Para tal, a implantação de sistemas de alertas é uma medida não estrutural que quando bem empregue auxilia na minimização de perdas. Parte inerente de um sistema de alerta é a modelagem matemática para previsão hidrológica dos eventos de inundação. O objetivo desse estudo foi avaliar o uso de um modelo hidrológico baseado em regressão linear, com vistas a instalação de um sistema de alerta para atender municípios da bacia do rio Uruguai que sofrem frequentemente com eventos de inundação. São elas: Porto Lucena, Garruchos, Passo São Borja, Itaqui, Uruguiana e Barra do Quaraí. As regressões desenvolvidas foram testadas com horizonte de previsibilidade de até cinco dias, e contaram com tanto a inserção de variáveis autoregressivas como de variáveis exógenas. Os dados utilizados foram de duas naturezas: dados únicos diários e dados de duas leituras diárias, mensurados às 7h e 17h. Para a aferição utilizou-se as seguintes métricas: Nash-Sutcliffe, Coeficiente de Persistência, Erro Médio Absoluto, Raiz do Erro Médio Quadrado e E95. Realizou-se como parte desse estudo breve consistência inventarial de informações como altitude, área de drenagem e município para as 12 estações utilizadas. Também, realizou-se otocodificação para a bacia do rio Uruguai até 1º nível. As métricas utilizadas sugerem o uso de modelos hidrológicos de regressão linear para prever inundações em São Borja, Itaqui e Uruguiana com até 48h de antecedência (24h, $NS > 0,9$; 48h, $NS > 0,7$). Dados diários apresentam mais eficiência. As regressões desenvolvidas para Porto Lucena, Garruchos e Barra do Quaraí apresentam coeficientes de Nash-Sutcliffe num geral baixos. Sugere-se para o sistema de alerta do rio Uruguai uma associação de modelos para zonas de montante e o uso de regressões para previsões mais a jusante.

PALAVRAS-CHAVE: Bacia do rio Uruguai, Inundação, Regressão Linear.

ABSTRACT

Housing in areas at risk of flooding has led to socioeconomic losses and need smart solutions. Therefore the implementation of an alert systems is a non-structural measure that, when well developed, assists in minimizing losses. Inherent part of an alert system is the mathematical modeling for hydrological forecasting of flood events. The aim of this study was to evaluate the use of a hydrological model based on a myriad of linear regressions, with the intention to install a warning system to serve municipalities in the basin of the Uruguay River, where flood events not uncommonly take place. They municipalities are: Porto Lucena, Garruchos, Passo São Borja, Itaqui, Uruguaiana and Barra do Quaraí. The developed regressions were tested for horizon predictability up to five days and made use of both the autoregressive variables and of exogenous variables. The used data had two different formats: one daily measure data and two daily measures data, the latter being measured at 7h and 17h. On the efficiency checking process, the following metrics were applied: Nash-Sutcliffe, Persistence Coefficient, Absolute Mean Error, Root Error Mean Square and E95. As part of this study, the inventorial consistency of main information such as altitude, drainage area and municipality for all the 12 used stations was performed. Also, “ottocoding” was performed on the Uruguay River basin up to the 1st level. The utilized metrics suggest the feasibility of hydrologic models based on linear regressions to foresee flood events in São Borja, Itaqui and Uruguaiana municipalities with up to 48 hours in advance (24h, $NS > 0,9$; 48h, $NS > 0,7$). Daily data regressions led to higher efficiency metrics. The developed regressions to Porto Lucena, Garruchos and Barra do Quaraí municipalities overall present low Nash Sutcliffe coefficients. A coupling between different models for upper zones and linear regressions for lowerer ones is recommended for the Uruguay river warning system.

KEYWORDS: Uruguay river basin, Flood, Linear regression.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Classificação de eventos advindos de excesso de chuva.	7
Figura 2. Funcionamento de um sistema de alerta de enchentes. Adaptado de SIQUEIRA (2015).	9
Figura 3. Bacias monitoradas com sistema de alerta pela CPRM.....	12
Figura 4. Hidrografia da bacia do rio Uruguai, principais afluentes.....	28
Figura 5. Sub-bacias, bacia 7, rio Uruguai, parte brasileira.	30
Figura 6. Ottocodificação 1º nível da bacia do rio Uruguai.....	31
Figura 7. Altimetria da bacia do rio Uruguai pelo SRTM30.	33
Figura 8. Barramentos presentes na bacia do rio Uruguai.	35
Figura 9. Massas de ar atuantes sobre a bacia do rio Uruguai.	36
Figura 10. Identificação do mês mais chuvoso das estações pluviométricas na parte brasileira da bacia do rio Uruguai.	38
Figura 11. Estações hidrológicas, excluindo as de qualidade da água.....	39
Figura 12. Estações hidrométricas presentes no BDHI.....	41
Figura 13. Municípios que entraram em situação de emergência.....	42
Figura 14. Frequência absoluta de Situação de Emergência por a) enxurrada; b) inundação; c) enchente.....	43
Figura 15. Diagrama unifilar do modelo para o rio Uruguai	49
Figura 16. Regressão 2 - vazão, eventos de inundação de 1/1/1991 até 31/8/2017.....	51
Figura 17. Regressão 3 - vazão, eventos de inundação de 1/1/1991 até 31/8/2017.....	52
Figura 18. Regressão 4 - vazão, eventos de inundação de 1/1/1991 até 31/8/2017.....	52
Figura 19. Disponibilidade de dados de Duas Leituras para o período utilizado.	54
Figura 20. Disponibilidade de dados de Cotas para o período utilizado.....	55
Figura 21. Disponibilidade de dados de Vazão para o período utilizado.....	56
Figura 22. Perfil transversal 74800000 no dia 02/05/2017.	57
Figura 23. Filtros possíveis.	59
Figura 24. Diagrama unifilar Regressão 1.	64
Figura 25. Regressão 1, Porto Lucena, cota diária.....	66
Figura 26. Regressão 1, Porto Lucena, cota duas leituras.....	66
Figura 27. Digrama unifilar Regressão 2.	67

Figura 28. Regressão 2, Garruchos, cota diária.	69
Figura 29. Regressão 2, Garruchos, cota duas leituras.	69
Figura 30. Diagrama unifilar Regressão 3.	70
Figura 31. Regressão 3, São Borja, cota diária.	72
Figura 32. Regressão 3, São Borja, cota duas leituras.	72
Figura 33. Diagrama unifilar Regressão 4.	73
Figura 34. Regressão 4, Itaqui, cota diária.	75
Figura 35. Regressão 4, Itaqui, cota duas leituras.	75
Figura 36. Diagrama unifilar Regressão 5.	76
Figura 37. Regressão 5, Uruguaiana, vazão diária.	78
Figura 38. Regressão 5, Uruguaiana, cota duas leituras.	78
Figura 39. Diagrama unifilar Regressão 6.	80
Figura 40. Regressão 6, Barra do Quaraí, cota diária.	82
Figura 41. Regressão 6, Barra do Quaraí, cota duas leituras.	82
Figura 42. Diagrama unifilar Regressão 7.	83
Figura 43. Regressão 7, rio Uruguai Total, cota diária.	85
Figura 44. Regressão 7, rio Uruguai Total, cota duas leituras.	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Eventos extremos hidrometeorológicos por excesso de chuva.	6
Quadro 2. Exemplos de regressões simples normalmente utilizadas. Fonte: Marcuzzo (2014).	21
Quadro 3. Número de aproveitamentos hidrelétricos por estágio.	34
Quadro 4. Relação variável explicada e explicativa por regressão.	47
Quadro 5. Parâmetros do GRG Non-Linear.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados inventariais e consistências das estações utilizadas.	45
--	----

Tabela 2. Tempo de propagação estimado para ondas de cheia.	50
Tabela 3. Valores de referência para as regressões desenvolvidas.	58
Tabela 4. Regressão Porto Lucena (74800000) com dados cota diária.	64
Tabela 5. Regressão Porto Lucena (74800000) com dados cota duas leituras.	65
Tabela 6. Regressão Garruchos (75550000) com dados cota diária.	67
Tabela 7. Regressão Garruchos (75550000) com dados cota duas leituras.	68
Tabela 8. Regressão São Borja (75780000) com dados cota diária.	70
Tabela 9. Regressão São Borja (75780000) com dados cota duas leituras.	71
Tabela 10. Regressão Itaqui (75900000) com dados cota diária.	73
Tabela 11. Regressão Itaqui (75900000) com dados cota duas leituras.	74
Tabela 12. Regressão Uruguaiana (77150000) com dados vazão diária.	76
Tabela 13. Regressão Uruguaiana (77150000) com dados cota duas leituras.	77
Tabela 14. Regressão Barra do Quaraí (77590000) com dados cota diária.	80
Tabela 15. Regressão Barra do Quaraí (77590000) com dados cota duas leituras.	81
Tabela 16. Regressão Uruguaiana Total (77150000) com dados cota diária.	83
Tabela 17. Regressão Uruguaiana Total (77150000) com dados cota duas leituras.	84
Tabela 18. NS para antecedência 24 e 48h por regressão.	86

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO	V
1. Introdução	1
2. Objetivos	2
3. Revisão Bibliográfica	3
3.1. Eventos extremos e sociedade	3
3.2. Sistemas de alerta e suporte à decisão: conceituação e funcionamento	8
3.3. Tipos de modelos hidrológicos e suas utilizações	13
3.4. Regressão simples e múltipla	19
3.5. Modelagem hidrológica vazão-vazão e cota-cota no mundo	22
3.6. Modelagem hidrológica e previsão vazão-vazão e cota-cota no Brasil	23
3.7. Cenário atual para estudos de previsão hidrológica na bacia do rio Uruguai	26
4. Material e Métodos	27
4.1. Caracterização da Área de Estudo	27
4.1.1. HIDROGRAFIA.....	27
4.1.2. OTTOCODIFICAÇÃO DA BACIA DO RIO URUGUAI	29
4.1.3. ALTIMETRIA	32
4.1.4. PEDOLOGIA	33
4.1.5. BARRAMENTOS	34
4.1.6. CLIMATOLOGIA	35
4.2. Dados Hidrológicos	37
4.2.1. DADOS PLUVIOMÉTRICOS	37
4.2.2. DADOS FLUVIOMÉTRICOS	39
4.2.3. PRÉ-SELEÇÃO DE ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DE INTERESSE	42
4.2.4. DO HIDROWEB (.TXT) PARA O EXCEL (.XLSX)	44
4.2.5. TABELA DE IDENTIFICAÇÃO E CONSISTÊNCIA DAS ESTAÇÕES UTILIZADAS.....	45
4.3. Cálculo do tempo de propagação da onda	46
4.4. Construção de Diagramas Unifilares e a Consistência de Dados Inventariais	47

4.5. Regressões desenvolvidas	47
4.6. Inconsistência nos dados de vazão	51
4.7. Disponibilidade Temporal das Estações Seleccionadas	53
4.7.1. DUAS LEITURAS	53
4.7.2. COTAS.....	55
4.7.3. VAZÃO	56
4.8. Definição dos valores de referência	56
4.9. Filtros possíveis	59
4.10. Métricas para aferição dos modelos 60	
4.11. Calibração dos modelos 61	
5. Resultados e Discussão	63
5.1.1. REGRESSÃO 1 (PORTO LUCENA).....	64
5.1.2. REGRESSÃO 2 (GARRUCHOS)	67
5.1.3. REGRESSÃO 3 (SÃO BORJA)	70
5.1.4. REGRESSÃO 4 (ITAQUI).....	73
5.1.5. REGRESSÃO 5 (URUGUAIANA).....	76
5.1.6. REGRESSÃO 6 (BARRA DO QUARAÍ)	80
5.1.7. REGRESSÃO 7 (RIO URUGUAI TOTAL)	83
5.1.8. DISCUSSÃO GERAL	86
6. Conclusão	87
7. Recomendações	90
8. Referências Bibliográficas	91

1. INTRODUÇÃO

Desastres naturais estão comumente relacionados a eventos extremos. O desenvolvimento dos primeiros centros urbanos tomou espaço nos arredores de grandes corpos hídricos, em cujos arredores deste sempre houve o risco aos eventos extremos de enchente e inundação. Hoje a busca por moradias em terrenos de baixo custo e a falta de fiscalização do poder público acabam sentenciando famílias a habitar áreas de risco. Encontram-se no estado do Rio Grande do Sul, entre outros, os municípios de Itaqui, Uruguaiana e São Borja, por exemplo, associados a frequentes eventos de inundação, que culminam em declaração de situação de emergência.

Vêm-se empregando medidas estruturais como a construção de diques para controlar o avanço da onda de cheia sobre planícies de inundação habitadas. Há também outras abordagens menos custosas e que não modificam o meio: as medidas não estruturais. Um exemplo de medida não estrutural é o uso do sistema de alerta de eventos extremos. A medida trata de prever a magnitude e o momento em que um evento extremo ocorrerá, e, assim, emitir boletins com as cotas que serão ou não atingidas. Estes boletins são encaminhados aos órgãos de Proteção e Defesa Civil, que se encarregam de esvaziar as áreas de inundação, salvando vidas e alguns bens materiais. Portanto, embora de difícil mensuração, a instalação de um bom sistema de alerta mantém um valor econômico intrínseco associado à minimização de perdas.

Parte inexorável dos sistemas de alerta é a modelagem hidrológica. Essa é regularmente realizada após estudo do sistema da bacia hidrográfica local, identificando-se relações entre estações fluviométricas e pluviométricas que sejam capazes de apresentar correlação estatística real com os eventos extremos já mensurados na localidade. Nos países em desenvolvimento ainda, porém, enfrenta-se outro impasse: a carência da disponibilidade de dados e a falta de qualidade desses.

Do grupo de modelos matemáticos mais utilizados para previsão hidrológica, um dos mais antigos e consagrados é a Regressão Linear. Nesse trabalho buscou-se desenvolver regressões que pudessem antever eventos de inundação em localidades críticas que tem entrado em Situação de Emergência na parte brasileira da bacia do rio Uruguai com certa frequência.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é desenvolver e avaliar modelos de previsão hidrológica para estações chave no rio Uruguai baseados em regressões lineares, e que auxilie a tomada de decisão por parte da Proteção e Defesa Civil no momento de evacuar habitantes das planícies de inundação.

Os objetivos específicos do trabalho são os seguintes:

- a. Identificar os pontos de interesse para um sistema de alerta de eventos extremos;
- b. Desenvolver modelos hidrológicos de previsão de cotas;
- c. Avaliar quantitativamente e qualitativamente o desempenho dos modelos para diferentes antecedências de previsão (até 5 dias à frente);
- d. Comparar modelos de previsão baseados em leitura diária x dupla medição de cotas;
- e. Comparar estimativas de tempo de propagação de cheia a partir de dados observados e regressões do modelo;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo de revisão bibliográfica inicia com uma análise sobre a relação dos eventos extremos com a sociedade, introduzindo-se algumas terminologias e motivos históricos guiaram a fixação de moradias em áreas de risco no Brasil (3.1). Em seguida, apresentam-se o conceito, o funcionamento e as partes de um Sistema de Alerta (3.2). Uma das partes, a modelagem hidrológica é abordada no subcapítulo seguinte, classificando os tipos de modelos, enumerando alguns e explicitando a utilidade desses (3.3). Depois, há um subcapítulo dedicado ao uso da regressão simples e múltipla e à apresentação de possíveis métricas de aferição (3.4). Exibem-se exemplos da utilização das regressões lineares no mundo (3.5) e no Brasil (3.6). Por fim, retoma-se o exposto, e numa análise das últimas políticas públicas concomitante com a instalação de sistemas de alerta, justifica-se o trabalho (3.7). São os subcapítulos:

- (3.1) Eventos extremos e sociedade
- (3.2) Sistemas de alerta e suporte à decisão: conceituação e funcionamento
- (3.3) Tipos de modelos hidrológicos e suas utilizações
- (3.4) Regressão simples e múltipla
- (3.5) Modelagem hidrológica vazão-vazão e cota-cota no mundo
- (3.6) Modelagem hidrológica e utilização de previsão vazão-vazão e cota-cota no Brasil
- (3.7) Cenário atual para estudos de previsão hidrológica na bacia do rio Uruguai

3.1. EVENTOS EXTREMOS E SOCIEDADE

Historicamente humanos organizaram-se em grupos, coletivos e aldeias, e assentaram próximo a corpos hídricos os primeiros centros urbanos (GALVÃO, 2014). A partir do final do século XIX, esses centros urbanos cresceram rápida e desordenadamente pela falta de políticas de planejamento e aspectos culturais, culminando na ocupação de áreas de risco desvalorizadas e ambientalmente frágeis (ROSSATO, 1993 apud GUASELLI *et al.*, 2013; GALVÃO, 2014; CARVALHO *et al.*, 2007). Consoante Carvalho *et al.* (2007) área de risco é aquela sujeita a eventos que causem efeitos adversos, e onde pessoas podem sofrer danos à integridade física, perdas materiais e patrimoniais.

No âmbito dos aspectos culturais mencionados anteriormente, citam-se a ocupação de encostas deriva de herança dos portugueses, que as ocupavam por serem sítios militares estratégicos, e a tomada das áreas ribeiras dadas durante o avanço da colonização no Brasil, que encontrou às margens de rios potenciais de transporte e de uso do recurso hídrico para irrigação de lavouras (ROBAINA, 2013). Robaina (2013) cita, por exemplo, a necessária concentração espacial de mão de obra às fábricas como causa do processo de ocupar áreas ribeiras.

Em nossa legislação brasileira, o Artigo 3º da Lei 6.776 declara admissível o parcelamento em zona urbana apenas quando de acordo com o plano diretor, proibindo-se ocupação em terrenos alagadiços e sujeitos a inundações onde não haja medidas de controle (BRASIL, 1979). Embora essa lei seja de 1979, as áreas de risco foram e vem sendo ocupadas de maneira acelerada, e Guaselli *et al.* (2013) apontam o aumento dos impactos de desastres naturais no Brasil como consequência. Segundo esses e outros autores, a distribuição temporal irregular desses eventos também contribui para o esquecimento da população dos perigos associados à ocupação dessas áreas (GUASELLI *et al.*, 2013, TAPIA *et al.*, 2014).

O processo de gentrificação é um fator causador da ocupação de áreas de risco: a falta de planejamento e da regulação estatal no momento de repensar a organização das cidades para atender às necessidades dos novos processos de produção e consumo acaba por expulsar indireta ou diretamente a classe baixa para periferias, devido principalmente ao aumento do preço do solo e dos produtos da região em gentrificação (FURTADO, 2014). Há hoje um desenvolvimento urbano desigual. No atual contexto da administração pública, configuram-se, portanto, duas cidades: a cidade legal, regularizada, a qual é pautada por preceitos urbanísticos, e a cidade ilegal normalmente de terrenos desvalorizados, onde predominam classes sociais de baixa renda (ROBAINA, 2013).

Por tais motivos e com vistas a promover a segurança aos que habitam áreas de risco, torna-se importante o estudo de eventos extremos.

Segundo Macana (2008), eventos extremos são aqueles que, dada a variabilidade natural, excedem os valores esperados de magnitude, frequência, intensidade e/ou duração de evento. Em IPCC (2007), evento meteorológico extremo é aquele que é raro a se considerar sua distribuição estatística em um dado local, podendo

tipicamente incluir tanto inundações como secas. Segundo Marengo *et al.* (2007), os eventos extremos de curta duração são considerados mais importantes pelos climatologistas, pois modelos apontam esses com maior frequência e intensidade.

Os eventos extremos hidrometeorológicos ocorrem pelo excesso ou pela carência de chuvas. Os eventos em cursos d'água relacionados à escassez de precipitações hídricas podem ser classificados como estiagens ou secas (CASTRO, 2003). As primeiras são menos intensas e tem duração menor em comparação com as segundas (MOREIRA, 2016a). Estiagens causam mais perdas para agricultura e pecuária brasileira do que secas, uma vez que ocorrem mais frequentemente e em zonas tipicamente mais produtivas (CASTRO, 2003).

Considerada um dos desastres naturais de maior ocorrência no mundo, a seca costuma afetar grandes extensões territoriais (KOBİYAMA *et al.*, 2006). Conforme Kobiyama *et al.* (2006), desastres naturais são fenômenos naturais que ocorrem em locais habitados por humanos, ocasionando danos (materiais e humanos) e prejuízos (socioeconômicos), e por isso recebem o nome de “desastre”. Assim, elucida-se a dualidade essencial para um desastre natural: fenômeno natural e a vulnerabilidade da entidade humana por estar em zona de risco.

Secas podem ser tão prejudiciais quanto inundações, vide que a seca de 2012 nos Estados Unidos promoveu prejuízo de quase 80 bilhões de dólares (PAGANO *et al.*, 2014). Em 2012 ocorreu a mais pronunciada estiagem dos últimos 20 anos no estado do Rio Grande do Sul registrando-se agosto como o mês mais seco desde 1992 (G1, 2012a). Houve racionamento nos municípios de Canoas (ROSA, 2012), Bagé (G1, 2012b) e Vacaria (G1, 2012c). O impacto prejudicou também culturas de inverno em 2012 no estado (G1, 2012d).

Já aqueles eventos deflagrados por excesso de chuva podem ser classificados conforme Quadro 1.

Quadro 1. Eventos extremos hidrometeorológicos por excesso de chuva.

<i>Enchente/Cheia</i>	<i>Elevação do nível d'água no canal principal do curso d'água, podendo atingir o nível máximo, porém sem extravasar.</i>
<i>Inundação</i>	<i>Configura-se quando o nível d'água ultrapassa as bordas laterais do canal principal, estendendo-se à planície de inundação, ou área de várzea.</i>
<i>Enxurrada</i>	<i>Evento de escoamento superficial concentrado com alta energia associada, que é consequência de eventos chuvosos de grande intensidade, podendo ocorrer fora de cursos d'água naturais (e.g. ruas).</i>
<i>Alagamento</i>	<i>Acúmulo momentâneo de águas devido à deficiência do sistema de drenagem, e.g. solo mal drenado.</i>

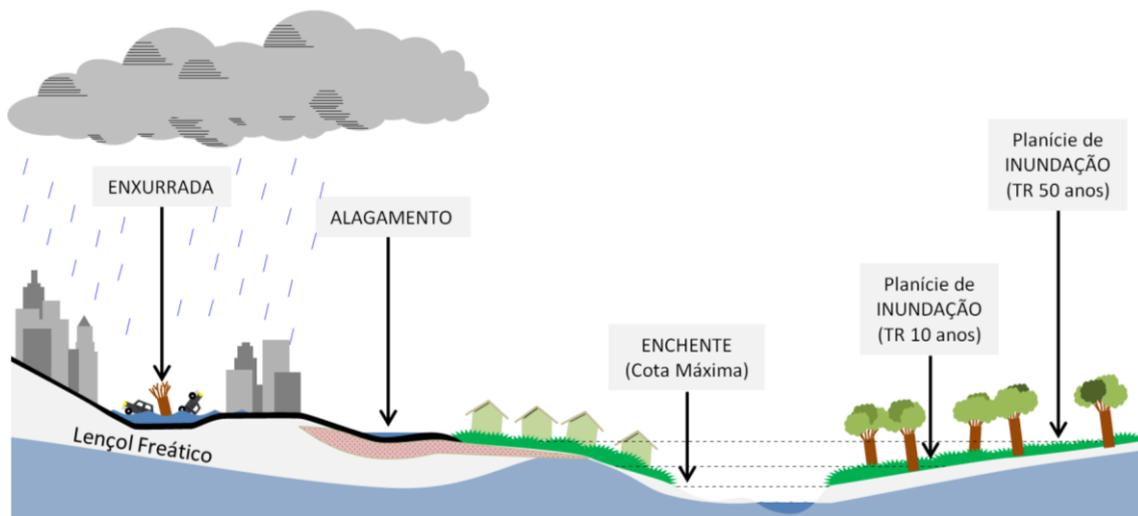
Fonte: adaptado de Carvalho *et al.* (2007).

Cabe salientar ainda que enchente e enxurrada possuem dois sinônimos na literatura: inundação gradual e inundação brusca, respectivamente (CASTRO, 2007).

Embora naturais e deflagrados por chuvas fortes e rápidas, ou, ainda, chuvas de longa duração (AMARAL e RIBEIRO, *et al.*, 2009), eventos hidrometeorológicos como enchentes podem ser intensificados pela impermeabilização do solo, advindo da ocupação urbana (TUCCI *et al.*, 2003). Abaixo segue ilustração dos eventos em zona urbana (Figura 1).

Cursos d'água possuem diferentes planícies de inundação em função do Tempo de Retorno (TR) da chuva. TR é definido como o inverso da probabilidade de ocorrência de um evento para um ano qualquer, e representa a frequência, em média, em que este evento se repete (PMPA, 2005). Na Figura 1 também constam duas cotas de planícies de inundação como exemplo.

Figura 1. Classificação de eventos advindos de excesso de chuva.



Fonte: produção própria do autor para este trabalho.

Segundo Guaselli *et al.* (2013), os desastres naturais registrados no estado do Rio Grande do Sul estão principalmente associados às inundações e estiagens. Inundações são recorrentes no estado do Rio Grande do Sul. As inundações no estado do Rio Grande do Sul deixaram 490 famílias desabrigadas em Outubro de 2016 (JORNAL NACIONAL, 2016). Em quatro de Janeiro de 2017, chuvas deixaram ruas alagadas no Bairro Lami em Porto Alegre, desabrigando moradores da região (ZERO HORA, 2017b); No dia oito de junho de 2017, o nível do rio Uruguai atingiu a cota de 11,82 m, valor esse igual ao segundo maior registrado em toda série histórica de 2014 (a maior cata registrada é de 1983), e desabrigando até 5,8 mil famílias (GAUCHA ZH, 2017);

Na bacia do rio Uruguai no Rio Grande do Sul, no período entre final de maio e início de junho de 2017, os municípios de Barra do Quaraí, Uruguai, Itaqui e São Borja entraram em situação de emergência devido inundações (S2iD, 2017).

Em seis de janeiro de 2017, registrou-se inundações no município de Rolante, advinda do rio Mascarada (ZERO HORA, 2017a). Segundo relatos colhidos em campo após o evento extremo, as chuvas fortes haveriam começado às 14 horas 38 minutos do mesmo dia, a elevação do nível do rio foi notada às 19 horas, e o aviso para desocupar residências foi dado às 21 horas 21 minutos, havendo o pico da inundações em torno das 22h45 (MEIRELLES *et al.*, 2017).

Eventos de inundação causaram mais da metade de perdas relacionadas a catástrofes naturais em 2013, e estima-se um prejuízo superior a 20 bilhões de dólares somados nos Estados Unidos, Canadá, Europa, Ásia e Austrália (PAGANO *et al.*, 2014).

Em estudo realizado nos Estados Unidos, Rogers e Tsirkunov (2011) afirmam que a redução de danos de inundações devido a melhoras na previsão de eventos em rios pode variar de alguns pontos percentuais até 35% do prejuízo anual médio. Robaina (2013) comenta que o gerenciamento é o fator que pode significar a diferença essencial entre a vida e a morte de dezenas de pessoas que habitam áreas segregadas em nossas periferias.

Para mitigação dos impactos de inundações, pode-se fazer uso de medidas estruturais, que costumam arcar com preços comumente mais elevados por envolver a construção de obras, como a construção de diques, bacias de amortecimento e reservatórios; ou medidas não estruturais, que não alteram o corpo hídrico, como o zoneamento de áreas de inundação, construções resilientes, sistemas de previsão e alerta de inundação (PEDROLLO *et al.*, 2011). Geralmente em grandes rios a proteção de todas as áreas ribeiras por obras estruturais não é solução mais conveniente do que avisos iniciais de inundações (SHAHZAD e PLATE, 2014).

3.2. SISTEMAS DE ALERTA E SUPORTE À DECISÃO: CONCEITUAÇÃO E FUNCIONAMENTO

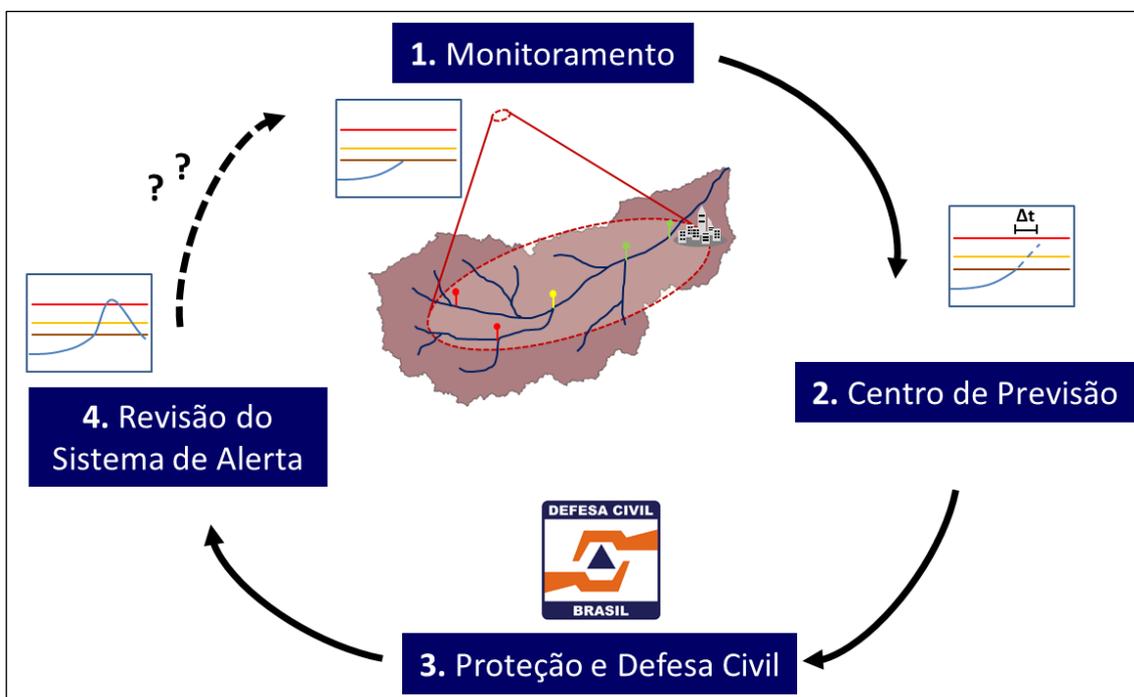
A Lei N° 12.608 de 2012 institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil e tem como alguns objetivos reduzir os riscos de desastres, produzir alertas antecipados sobre a possibilidade de ocorrência de desastres naturais, e monitorar os eventos meteorológicos, hidrológicos, geológicos, biológicos, nucleares, químicos e outros potencialmente causadores de desastres (BRASIL, 2012). A mesma lei prevê a criação pelo Governo Federal do cadastro nacional de municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas, processos geológicos ou hidrológicos correlatos. Os municípios incluídos devem elaborar mapeamento contendo as áreas suscetíveis a desastres naturais, elaborar Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil, instituir órgãos municipais de Proteção e

Defesa Civil, criar mecanismos de controle e fiscalização para evitar a edificação nessas áreas, e elaborar plano de implantação de obras e serviços para redução de riscos de desastre. É nesse contexto que nasce, então, a necessidade de um sistema de alerta fortemente atrelado à função de Proteção e Defesa Civil na população brasileira.

O sistema de alerta é uma medida não estrutural que pode ser chave para a tomada de decisão quanto à remoção preventiva da população e bens materiais de áreas de risco (PEDROLLO *et al.* 2011). Inclusive, segundo manual do WMO (2011), a razão do sistema de alerta é providenciar o mais rápido a notícia de uma inundação iminente para as autoridades e o público. Com o passar do tempo, a demanda da previsão costuma evoluir de uma indicação da possibilidade de enchente para posteriormente expressar a magnitude e o tempo hábil para ações serem empregues em localidades críticas (WMO, 2011).

Os principais componentes envolvidos no funcionamento de um sistema de alerta de eventos críticos são expressos na Figura 2. Nota-se que há quatro momentos: **1.** Sistema de monitoramento telemétrico presente em campo; **2.** Centro de Previsão; **3.** Proteção e Defesa Civil; **4.** Revisão do sistema de alerta.

Figura 2. Funcionamento de um sistema de alerta de enchentes. Adaptado de SIQUEIRA (2015).



Fonte: produção própria do autor do trabalho.

O monitoramento é feito conforme três níveis de referência são alcançados como enumerado a seguir (TUCCI, 2005b *apud* SIQUEIRA, 2015; GERMANO e MATOS, 2017):

Nível de Atenção (ou acompanhamento): já se acompanha a subida do hidrograma, prevendo-se em tempo real os níveis e alertando a Proteção e Defesa Civil. Nesse nível a equipe de Sistema de Alerta Hidrológico também já fica a posta para possíveis manutenções. Esse nível é denominado de atenção na plataforma SACE da CPRM (2017),

Nível de Alerta: significa que foi atingido o nível do rio no qual o risco de acontecer uma enchente é grande. Quando atingidos os níveis de alerta, os órgãos competentes serão avisados sobre a situação e passarão a receber boletins com maior frequência, contendo a previsão se a cota de inundação será ou não ultrapassada.

Nível de Inundação (ou emergência): indica que haverá prejuízos humanos ou materiais. O nível atual e o previsto são repassados para população, salientando possíveis erros do modelo. Esse nível também é denominado de nível de enchente.

No contexto de sistemas de alerta contra eventos extremos, a previsão em tempo real adquire destaque. Ela é um componente importante por estimar com antecedência a ocorrência de eventos, e geralmente está fundamentada em modelos matemáticos (TUCCI, 2005). Em Modelos Hidrológicos, Tucci (2005) define a diferença entre predição, uma estimativa sob um determinado nível de probabilidade fundamentada em dados históricos, e previsão, uma estimativa com antecedência definida para uma determinada chuva ou vazão de entrada. Uma previsão é feita a partir de um evento que já foi está em ação sobre a bacia (*e.g.* nas próximas 4h o nível atingirá 850 cm à jusante).

O termo “em tempo real” é empregue aos modelos hidrológicos de previsão eventual, que são acionados quando estações-controle atingem cotas críticas (TUCCI, 2005). Modelos de previsão em tempo real são classificados em função do dado de entrada: previsão meteorológica da precipitação, estimativa da precipitação por radar, previsão da precipitação por rede telemétrica e previsão da vazão com base em dados a montante (TUCCI, 2005). Segundo o autor, em ordem decrescente, essa enumeração representa também o grau de incerteza para o dado de saída.

A previsão por radar faz-se necessária principalmente para bacias menores, nas quais não se é possível alertar com tamanha antecedência o evento extremo baseando-se apenas em níveis de montante (TUCCI, 2005). No caso do desastre em Rolante, segundo relatório de Meirelles *et al.* (2017) houve uma janela de algo como 8 horas da ocorrência da chuva forte até o pico de inundação. Semelhante aos níveis de referência monitorados para cotas fluviométricas, estuda-se também o uso de limiares de precipitação para ocorrência de desastres, como por exemplo, na análise de Brubacher *et al.* (2013) para o rio dos Sinos, RS.

O desenvolvimento de um sistema de alerta de enchentes parte da identificação das localidades críticas de eventos de inundações, sendo de importância o conhecimento das áreas ribeirinhas populosas da região (TAPIA *et al.*, 2014). O trecho baixo do Caí, por exemplo, apresenta um relevo plano de cotas baixas, e nele os municípios de São Sebastião do Caí e Montenegro foram identificados como os recorrentes atingidos por enchentes (PEDROLLO *et al.*, 2011). No mesmo trabalho ainda se utilizaram dois critérios para escolha dos pontos de monitoramento, ou estações-chave: disponibilidade de série histórica de dados e distribuição espacial abrangente sobre a bacia.

No que tange as ações de remoção preventiva da população ribeirinha geralmente empregues pela Proteção e Defesa Civil, a confecção de produtos cartográficos das áreas inundáveis contribui para eficiência dos planos de evacuação (ECKHARDT, 2008).

Conforme Moreira (2016b) cada vez mais vem se tornando comum a criação de sítios acessíveis ao público, onde agências nacionais fornecem informações de previsões de inundações, produtos cartográficos e gráficos. Como alguns exemplos, citam-se na Austrália, o *Bureau of Meteorology*; nos Estados Unidos, o *National Weather Service* do NOAA (MOREIRA, 2016b); na Alemanha, o *Hochwasserportal* (LUBW e LfU, 2015). A maioria costuma apresentar o uso de boletins, e mapas iterativos com estações que mudam de cor conforme o perigo associado à última medição.

Seguindo essa tendência de transparência de informação, a nível nacional, a CPRM disponibiliza na página do Sistema de Alerta de Eventos Críticos, de acrônimo SACE, dados de 11 bacias que já foram contempladas com SACE e outras três que estão em implantação ou estudo de viabilidade, Figura 3 (CPRM, 2017). No mesmo

portal se encontram trabalhos sobre os sistemas de alerta, como os de rio Doce, rio Acre e rio Amazonas (em Manaus).

Ainda existem outros sistemas de alerta de outros municípios no território brasileiro. Esses são geridos por outros órgãos relacionados aos recursos hídricos e nem todos se valem de previsão hidrológica com modelos matemáticos (MOREIRA, 2016b).

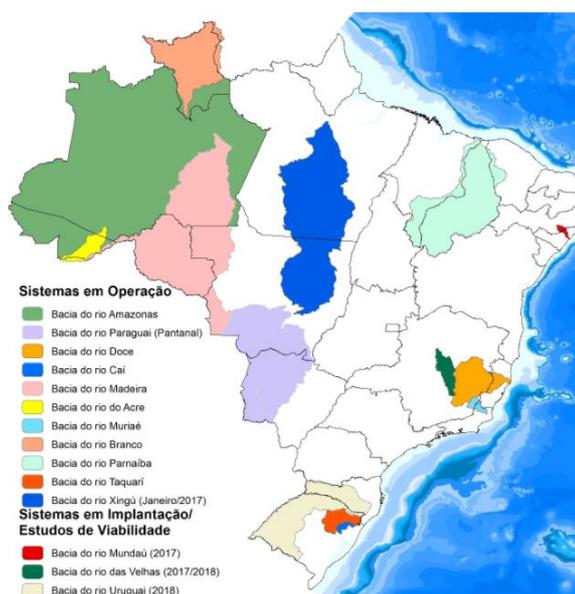
Em Meirelles *et al.* (2017) há o diagnóstico preliminar dos eventos ocorridos no dia 5 de janeiro de 2017 em Rolante, Rio Grande do Sul. O diagnóstico aponta que as áreas que sofreram escorregamento eram áreas de grande inclinação e também local de Neossolos, os quais são tipicamente rasos. A Defesa Civil do RS publicou um aviso meteorológico para todo o estado na tarde do dia 4 (DEFESA CIVIL RS, 2017). Com vistas a se preparar para esses tipos de eventos o Estado do Rio Grande do Sul iniciou em 2015 a operação da Sala de Situação SEMA, que está ainda em desenvolvimento e é interligada a Agência Nacional de Águas (SEMA RS, 2017).

Figura 3. Bacias monitoradas com sistema de alerta pela CPRM.

BACIAS MONITORADAS

Os Sistemas de Alertas Hidrológicos que emitem boletins com previsões hidrológicas são:

1. Bacia do Rio Amazonas: em operação desde 1989
2. Bacia do Rio Paraguai (Pantanal): em operação desde 1994
3. Bacia do Rio Doce: em operação desde 1996
4. Bacia do Rio Cai: em operação desde 2010
5. Bacia do Rio Muriaé: em operação desde 2014
6. Bacia do Rio Acre: em operação desde 2014
7. Bacia do Rio Madeira: em operação desde 2014
8. Bacia do Rio Parnaíba: em operação desde 2015
9. Bacia do Rio Taquari: em operação desde 2015
10. Bacia do Rio Branco: em operação desde 2015
11. Bacia do Rio Xingu: operação a partir de janeiro de 2017



Encontra-se em fase de avaliação técnica a implantação de 3 novos sistemas, das bacias dos rios Mundaú, Uruguai e das Velhas, e até o final de 2018 a CPRM terá 14 sistemas em operação.

Fonte: CPRM (2017).

3.3. TIPOS DE MODELOS HIDROLÓGICOS E SUAS UTILIZAÇÕES

Na primeira década desse milênio, distingue-se a presença de três fases de evolução da gestão e manejo dos recursos hídricos no Brasil: desenvolvimento de modelos hidrológicos, integração desses modelos com sistemas de suporte à decisão e a união com Sistemas de Informação Geográficos, sendo que o novo desafio é consolidar a informação disponível em sistemas espaciais de suporte à decisão (SANTOS *et al.*, 2010).

Existem diferentes abordagens que podem ser utilizadas para a produção de modelos hidrológicos. Algumas utilizam uma abordagem matemática simples, outras utilizam conceitos de cálculo integral e diferencial, e ainda há aquelas que utilizam transformadas de Fourier (SHAHIN *et al.*, 1993) e inferência bayesiana (BEVEN e BINLEY, 1992).

No decorrer deste trabalho, serão utilizados termos, como equação, função, variável dependente e independente, e, portanto, faz-se necessária breve definição. Equação, do latim *aequatio*, igualação, representa uma igualdade entre quantidades ou funções, não havendo uma variável explicitamente dependente (SOARES, 1995). Já o termo função implica a existência de uma relação entre um domínio e uma imagem, em que necessariamente expressará uma variável dependente em função de uma ou mais variáveis independentes (WALKER, 1988). Uma variável independente representa alguma quantidade qualquer e, no âmbito de uma função, está livre para variar, podendo ser vista como o dado de entrada, e variável dependente é função de outra variável, não estando assim livre para variar, podendo ser entendida como dado de saída (ANTON *et al.* 2007).

Sistema é um esquema, real ou abstrato, que relaciona uma lógica de casualidade entre duas ou mais variáveis (DOOGE, 1973). Já um modelo é uma representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem simples, buscando respostas (dados de saída) para diferentes dados de entrada (TUCCI, 2005). As relações entre entradas e saídas são tipicamente expressadas nos modelos através de funções.

Como citado anteriormente, há uma gama considerável de modelos hidrológicos existentes na literatura. Tucci (2005) classifica os modelos em função do

tipo do modelo e objetivo funcional do modelo. O tipo de modelo pode ser descrito por três fatores:

O primeiro fator é a variabilidade espacial no modelo. Diz-se que um modelo é concentrado quando as variáveis não se alteram em função do espaço, estando tipicamente submetidas apenas a variações temporais (TUCCI, 2005). Do contrário, categoriza-se como distribuído. Ainda na mesma referência Tucci (2005) elucida que na prática nenhum modelo é puramente distribuído uma vez que sempre há uma discretização numérica, que de certa forma torna o modelo concentrado em suas pequenas subdivisões.

O segundo fator decorre da inserção de considerações probabilísticas na estrutura do modelo. Segundo Chow, (1964 *apud* Tucci, 2005), são modelos estocásticos aqueles que expressam uma chance ou possibilidade de ocorrência de um evento, enquanto modelos determinísticos contrapõem ao expressar uma lei definida que não se vale da probabilidade de eventos. Em outras palavras, nos modelos estocásticos, uma mesma entrada sob as mesmas condições iniciais pode levar a diferentes valores de saída, devido a fatores aleatórios presentes nos modelos (MOREIRA, 2016b). Tucci (2005), explica o conceito de “caos determinístico”: quando o sistema é não linear e altamente dependente das suas condições iniciais, a resposta pode aparentar ser uma variável aleatória, e que testes estatísticos e estocásticos podem ser aplicados.

O terceiro fator vincula-se a consideração de processos físicos. Classifica-se como conceitual aquele modelo que parte de processos físicos em seu fluxograma de elaboração, já aqueles outros que partem de empirismo, buscando se ajustar a dados observados, são tidos como empíricos (TUCCI, 2005). Esses últimos são conhecidos como “modelos caixa-preta” (CHAU *et al.*, 2005) e são tipicamente de mais fácil desenvolvimento, porém apresentam maior incerteza em situações de extrapolação (TUCCI, 2005). Tucci (2005) comenta que certos autores subdividem conceitual em semi-conceitual e físico, pois alguns modelos, embora representando a física do sistema, fazem uso de algumas equações empíricas (Lei de Darcy, Horton, etc...). A grande dificuldade dos modelos puramente físicos está em conhecer com precisão a variabilidade espacial dos processos, e estimar os parâmetros, implicando a necessidade de ampla rede de monitoramento (PEDROLLO e PEDROLLO, 2013; TUCCI, 2005).

Segundo Beven e Binley (1992) modelos de muitas variáveis costumam apresentar virtualmente mais que uma possibilidade de ajuste de parâmetros para mesma série de dados. Por isso deve-se prezar pelo princípio da parcimônia na modelagem.

Quanto ao objetivo funcional do modelo, pode-se classificar o modelo em de comportamento, otimização, ou planejamento (TUCCI, 2005). Os de comportamento buscam estudar as repostas do sistema para diferentes entradas e alteração de características. Os de otimização servem tipicamente para quantificar cenários de minimização de perdas, como, por exemplo, testar diferentes modos de operação de reservatórios, com vistas a garantir pouca racionalização de água para um município. Os modelos de planejamento são instrumentos usados para estudar o comportamento do sistema e simular impactos secundários para a econômica e sociedade de um local.

Abaixo seguem alguns exemplos de modelos utilizados no meio da hidrologia e hidráulica.

O modelo hidrológico MGB-IPH é classificado como semi-distribuído e semi-conceitual (PONTES *et al.*, 2017), pois subdivide a bacia em células menores e utiliza equações que dependem de parâmetros nem sempre conhecidos. Esse modelo foi desenvolvido para o estudo e simulação de processos hidrológicos em grandes bacias, tendo sido já utilizado para previsão de inundação no rio Uruguai (COLLISCHONN *et al.*, 2005)

O modelo SWAT, *Soil and Water Assessment Tool*, é distribuído, determinístico e semi-conceitual. O objetivo do modelo é prever o impacto perante diferentes manejos da água, de sedimentos e produtos químicos agrícolas em bacias de meso a macroescala. Ele é composto por balanços de massa realizados em compartimentos hídricos, como interceptação da vegetação, gelo e degelo, solo, aquífero raso e aquífero profundo. O seu uso é empregue pela EPA (*United States Environmental Protection Agency*), pelo NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration/USA*), por universidades e consultores ambientais (ECKHARDT *et al.*, 2002).

Largamente utilizado em hidrologia para estimativa de vazões máximas em uma bacia hidrográfica com base na precipitação, o Método Racional desenvolvido por Mulvany (1851) é concentrado, pois assume uma precipitação uniforme sobre a bacia em questão e retorna somente uma vazão máxima de saída; determinístico porque uma

vez definidos os dados de entrada, a vazão de saída é sempre a mesma; e empírico uma vez que se vale do coeficiente de escoamento superficial, o qual é obtido experimentalmente segundo análise de uma gama de bacias (DOOGE, 1974). Esse é um modelo que depende de três dados de entrada: coeficiente de escoamento superficial que está relacionado ao tipo de superfície sob a qual a chuva incide e escoar, intensidade da chuva de projeto, e área da bacia hidrográfica (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). Ele foi desenvolvido com o objetivo de estimar vazões máximas em bacias hidrográficas, com vistas tipicamente a projetar canais de drenagem para drenar vazões máximas (DOOGE, 1974).

O modelo IPH2 é um modelo concentrado, determinístico e conceitual. Esse modelo foi desenvolvido para transformar a chuva em vazão em bacias rurais e urbanas (TUCCI *et al.*, 1981 *apud* GERMANO *et al.*, 1998). Na versão WIN_IPH2, a representação física do modelo se baseia em quatro algoritmos: perdas por interceptação e evaporação; separação de escoamento pelo algoritmo de Berthelot; propagação superficial pelo método de Clark e a propagação subterrânea por reservatório linear simples (GUTIERREZ, 2015).

O modelo SMAP, *Soil Moisture Accounting Procedure*, é um modelo concentrado, determinístico e conceitual, que pode transformar chuva em vazão. Esse foi concebido em 1981 (LOPES *et al.*, 1982 *apud* CASTANHARO *et al.*, 2007) e ainda hoje é utilizado no meio da modelagem hidrológica (ONS, 2013). A principal serventia do modelo é quanto a sua simplicidade e o uso de apenas seis parâmetros. Metade desses são considerados fixos, enquanto os outros são ajustados conforme os dados de séries históricas. Os parâmetros fixos são referentes a constante de recessão do escoamento, a de interceptação e evaporação, e a capacidade de retenção de água do solo (também conhecido como capacidade de campo) (CASTANHARO *et al.*, 2007). Os parâmetros calibráveis estão relacionados ao movimento da água na zona insaturada do solo, à constante de recessão do escoamento superficial, e a capacidade de saturação do solo.

O modelo ARIMA, estudado por Box e Jenkins (1976, *apud* SHAHIN *et al.*, 1993), trata de modelar uma série histórica univariada e estacionária que demonstra apresentar memória em relação as suas realizações passadas (LIU e HUDAK, 1992; FERREIRA, 2012; FLORES, 2015). No processo, estima-se uma combinação de

operadores lineares que visam descrever o comportamento da série (LIU e HUDAK, 1992). Esse modelo é usado para previsões, identificação de componentes, e análise de parâmetros (FLORES, 2015). Esses modelos não são capazes de representar a não-linearidade, e a variabilidade espacial e temporal, normais do processo chuva-vazão (FERREIRA, 2012). Podem ser classificados então em concentrados porque modelam uma série histórica de um ponto em específico, podendo ser estocásticos ao considerar limites de confiança e empíricos, pois são gerados da série histórica sem maiores considerações físicas.

A modelagem a partir de regressão linear multivariada trata de prever valores futuros de uma variável fundamentando-se em séries históricas (NAGHETTINI e PINTO, 2007). No meio dos recursos hídricos e da modelagem hidrológica, esse modelo é utilizado tipicamente para previsão de cotas ou vazões a jusante, baseando-se em dados de montante (FAN, 2015; OLIVEIRA, 2010; ECKHARDT, 2008, e BOTH *et al.*, 2008). Oliveira (2010) ainda não só salienta a importância de séries históricas de estações hidrológicas que alimentam esse tipo de modelo de previsão, mas também a importância de estações telemétricas no monitoramento dinâmico do nível do rio para saber quando o rio está subindo. Quanto à espacialidade esse modelo pode ser classificado como concentrado, embora em seu desenvolvimento ele possa apresentar algum caráter distribuído dependendo da distribuição espacial das estações a montante sob a bacia. Esse modelo é dito determinístico porque busca determinar uma lei, embora faça uso de probabilidade em sua elaboração, e empírico, pois busca se adequar aos dados observados em estações hidrológicas.

Inspirada no estudo dos neurônios humanos e evoluída a partir do modelo de McCulloch e Pitts (1943), a modelagem baseada em Redes Neurais Artificiais vem sendo bastante usada na previsão de vazões em rios (FERREIRA, 2012). Dois modelos de redes neurais artificiais foram elaborados e treinados para a previsão de níveis na bacia do rio Caí em São Sebastião do Caí e Montenegro (PEDROLLO e PEDROLLO, 2013). Ambos os modelos foram treinados usando séries históricas de estações fluviométricas e pluviométricas de 01/01/1991 a 31/03/2011. Os modelos para a bacia do rio Caí são empíricos (PEDROLLO *et al.*, 2011), pois são treinados, ou ajustados, segundo um grupo de série de dados de entrada, concentrados, e determinísticos, pois são representados por equações que não levam em conta probabilidade.

Os passos comuns para formulação de um modelo hidrológico são: identificação e consistência de dados disponíveis, escolha do modelo segundo testes estatísticos, calibragem de parâmetros e aferição dos modelos.

Há certos cuidados que devem ser tomados, porém, durante a calibragem: o superajustamento de dados. Esse pode comprometer a capacidade de generalização do modelo para novos eventos. Pedrollo e Pedrollo (2013) apontam que para redes neurais artificiais, por exemplo, o treinamento excessivo leva a reprodução de erros e aleatoriedades dos próprios dados. Dornelles (2007) aponta que após 30 ciclos de treinamento, ou ajustamento de parâmetros, os ganhos no desempenho de modelos de redes neurais artificiais é pequeno. A divisão da série histórica entre período utilizado para calibração e período para aferição é importante justamente para não comprometer a generalização dos modelos para eventos futuros; evitar a calibração excessiva para um período.

Em artigo de Kirchner (2006) o autor sugere que uma direção promissora a ser tomada para o avanço da hidrologia é a troca dos modelos lineares “caixa preta” por modelos “caixa cinza”. Isto é, modelos que exibam melhor o comportamento não-linear e não aditivo, característico dos processos hidrológicos. Conforme o mesmo autor, a hidrologia não deve buscar apenas montar o modelo que forneça as respostas “certas”, mas que o embasamento teórico, isto é, as hipóteses subjacentes, estejam também “certas”.

Visando encontrar respostas e motivos certos, Meyer *et al.* (2017) promoveram análise de aferição do modelo MGB-IPH aplicado na bacia do rio Purus, Amazônia. O modelo MGB-IPH utiliza dados de chuva como entrada e algumas estações controle espalhadas pela bacia. Para ajustar os grupos de coeficientes, referentes a sub processos do ciclo hidrológico, algoritmos de otimização são utilizados até obter hidrogramas modelados semelhantes aos observados. Não diferente de outros modelos hidrológicos, há mais do que um conjunto possível de adoção de parâmetros que levem a minimização dos erros finais. Meyer *et al.* (2017) escreveram ser esse um ponto deficiente. No caso do MGB-IPH, abordado no artigo, mesmo que o hidrograma observado nas estações controle esteja sendo bem representado, pode ser que os coeficientes calibrados sejam fisicamente absurdos, levando a previsões incorretas. A análise sugerida e aplicada no estudo de Meyer *et al.* (2017) consiste na comparação

cruzada entre produtos de sensoriamento remoto que medem umidade do solo, evapotranspiração, altimetria e área inundada, com os coeficientes ajustados para no MGB-IPH. Essa é uma abordagem que não poderia ser aplicada para modelos empíricos, pois os coeficientes não apresentam a priori embasamento físico claro.

Ainda, fala-se coloquialmente que um modelo pode ser chuva-vazão, chuva-cota, vazão-vazão, vazão-cota, ou ainda cota-vazão. Essa classificação é usada para informar rapidamente que tipos de dados são considerados no modelo, sendo expressos como “entrada-saída”. Acima foi comentado sobre modelos cota-cota, os quais costumam utilizar em suas formas mais simples regressões lineares simples, ou múltiplas. Nesse trabalho, pretende-se aplicar o método da regressão linear múltipla devido a disponibilidade de dados e a busca por regressões mais robustas.

3.4. REGRESSÃO SIMPLES E MÚLTIPLA

Segundo Naghettini e Pinto (2007), na análise da associação entre duas ou mais variáveis, a teoria da correlação e regressão é bastante empregue. Segundo IPCC (2007), para detectar tendências e mudanças em propriedades de sistemas que estão além da variabilidade natural, os modelos de regressão, correlação e análise de séries históricas são mais comumente usados. Métodos de regressão e correlação são frequentemente empregados na detecção de relação entre tendências observadas e variáveis climáticas (IPCC, 2007).

As regressões podem ter caráter linear ou não linear. Diz-se que um sistema apresenta um comportamento linear quando o princípio da superposição é garantido (TUCCI, 2005). Quando duas variáveis independentes x_1 e x_2 contribuem independentemente para uma variável dependente y , de modo que não haja alguma interação sinérgica nem construtiva nem destrutiva entre elas, diz-se que o princípio da superposição é garantido.

Antes de se utilizar métodos de regressão se sugere medir a correlação entre variáveis, pois é através do coeficiente de correlação que será ou não indicada uma relação funcional entre as variáveis (NAGHETTINI e PINTO, 2007). Existem métodos para medir a correlação de dados paramétricos e não paramétricos. Paramétricos são aqueles que podem ser representados por uma distribuição normal contínua (FOWLER *et al.*, 2013).

Para dados paramétricos, o coeficiente de correlação linear de Pearson é calculado através da razão da covariância com o produto entre os desvios padrões das duas variáveis (FOWLER *et al.*, 2013; NAGHETTINI e PINTO, 2007). Para dados não paramétricos, faz-se uso do coeficiente de correlação de *rank* (FOWLER *et al.*, 2013).

Naghetini e Pinto (2007) comentam que a existência de correlação não implica na obrigatória relação causa-efeito entre as variáveis, e que se deve atentar a relações espúrias (*e.g.* relação entre quocientes de variáveis que apresentam o mesmo denominador, ou relação de variáveis que foram multiplicadas por uma mesma variável).

Um modelo de regressão linear é aplicado para estimar uma variável dependente em função de uma variável independente, e é adaptado para uma determinada população ou, mais comumente, para um grupo amostral (MONTGOMERY, 2012). Quando a regressão for entre duas variáveis, chama-se de regressão linear simples. Quando for entre três ou mais, chama-se de regressão linear múltipla.

Segundo Naghetini e Pinto (2007), frequentemente há uma variação entre os pontos observados e a função ajustada, e a isso se atribui o conceito de variação residual, ou variação aleatória adicional.

Uma de regressão linear simples procura modelar a funcionalidade entre duas variáveis x_1 e y no formato da seguinte equação:

$$y = a.x_1 + b + \varepsilon \quad (1)$$

Em que,

x_1 = variável independente;

y = variável dependente;

a = parâmetro estimado, coeficiente angular;

b = parâmetro estimado, coeficiente linear;

ε = erros, ou resíduos da regressão;

(adaptado de Naghetini e Pinto, 2007)

Um exemplo de regressão linear múltipla é a tentativa de modelar uma variável Y em função de x_1 e x_2 da seguinte maneira:

$$y = a.x_1 + b.x_2 + \varepsilon \quad (2)$$

Em que,

x_1 = primeira variável independente;

x_2 = segunda variável independente;

y = variável dependente;

a = parâmetro estimado, coeficiente angular;

b = parâmetro estimado, coeficiente angular;

ε = erros, ou resíduos da regressão;

(adaptado de Naghettini e Pinto, 2007)

Dentre os métodos mais utilizados para estimar os parâmetros de uma regressão linear, o dos mínimos quadrados tem posição de destaque e consiste em minimizar a soma das diferenças quadráticas entre a função ajustada e os pontos observados (MARCUIZZO, 2014; NAGHETTINI e PINTO, 2007).

Pelo processo de linearização, algumas equações embora não lineares podem ser transformadas e trabalhadas com o método dos mínimos quadrados (NAGHETTINI e PINTO, 2007). Marcuzzo (2014) apresenta também o sinônimo logaritimização, e em Quadro-resumo evidencia alguns exemplos de equações linearizáveis:

Quadro 2. Exemplos de regressões simples normalmente utilizadas. Fonte: Marcuzzo (2014).

Tipo de Equação	Equação	Linearização (logaritmização)	Variáveis Observadas	
			X	Y
1	Linear	$Y = a + bX$	X	Y
2	Exponencial	$Y = a e^{bX}$	X	ln Y
3	Logarítmica	$Y = a + b \ln X$	ln X	Y
4	Potencial	$Y = a X^b$	ln X	ln Y

Existem diversos exemplos em que se usam modelos de regressão. Com a intenção de projetar efeitos das mudanças climáticas, Choi e Fisher (2003) estimaram, usando um modelo de regressão, o aumento de danos advindos de inundações em regiões dos Estados Unidos em mais de 140% se a média e o desvio padrão da precipitação anual são aumentados em 13,5%.

Sanches (2013) utilizou o método de regressão linear para o preenchimento de falhas existentes em séries históricas de estações pluviométricas no município de

Alegrete. O método aplicado por Sanches (2013) que consiste em preencher falhas com base em séries pluviométricas de postos vizinhos foi sugerido por Oliveira *et al.* (2010).

3.5. MODELAGEM HIDROLÓGICA VAZÃO-VAZÃO E COTA-COTA NO MUNDO

Na sequência apresentam-se alguns trabalhos realizados ao redor do mundo, utilizando regressão linear simples e multivariada, com intuito de reconhecer metodologias e práticas de autores fora do Brasil.

Tapia *et al.* (2014) desenvolveram um modelo de previsão do tipo vazão-vazão para os rios Mataquilo e Maule, na região central do Chile. Os autores avaliaram 24 modelos de regressão com base em um histórico de 1000 eventos meteorológicos ocorridos entre 1999 e 2006, concluindo que os modelos foram capazes de prever vazões de pico em localidades específicas utilizando apenas vazões de montante.

Na bacia do rio Yangtze, China, Chau *et al.* (2005) realizaram comparação entre três modelos: redes neurais artificiais baseada em algoritmo genético, sistema de inferência *fuzzy* baseado em rede adaptativa, e regressão linear empírica. Cotas da estação em Han-Kou (jusante) são estimadas a partir de cotas de Luo-Shan (montante). Para o modelo de regressão foram extraídos 1.456 pares de entrada e saída no formato $(LS_{t-2}, LS_{t-1}, LS_t; HK_{t+1})$, o que representa então a relação entre as cotas dos últimos três dias em Luo-Shan com a cota em Han-Kou para o próximo dia. Utilizando um indicador de erro absoluto para os três modelos, os autores concluem que o de regressão linear apresentou maior flutuação, enquanto que o de inferência *fuzzy* a de menor flutuação. Devido ao número de parâmetros (quatro para regressão linear, 16 para redes neurais e 135 para inferência *fuzzy*), que é um ônus da inferência *fuzzy*, e ao longo tempo de processamento das redes neurais, esses dois modelos mais robustos podem ser considerados complementos para modelos convencionais. Segundo os autores, outra vantagem desses métodos é evitar a complicação de modelos físicos tradicionais, que requerem um estudo mais aprofundado de parâmetros específicos da bacia. Deve-se, porém, atentar ao superajustamento de dados.

Latt e Wittenberg (2014) realizaram comparação entre duas metodologias, Redes Neurais Artificiais e Regressão Linear Múltipla, com vistas a prever inundações no rio Chindwin, no norte de Myanmar, no sudoeste asiático. Ao olhar dos autores a falta de dados em países em desenvolvimento favorece o uso dos modelos caixa-preta para previsão em tempo real. Os modelos foram calibrados com uma série de 1990 até 2007 e foram validados com uma série de 2008 até 2011, analisando a previsibilidade de 1 até 5 dias de antecedência. Ambas as metodologias apresentaram alta acurácia na previsão de níveis de inundação, sendo o modelo de RNA superior ao de RLM, particularmente para níveis de inundação extremos.

Deparou-se com relativa dificuldade em localizar trabalhos científicos de uso puro de regressão linear simples ou multivariada para previsão de níveis fluviais. Nos exemplos aqui citados, em sua maioria os modelos de regressão linear são empregues mais como método de comparação para sustentar a valia de métodos emergentes de maior complexidade, o que faz sentido a partir do momento que há um consenso desses métodos serem bastante convencionais, ou tradicionais, e terem confirmado sua aplicabilidade como modelos de previsão (TUCCI, 2005; CHAU *et al.* 2005).

3.6. MODELAGEM HIDROLÓGICA E PREVISÃO VAZÃO-VAZÃO E COTA-COTA NO BRASIL

Dos exemplos brasileiros de modelos de regressão linear, Both *et al.* (2008) desenvolveram modelo matemático para previsão de enchentes do Vale do Taquari. O modelo consiste em três regressões lineares simples as quais foram obtidas através da análise das séries históricas de cotas máximas de cheias que foram obtidas de diversos órgãos regionais, como rádios locais e o porto fluvial de Estrela. A equação de Encantado-Estrela apresentou o maior coeficiente de determinação entre as três, de 92%. A isso, os autores acreditam que muito contribuiu a proximidade dos dois municípios. A limitação do método, segundo os autores, encontra-se quando o evento chuvoso não é espacialmente bem distribuído e conseqüentemente pode implicar numa maior contribuição lateral advinda dos afluentes.

Reis *et al.* (2016) montou modelo hidrológico cota-cota para o rio Sapucaí, utilizando regressão polinomial de grau três e dados de sete estações fluviométricas. O

objetivo foi a montagem de um sistema de alerta para o município de Itajubá - MG, onde se encontra logo a montante a estação fluviométrica Santa Rosa. Os dados fluviométricos com intervalo de uma hora dessa e de outras seis estações a montante foram consistidos, eliminando períodos de dados falhos e compreendiam um período de janeiro de 2009 até maio de 2013. Identificou-se na estação controle (Santa Rosa) todas as ascensões da onda de cheia referentes a eventos de cheia e posteriormente se selecionou dados de outras seis estações com diferentes horas de antecedência (1-11 horas). Para calibração, utilizou-se o método dos mínimos quadrados. Através do teste de aderência do coeficiente de determinação r^2 , optou-se por prever segundo três estações a montante com 4 horas de antecedência: Água Limpa, Santana e São Pedro. Selecionaram-se posteriormente dois eventos aleatórios, e usaram-se os seguintes testes para aferir o modelo: erro médio quadrático, desvio médio absoluto e coeficiente de determinação. Por fim, utilizou-se a plataforma TerraMA do INPE (2012) para desenvolver o sistema de monitoramento e alerta. A utilização dos modelos matemáticos “caixa-preta” mostrou-se eficaz, porém os autores apontaram alguns fatores que prejudicaram o modelo, como a pouca quantidade de dados e eventos para calibração (identificou-se 15 eventos de cheia) e a limitação em desconsiderar as peculiaridades da espacialização de eventos chuvosos nesses modelos.

Eckhardt (2008) produziu carta de inundação para cidade de Lajeado no Rio Grande do Sul, utilizando regressão das cotas de Lajeado em função de correlação existente com a estação de Encantado, a qual se encontra a montante. O autor ressalta que o método matemático de previsão permite o conhecimento da cota de inundação com antecedência de 5 a 6 horas em função da cota do rio Taquari em Encantado.

Encontram-se muitos outros trabalhos desenvolvidos na bacia do rio Uruguai, alguns englobando apenas partes, outros sua totalidade. Porém, nesses trabalhos se adotou uso de outros modelos hidrológicos, como ARIMAX e MGB-IPH.

Moreira (2016b) desenvolveu estudo em modelagem hidrológica empírica ao utilizar modelos auto regressivos com variáveis exógenas (AR), *i.e.* um modelo que prevê uma variável x_t baseado na hipótese de haver uma memória, uma dependência, de x_{t-1} e também de outra variável que pode se traduzir em uma estação a montante, por exemplo. Para aferição do modelo se utilizaram dois índices: o índice de NS e o índice E95, o qual exprime o erro que não é ultrapassado em 95% do tempo. Segundo Pedrollo

(2005) pode ser esse índice mais significativo que o uso do NS. Dos modelos calibrados e aferidos por Moreira (2016b) para previsão nos postos fluviométricos de Uruguaiana, Itaquí, Passo São Borja, Porto Lucena, Alto Uruguai e Iraí, comparando-se três diferentes abordagens metodológicas (sem recursividade, com recursividade, fator de esquecimento e com recursividade); temporais (intervalo de previsão de 10, 24, 34, 48, 58 e 72 horas); e espacial (variação da área controlada a montante); conclui-se que, de maneira geral, o uso de modelos adaptativos melhora a qualidade da previsão, sendo que isso se torna mais evidente quando a proporção entre a bacia controlada e a prevista diminui, configurando-se esses em ferramentas para se suprir a carência de dados.

Há também outros modelos que foram desenvolvidos para a bacia do rio Uruguai os quais, embora sejam ambos de chuva-vazão, apresentam metodologias interessantes quanto às métricas de aferição e ao comportamento da bacia do rio Uruguai, e, portanto, são brevemente mencionados nos próximos dois parágrafos.

Fan *et al.* (2017) realizaram estudo de previsão hidrológica para prever vazões de entrada para as UHE de Barra Grande e Campos Novos, na região do alto Uruguai. O modelo utilizado foi o MGB-IPH, utilizando como dado de entrada não apenas a chuva monitorada na bacia, mas também previsões meteorológicas do modelo ETA-15km, que podem ser obtidas pelo CPTEC, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Para a aferição do modelo foram utilizadas quatro métricas: coeficiente de Nash Sutcliffe, Coeficiente de Persistência, Erro Absoluto Médio e a Raiz do Erro Quadrado Médio. Os autores concluíram que se podem prever eventos de inundação com dois até três dias de antecedência para a UHE Barra Grande. Já para a UHE de Passo Novos os índices demonstraram que para até 10 dias de antecedência a previsão pelo modelo é melhor do que apenas se assumir a média histórica dos dados, e também que usar o último dado observado para previsão não é muito apropriado para antecedências maiores que 22 horas.

Pontes (2016) aplicou o modelo MGB-IPH com adição de módulo de propagação de vazão, baseado no uso do modelo inercial e representando a planície de inundação. A área de estudo foi a bacia hidrográfica do rio da Prata em sua integralidade, e ao quantificar os fluxos e armazenamentos de água em diferentes compartimentos do ciclo hidrológico, notou-se que, diferente da bacia do rio Paraguai, houve pequena influência da planície de inundação e da operação de reservatórios na

bacia do rio Uruguai. Embora a regularização da vazão dada pela operação de Itaipu tenha provocado pouca mudança nas vazões médias ao longo do rio Paraná, as vazões extremas (Q5 e Q90) sofreram alteração de forma mais significativa.

Collischonn *et al.* (2011) realizaram estudo na bacia do rio Quaraí, onde há uso intensivo de água para irrigação, encontrando centenas de reservatórios. Esse trabalho objetivou quantificar o efeito da presença de reservatórios, da captação de água dos rios, e da existência de vazão de retorno, utilizando-se o MGB-IPH. Os autores concluíram pela simulação que a Q95 na foz do Quaraí despenca de 4,9 para 0,2m³/s ao comparar um cenário natural hipotético sem a influência de açudes e a retirada de água dos corpos hídricos, com um cenário atual. Além disso, como já intuitivo, a influência sobre a vazão do Quaraí é maior quando da captação de água direta do rio do que da captação por reservatório, e, embora esse último método de irrigação contribua para a maior perda por evaporação, ele também apresenta uma segurança maior para lavoura de arroz. Além disso, Collischonn *et al.* (2011) sugerem que o remanso do rio Uruguai sobre a bacia do Quaraí é uma hipótese à não carência hídrica próxima da foz da bacia.

3.7. CENÁRIO ATUAL PARA ESTUDOS DE PREVISÃO HIDROLÓGICA NA BACIA DO RIO URUGUAI

O cenário mundial de prevenção de eventos extremos, como exposto em 3.2, exhibe hoje já portais interativos como o *Hochwasserportal* na Alemanha, o *SACE* no Brasil, e o *National Weather Service* nos Estados Unidos para difundir informações sobre os principais corpos hídricos nacionais, sinalizando previsões de situações críticas.

No Brasil o período pós-2007 é marcado pela institucionalização e pela criação de políticas nacionais voltadas para o meio ambiente. Como exemplo, a Política Nacional dos Resíduos Sólidos pela lei Nº 12.305/2010; Política Nacional de Saneamento Básico pela lei Nº 11.445/2007; e a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil pela lei Nº 12.608/2012. Portanto é de se esperar que para o devido emprego dessas tais políticas, que o meio científico auxilie com o suporte técnico resultado de estudos. Entre esses estudos necessários estão os de previsão hidrológica.

Como consta presente no SACE (Figura 3) a CPRM pretende instalar em 2018 o sistema de alerta para a bacia do rio Uruguai. Pedrollo *et al.* (2017) realizaram estudo

técnico para a instalação e operação de um sistema de alerta hidrológico para a mesma bacia e enumeraram os anos das enchentes devido a precipitações de longa duração: 1972, 1983, 1990, 1992, 1997, 2014 e 2015. Assim encontra-se espaço para um trabalho de regressão linear simples e múltipla desenvolvido para bacia do rio Uruguai.

4. MATERIAL E MÉTODOS

As etapas deste trabalho são resumidas na seguinte lista:

- a. Identificação de Dados Disponíveis;
- b. Identificar localidades críticas (Situação de Emergência – Inundação);
- c. Seleção de Estações;
- d. Consistência de Dados (Disponibilidade, Localização, Dados Inventariados, Dados Brutos);
- e. Definir valores de referência (Atenção, Alerta, Inundação);
- f. Escolha de Filtro;
- g. Definir período Calibração e Aferição;
- h. Calibração;
- i. Aferição;
- j. As regressões devem ser utilizadas? Até qual antecedência?;

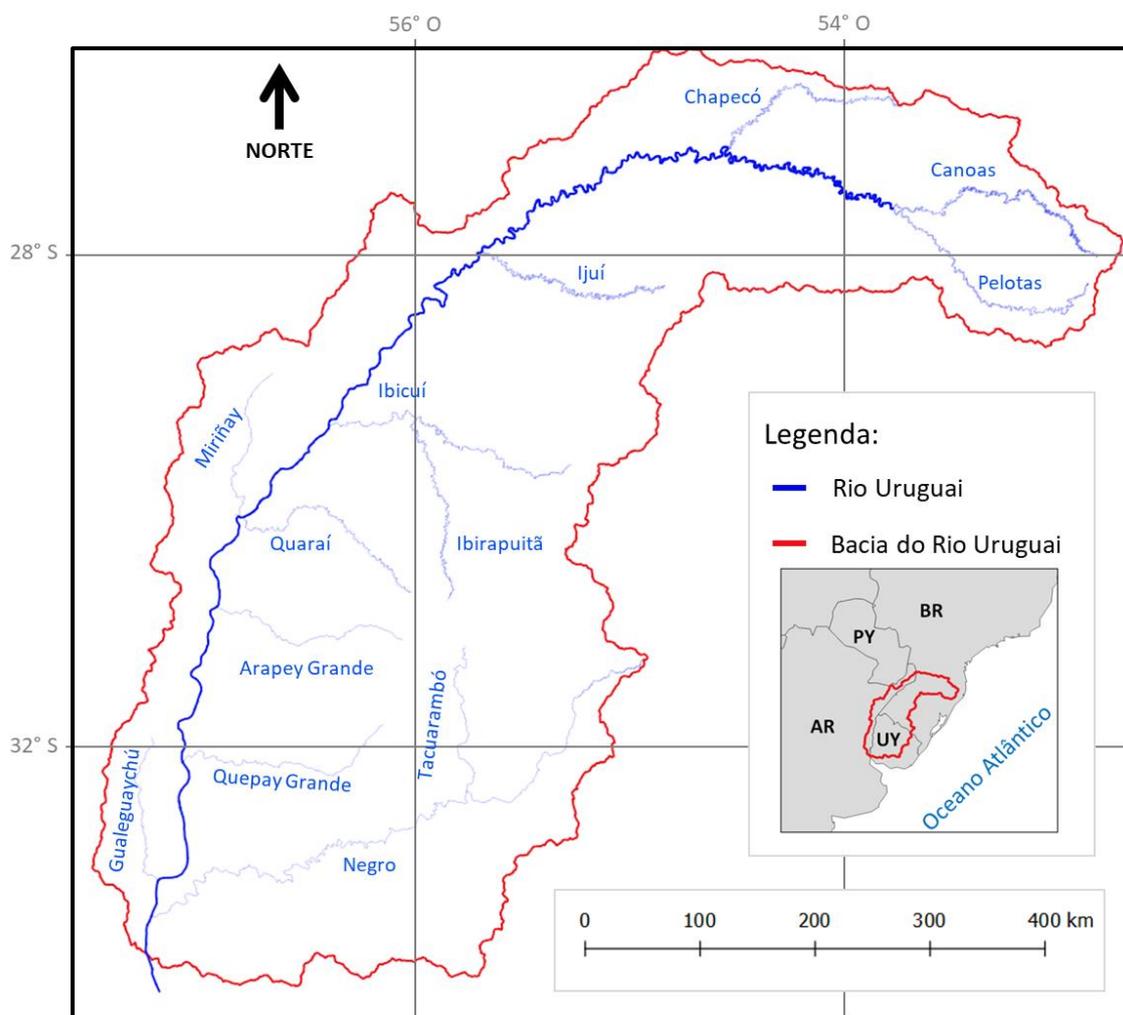
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1.1. HIDROGRAFIA

O rio Uruguai faz parte da bacia hidrográfica do rio da Prata, a qual é a segunda maior na América do Sul área de drenagem (PONTES, 2016). Após a confluência com o rio Negro, o rio Uruguai encontra sua foz no rio da Prata onde se encontra com o rio Paraná, próximo a Buenos Aires.

O rio Uruguai nasce da confluência dos rios Canoas e Pelotas em território brasileiro, e apresenta como principais afluentes de montante a jusante os rios Chapecó, Ijuí, Ibicuí e Quaraí no território brasileiro; Mirinã e Gualaguaychú no território argentino; e Arapey Grande, Quepay Grande e Negro no território uruguaio, como exhibe a Figura 4.

Figura 4. Hidrografia da bacia do rio Uruguai, principais afluentes.



Fonte: produção própria do autor do trabalho.

Na bacia do rio Uruguai, há em torno de 18% de território argentino, 50% de brasileiro e 32% de uruguaio. O comprimento do rio Uruguai é em torno de 1720 km, e ele drena cerca de 350 mil km². Ao se considerar a distância desde a nascente do rio Canoas, rio esse que drena maior área que o rio Pelotas, até a foz do Uruguai, calculam-se 2300 km de comprimento.

Como parte desse trabalho, aplicou-se a metodologia de Otto Pfafstetter de 1989 (PFAFSTETTER, 1989 *apud* ANAb) para a bacia do rio Uruguai.

Os valores calculados foram obtidos ao considerar como foz a coordenada (58,4453 O; 33,7544 S). Para estimar a área de drenagem, utilizou-se uma composição de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) do Shuttle Radar Topography Mission, com

resolução espacial de 30 m (SRTM30). Para estimar o comprimento dos rios, usou-se a base hidrográfica ottocodificada da bacia do rio Uruguai, produzida pela ANA (2016). Empregou-se metodologia de Koefender *et al.* (2017) ao recorrer à projeção conforme de Lambert de dois paralelos.

Optou-se pelo uso da base ottocodificada produzida pela ANA (2016) ao invés da extração da drenagem pelos algoritmos do GRASS (QGIS, 2017), pois essa primeira apresentou melhor traçado quando se compararam ambas as possibilidades com imagens de satélite, presentes no Quantum GIS (QGIS, 2017) pela extensão OpenLayers. Essa base ottocodificada foi utilizada posteriormente para calcular as distâncias entre as estações.

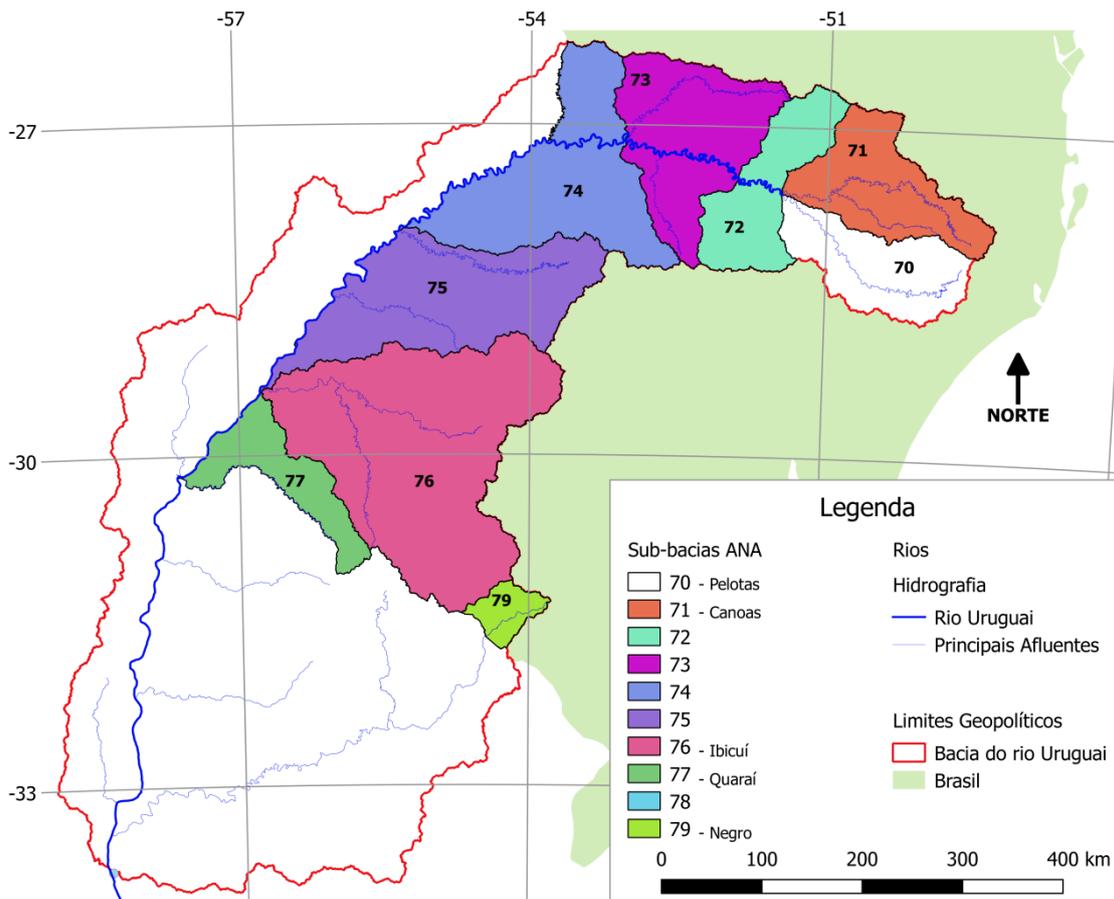
O uso dos algoritmos do GRASS apresentou pior desempenho principalmente em zonas planas.

4.1.2. OTTOCODIFICAÇÃO DA BACIA DO RIO URUGUAI

A metodologia desenvolvida por Otto Pfafstetter em 1989 é retomada no Anexo I da apostila da ANA, intitulada de Codificação de Bacias Hidrográficas pelo Método de Otto Pfafstetter (PFAFSTETTER, 1989 *apud* ANAb). Conforme presente na apostila da ANA (PFAFSTETTER, 1989 *apud* ANAb) o método consiste em: a partir da foz da bacia, deve-se subir ela, sempre optando pelo trecho de rio com maior área de drenagem em toda e qualquer confluência, para definir o rio principal; em seguida se identifica os quatro afluentes que apresentam a maior área de drenagem ao rio principal; esses de jusante para montante irão compor as sub-bacias 2, 4, 6 e 8; às sub-bacias intermediárias, dá-se o código de 1, 3, 5, 7, 9 também de jusante para montante.

Hoje a codificação utilizada pela ANA apresenta a bacia 7, bacia do rio Uruguai, da seguinte maneira:

Figura 5. Sub-bacias, bacia 7, rio Uruguai, parte brasileira.



Fonte: produção própria do autor do trabalho.

Considerou-se como foz da bacia do rio Uruguai as seguintes coordenadas: (-58.4453°; -33,7544°) utilizando o SIRGAS 2000. Esse local se encontra em torno de 8 km ao norte de Playa de Agraciada.

Para a confecção da Figura 7 e para o estudo de otocodificação, utilizaram-se 73 imagens do SRTM30 do USGS, baixadas no dia 20/06/2017 (EARTH EXPLORER, 2014). Procedeu-se unindo o mosaico das mesmas. A imagem ficou com mais de 5 GB e impossibilitava o uso do algoritmo *Watershed Analysis* do QGIS. Esse apresenta um limite de 2^{31} células para rodar. Portanto, procedeu-se com *resample*, criando SRTM300, SRTM150, SRTM90 e SRTM60.

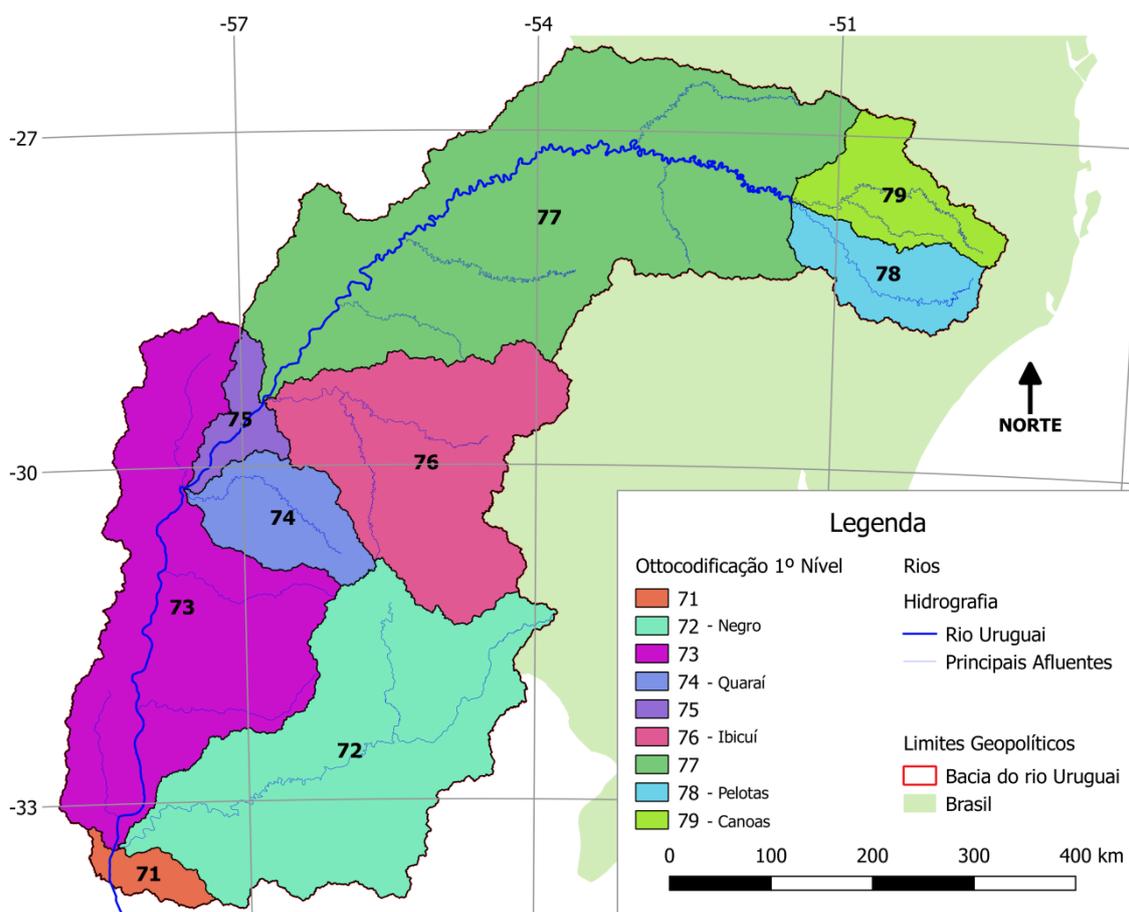
Utilizando primeiro o SRTM300, calculou-se grosseiramente os limites da bacia do rio Uruguai com foz 8km Norte de Playa la Agraciada. A partir dessa camada, recortou-se os SRTM300, 150, 90 e 60 para fazer o *Watershed Analysis*, utilizando o

mesmo ponto como foz. Anotou-se o tempo de processamento que foi de 22s, 1m17s, 5m36s e 2h40m, respectivamente.

Utilizaram-se os produtos do *Watershed Analysis* do SRTM60 para traçar as sub-bacias do rio Uruguai, com vistas à ottocodificação.

Abaixo na Figura 7 está apresentada a bacia do rio Uruguai que foi codificada pelo método de Otto Pfafstetter (1989 *apud* ANAb). A classificação apresentada está feita em primeiro nível, considerando como foz a coordenada já explicitada em 4.1.2.

Figura 6. Ottocodificação 1º nível da bacia do rio Uruguai.



Fonte: produção própria do autor do trabalho.

Ao se comparar a Figura 6, ottocodificação de primeiro nível da bacia 7, com a Figura 5, nota-se que apenas a sub-bacia 76 apresenta o mesmo código. Na abordagem de codificação de bacias que foi utilizada no passado pela ANA, as bacias parecem

terem sido numeradas de jusante para montante, enquanto que a metodologia de Pfafstetter (1989 *apud* ANAb) é feita de montante para jusante.

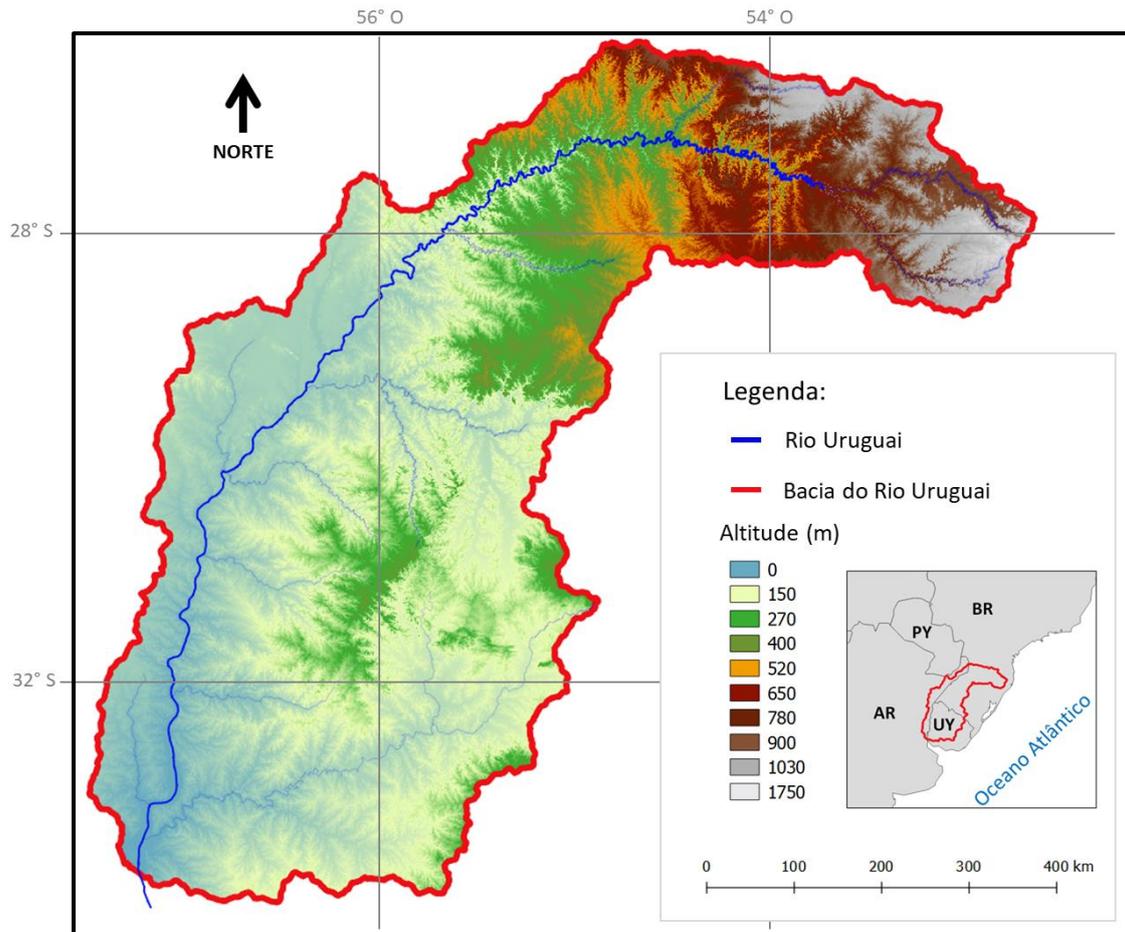
A metodologia de Otto Pfafstetter é de fácil uso apenas utilizando os algoritmos do GRASS no QGIS, excluindo-se as zonas mais planas. O uso dessa metodologia, porém, acaba por gerar algumas sub-bacias intermediárias (71, 73, 75, 77, 79) de áreas extremamente destoantes frente à grandeza daquelas dos principais quatro afluentes em área de drenagem (72, 74, 76, 78). Para exemplificar, basta visualizar a sub-bacia 71 e a 77.

Apesar disso é uma abordagem física, direta e um tanto absoluta (salvo algoritmos computacionais que ainda poderiam ser lapidados). Qualidades essas as quais são adequadas para estruturação de um modelo padrão.

4.1.3. ALTIMETRIA

A bacia do rio Uruguai tem regiões fisiográficas distintas com altitudes ligeiramente acima de 1750m na cabeceira no extremo leste da bacia, até altitudes que atingem praticamente o nível do mar, pois que após a confluência com o rio Paraná o próximo corpo hídrico é o Oceano Atlântico. Na Figura 7 consta representação hipsométrica da altimetria da bacia. Uma análise mais detalhada da altimetria da bacia do rio Uruguai é feita em Marcuzzo (2017).

Figura 7. Altimetria da bacia do rio Uruguai pelo SRTM30.



Fonte: produção própria do autor do trabalho.

4.1.4. PEDOLOGIA

Na parte do alto Uruguai boa parte dos solos é argiloso e raso, sobre uma camada de basalto de baixa permeabilidade (COLLISCHONN *et al.* 2005). Conforme estudo mais recente há pelo menos 10 tipos de solos diferentes na parte brasileira da bacia consoante a nova classificação de solos brasileira (IBGE, 2017). Em território brasileiro, identificaram-se os três mais aparentes tipos: latossolo amarelo no médio Uruguai; nitossolos háplicos no alto Uruguai; e neossolos litólicos na bacia do Quarai.

4.1.5. BARRAMENTOS

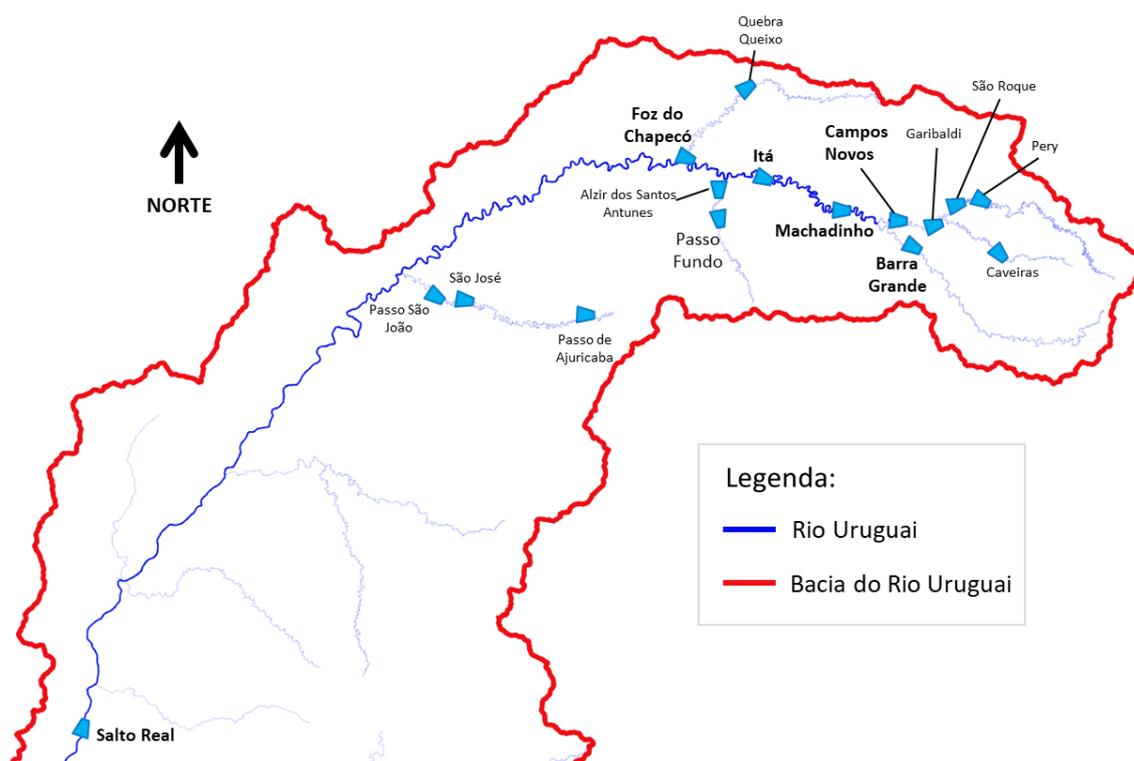
Na bacia do rio Uruguai há uma gama de Aproveitamentos Hidrelétricos (AHE): UHE (Usina Hidrelétrica), PCH (Pequena Central Hidrelétrica) e CGH (Central Geradora Hidrelétrica). No Quadro 3 consta relação dos aproveitamentos hidrelétricos segundo classificação usada em Koefender *et al.* (2017) do inventário obtido no SIGEL no dia 20 de outubro de 2017.

Quadro 3. Número de aproveitamentos hidrelétricos por estágio.

AHE	Operação ou construção	Outorga ou Implantação	Estudo para Implantação
UHE	15	1	11
PCH	59	104	98
CGH	119	-	-

Dentre as UHE de maior potência instalada, destaca-se em **negrito** na Figura 8 a presença das UHE de Itá, Machadinho, Campos Novos, Foz do Chapecó e Barra Grande no território brasileiro, e a de Salto Grande além do território brasileiro, próxima à cidade de Salto, Uruguai. Com a exceção da UHE Salto Real, há uma concentração desse tipo de AHE na parte do Alto Uruguai. Diagramas unifilares detalhados da parte brasileira da bacia do rio Uruguai (sub-bacias 70 a 79), com diversas informações de interesse de estudos hidrológicos sistematizados, podem ser observados em Almeida *et al.* (2016), Koefender e Marcuzzo (2016) e Souza *et al.* (2017).

Figura 8. Barramentos presentes na bacia do rio Uruguai.



Fonte: Adaptado do inventário de Barramentos SIGEL do dia 20/10/2017.

4.1.6. CLIMATOLOGIA

Quanto à climatologia da região, há a influência de três massas de ar distintas: a Massa Polar Atlântica (MPA), Massa Tropical Atlântica (MTA) e a Massa Equatorial do Continental (MEC).

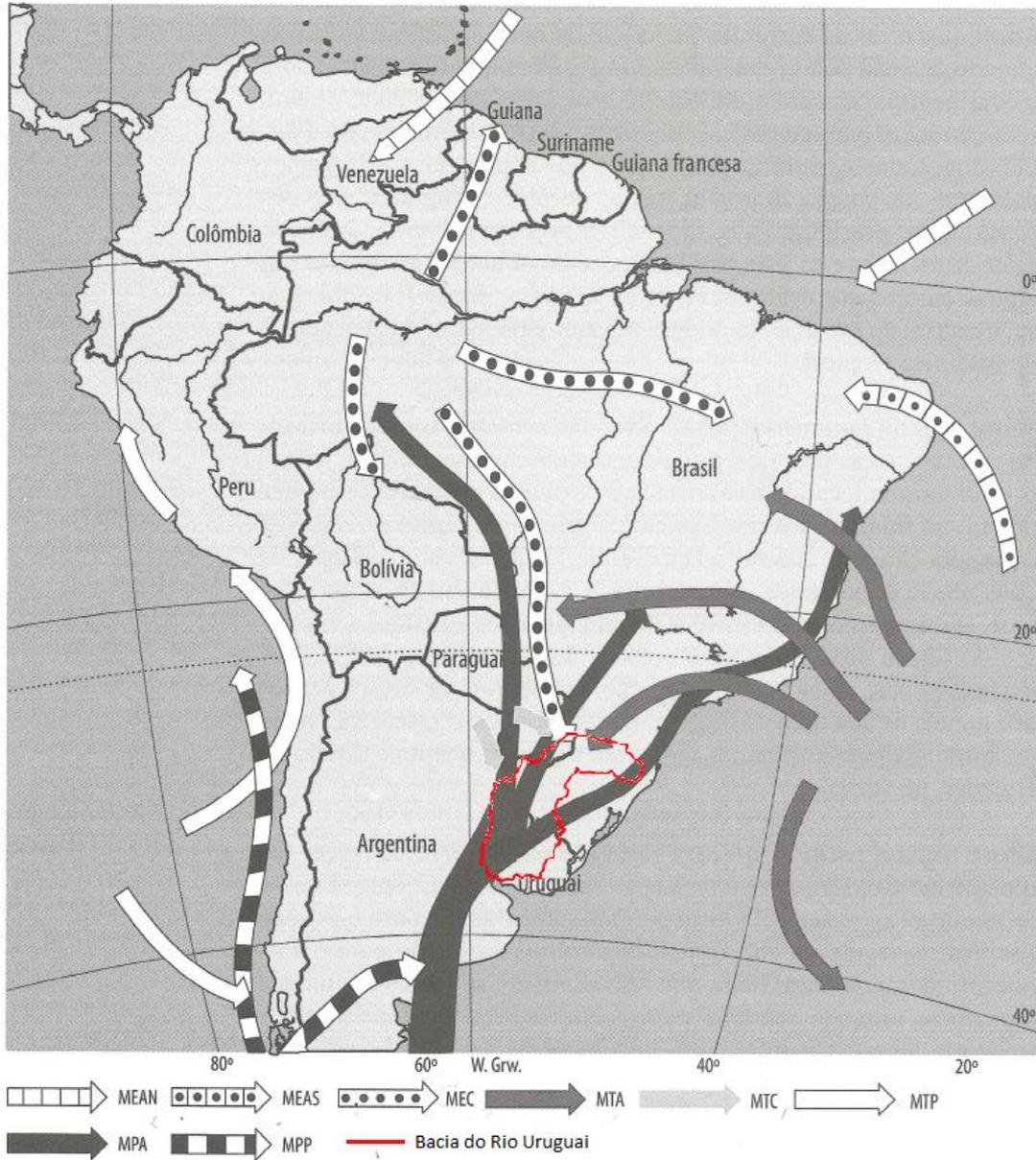
A MEC é originada da célula de divergência dos ventos alísios e é incomumente úmida para uma massa de ar continental por se formar sobre a Mata Amazônica e sofrer influência também da Massa Equatorial do Atlântico Norte. A MEC atinge a bacia do rio Uruguai vinda pelo norte e noroeste.

A MTA destaca-se ao influenciar consideravelmente os tipos climáticos no Brasil, sendo de temperatura e umidade elevada e causando considerável precipitação na porção litorânea devido à orografia, portanto assim atingindo a bacia do rio Uruguai nas zonas de cabeceira à leste próximas ao litoral.

A MPA de característica fria e úmida tem origem na altura centro-sul da Patagônia e se divide em dois ramos próximo a foz da bacia do rio Uruguai. O ramo

continental segue as calhas do relevo da bacia do rio da Prata é ao que se associam a queda da temperatura no inverno e os reduzidos índices de umidade do ar.

Figura 9. Massas de ar atuantes sobre a bacia do rio Uruguai.



Fonte: adaptado de Mendonça e Danni-Oliveira, 2007.

Utilizando a classificação conhecida como Köppen-Geiger (KÖPPEN, 1936) e baseada em Mendonça e Danni-Oliveira (2007), Moreira (2016b) apresenta a bacia do rio Uruguai segundo dois climas: Cfa e Cfb. Segundo a autora, o clima subtropical úmido com verão quente (Cfa) acontece nas regiões baixas da bacia, enquanto o

subtropical úmido com verão ameno (Cfb) em zonas altas. Verão quente significa temperatura média do mês mais quente ser superior a 22C, e quando menor é tido como verão ameno (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007).

4.2. DADOS HIDROLÓGICOS

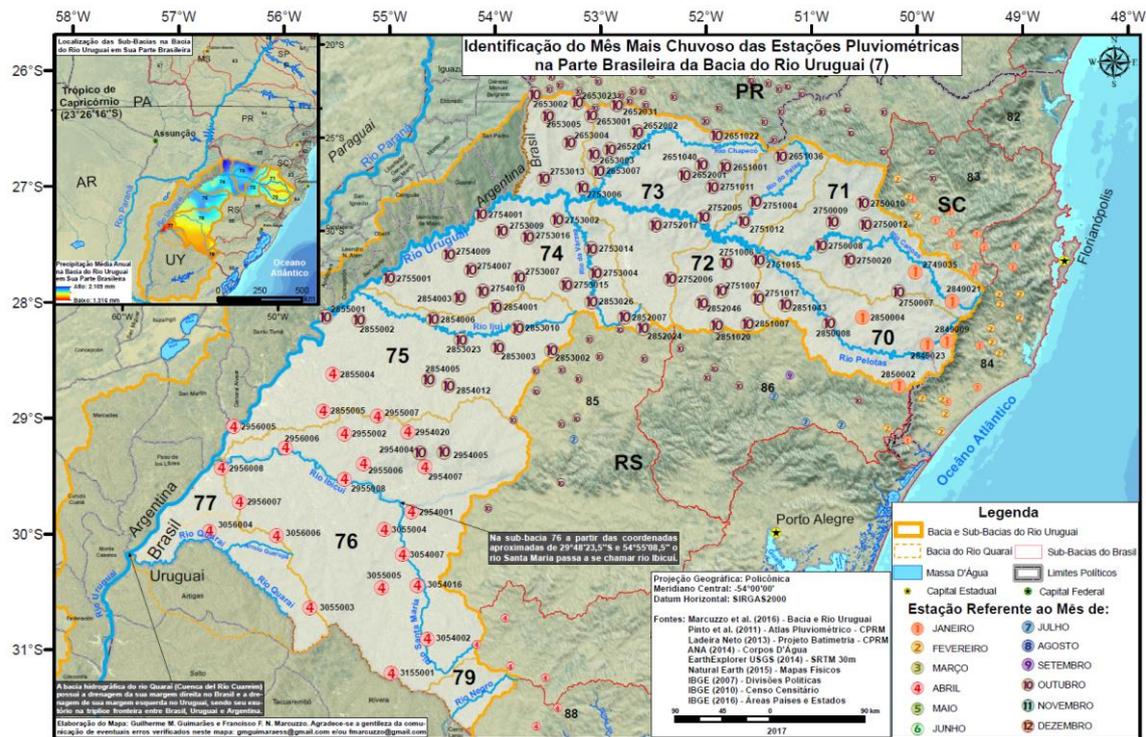
4.2.1. DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Neste trabalho estudos da pluviometria do Uruguai são importantes para auxiliar a escolha preliminar das estações, pois indicam onde atua a principal forçante dos eventos de cheia e inundação: a chuva.

Guimarães *et al.* (2017) analisaram a espacialização da precipitação média mensal e trimestral para a área brasileira da bacia do rio Uruguai com dados de 1977 até 2006, os quais estão disponibilizados do Atlas Pluviométrico do Brasil (PINTO *et al.*, 2011). O mês de outubro é o mês com maior pluviosidade e o de agosto é o menor. O mês de outubro também é aquele que apresenta maior diferença espacial de pluviosidade, e o de novembro é o mais espacialmente homogêneo. Nos primeiros meses de inverno, a pluviosidade se concentra mais na região do Ibicuí e nos últimos na região do Ijuí.

Os valores mais altos de pluviosidade média trimestral ocorrem em Outubro-Dezembro. No mesmo trabalho, os autores citam trabalho de Pinto *et al.* (2011) que apresenta o mês em que as estações pluviométricas captaram as maiores pluviosidades. Em abril, ocorrem as chuvas máximas no Ibicuí, e em outubro no Ijuí (Figura 10).

Figura 10. Identificação do mês mais chuvoso das estações pluviométricas na parte brasileira da bacia do rio Uruguai.



Fonte: Guimarães *et al.* 2017.

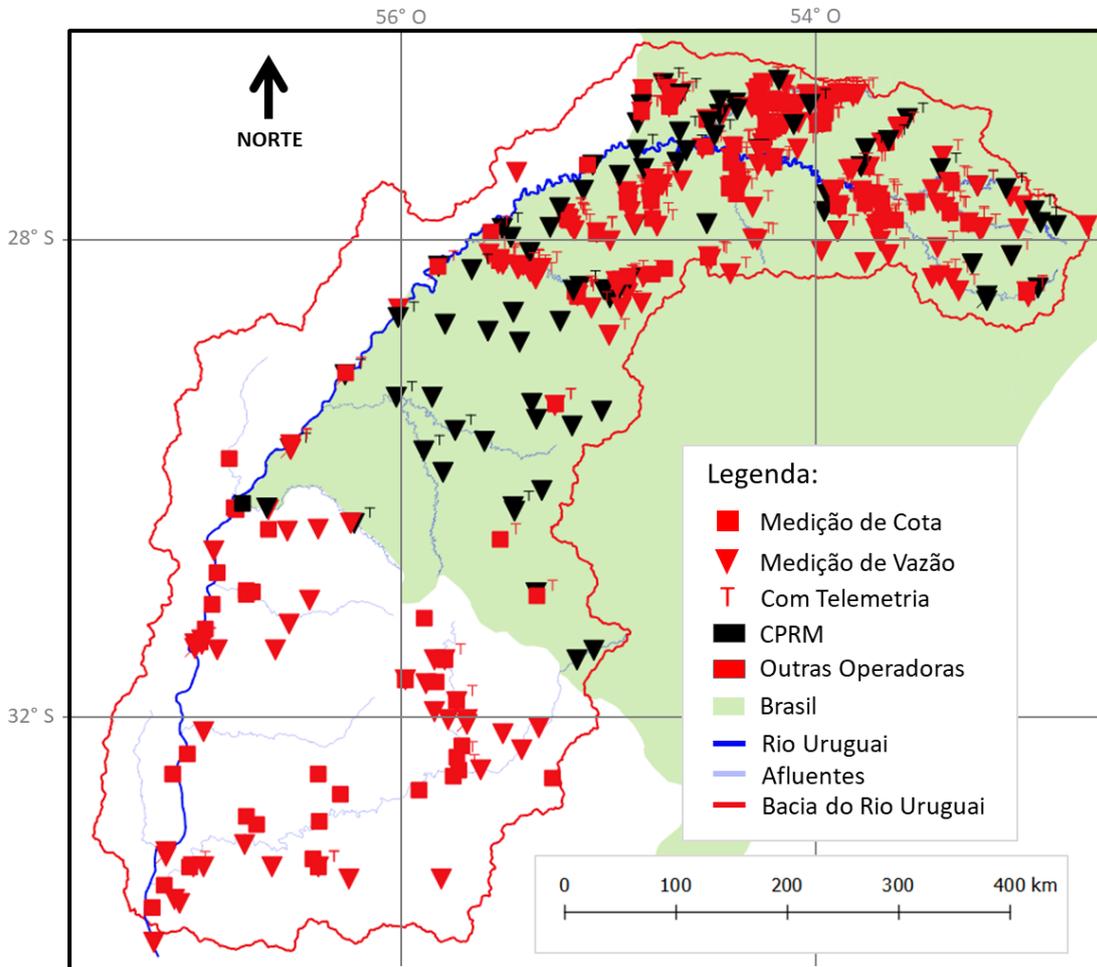
A precipitação média mensal não demonstrou sazonalidade marcada, com valores quase todos entre 150 e 200 mm, exceto para o mês de outubro em que se identificou o valor de 250 mm.

A análise trimestral da espacialização das chuvas apontou chuvas localizadas na zona média e média-alta entre os meses de abril-setembro.

4.2.2. DADOS FLUVIOMÉTRICOS

No portal Hidroweb da Rede Hidrometeorológica Nacional da ANA, encontraram-se 377 estações fluviométricas no inventário do dia 6 de outubro de 2017, presentes na bacia do rio Uruguai, como consta na Figura 11.

Figura 11. Estações hidrológicas, excluindo as de qualidade da água.



Fonte: produção própria do autor do trabalho.

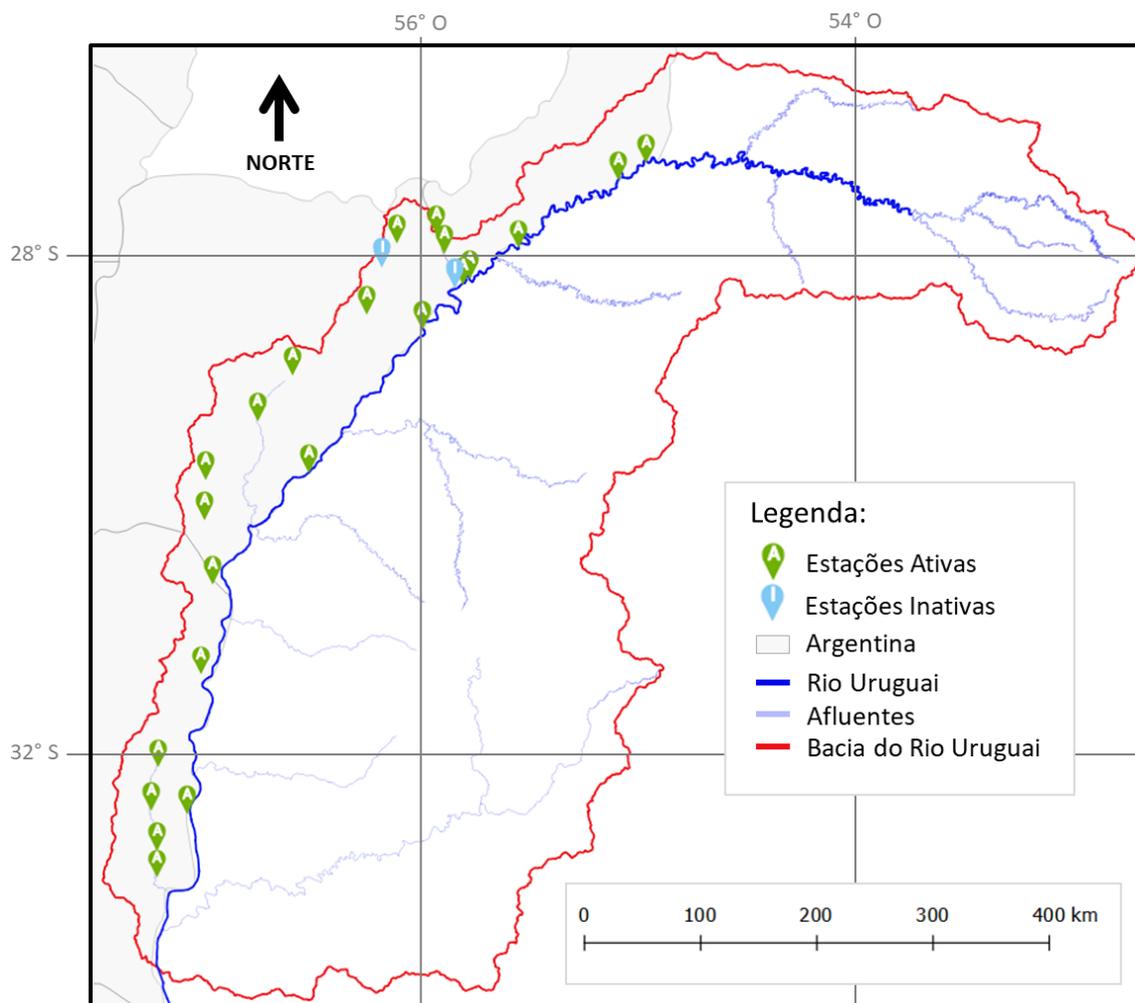
Dentre as estações algumas apresentavam dados, outras não. Optou-se por utilizar estações que estavam com dados presentes no portal e cujas séries históricas eram suficientemente grandes. A estação Itapiranga, 74329000, com série histórica a partir de 2015 não foi utilizada, assim como também não se utilizou a estação CGH Pirapó Jusante, 75371000, por não possuir dados, embora essa tenha sido instalada em primeiro de janeiro de 2002, por exemplo. Os dados dessa última estação poderiam ter sido muito úteis porque expressariam a influência do rio Ijuí para o rio Uruguai.

Mesmo ao entrar em contato com a empresa CPFL Sul Paulista, a qual consta como operadora da estação CGH Pirapó Jusante, não houve retorno. Tampouco se conseguiu o acesso aos dados dessa estação via Portal de Acesso à Informação.

No território argentino, dados hidrológicos podem ser encontrados na *Base de Datos Hidrológica Integrada* (BDHI), que é similar ao nosso Hidroweb brasileiro. Essa base de dados é mantida pela *Subsecretaria de Recursos Hídricos* da Argentina. Foram identificadas no território argentino da bacia do rio Uruguai 22 estações ativas e duas estações inativas. Todas apresentam dados de cota, no espanhol *altura*, exceto a estação Gualgaychú (código 3028). Dentre as estações ativas, apenas oito estão no rio Uruguai.

Embora os dados dessas estações do território argentino da bacia sejam de fácil obtenção, optou-se por não os utilizar nesse estudo porque a dificuldade de obter informações das estações uruguaias limitou o estudo à área da bacia a montante de Barra do Quaraí. Mesmo assim segue abaixo imagem das estações encontradas, e a referência aqui se justifica porque num futuro esses dados podem ser úteis para a pesquisa hidrológica.

Figura 12. Estações hidrométricas presentes no BDHI.



Fonte: produção própria do autor do trabalho.

Os dados brasileiros obtidos estavam em três formatos: cota diária, cota duas leituras e vazão diária. Os dados de cota diária apresentam, em sua maioria, série histórica maior e têm como intervalo temporal o período de um dia, sendo obtidos pela interface Hidroweb da ANA.

Os dados de vazão também foram obtidos pelo sistema Hidroweb da ANA e possuem intervalo de um dia, assim como os de cota.

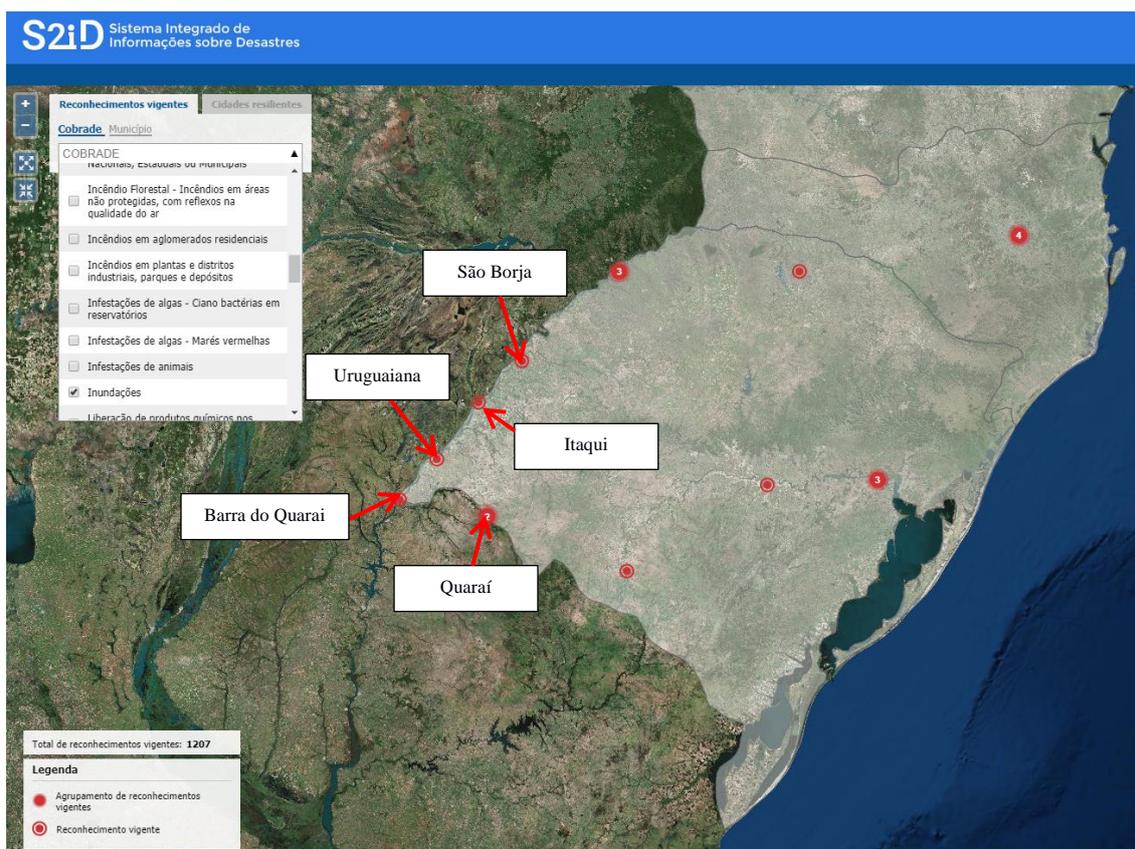
Já os dados duas leituras apresentam dois dados de cota por dia, os quais são medidos às 7h e às 17h. Esses dados estavam também disponíveis pelo portal Hidroweb, porém foram cordialmente disponibilizados pela equipe da CPRM-SUREG/PA.

4.2.3. PRÉ-SELEÇÃO DE ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DE INTERESSE

Segundo Moreira (2016b), o projeto “Sistema de Alerta Hidrológico na Bacia do rio Uruguai” instituído em 2014 pela CPRM prevê a implantação de um sistema de alerta hidrológico para atender inicialmente os tais cinco municípios: Porto Lucena, Garruchos, São Borja, Itaqui e Uruguaiiana, correspondendo a uma população de 240.000 habitantes. Apesar disso, procuraram-se informações no Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD) com vistas a se identificar quais municípios entraram em situação de emergência nos últimos anos, pois isto é um indício de quem mais se beneficiaria com um sistema de alerta.

No S2iD, pode-se visualizar o seguinte mapa interativo de municípios que declararam situação de emergência no estado do RS e SC devido a inundações até o mês de setembro no ano de 2017 e estavam sobre reconhecimento vigente.

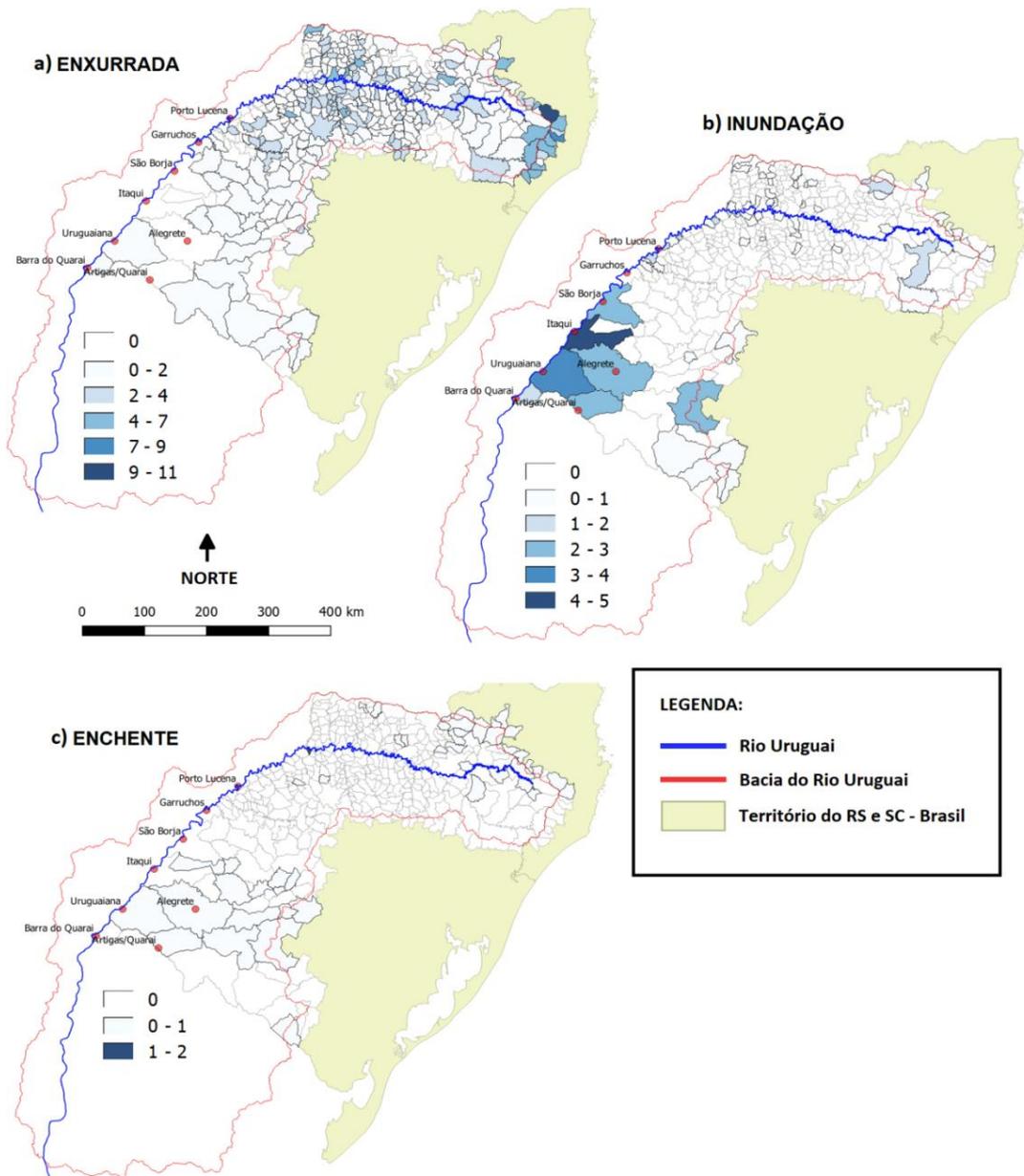
Figura 13. Municípios que entraram em situação de emergência devido a inundações em 2017 até o mês de setembro.



Fonte: adaptado de S2iD, 2017.

Do mesmo sistema, obtiveram-se séries históricas de municípios que entraram em situação de emergência de 2003 até 2016. Não se encontraram dados anteriores a 2003 no portal. Dentre as razões que levaram cada município a entrar em situação de emergência, identificaram-se as frequências absolutas de inundação, enxurrada e enchente na bacia do rio Uruguai. Os dados encontrados estavam em formato *.xlsx*, o que possibilitou a posterior importação para um programa de SIG. Abaixo segue Figura 14 que resume os dados encontrados.

Figura 14. Frequência absoluta de Situação de Emergência por a) enxurrada; b) inundação; c) enchente.



Fonte: adaptado de S2iD, 2017.

Os municípios que mais entraram em estado de emergência devido inundação são aqueles situados ao redor de Uruguiana e Itaqui, o que talvez explique a escolha feita pela CPRM. Os casos de enxurrada que levaram municípios a declarar situação de emergência são mais comuns na região do Alto Uruguai, região essa que sofre de eventos de chuva intensos demais perante a capacidade de escoamento das calhas de rios de cabeceira, são eventos tipicamente rápidos como definido em Carvalho *et al.* (2007).

Os casos de enchentes que levam a declaração de situação de emergência e que representam, até certo grau, um estágio anterior ao de inundação são menos comuns e ocorreram praticamente uma única vez durante o período de 2003-2016. Aquelas situações de emergência devido à enchente que ocorreram na bacia do rio Ibicuí foram decretadas em final de novembro de 2009, o que talvez possa estar relacionado a um evento em específico.

Dadas essa realidade e os dados disponíveis no sistema Hidroweb, pretende-se desenvolver modelos que venham a atender seis localidades: Barra do Quarai, Uruguiana, Itaqui, Passo São Borja, Garruchos, e Porto Lucena.

Escolheu-se trabalhar com estações fluviométricas que estivessem 1. próximas a essas localidades; 2. fossem telemétricas; 3. e operadas pela CPRM. Apresentar telemetria é importante porque assim o dado fornecido é com maior frequência temporal, o que é o ideal para monitorar as cotas para o alerta hidrológico. Serem operadas pela CPRM é ideal porque, numa primeira etapa de instalação do alerta, a posse sobre a estação é facilitadora.

4.2.4. DO HIDROWEB (.TXT) PARA O EXCEL (.XLSX)

A manipulação e transformação dos dados foram realizadas utilizando os programas Bloco de Notas, Excel e o Super Manejo de Dados (COELHO e FAN, 2016). Os dados obtidos em .txt do Hidroweb foram transformados facilmente em duas colunas (data e medição), utilizando o Super Manejo de Dados. Já os dados Duas Leituras que estavam em .mdb precisaram ser exportados em 7h e 17h no formato .txt e remanejados para se adequarem ao formato de entrada que o Super Manejo de Dados aceita. Após

isto foram importadas as séries 7h e 17h para o excel onde se prosseguiu com a combinação delas em duas colunas (data e medição).

4.2.5. TABELA DE IDENTIFICAÇÃO E CONSISTÊNCIA DAS ESTAÇÕES UTILIZADAS

Seguindo metodologia de Koefender *et al.* (2017) consistiram-se as informações inventarias de altitude, município e área de drenagem das estações utilizadas. Isso foi feito utilizando dados brutos de altitude do SRTM30 (EARTH EXPLORER, 2014), produtos derivados e usando a camada de municípios do IBGE de 2015 (IBGE, 2015).

Trabalho semelhante de Finck *et al.* (2017) trata explicitamente do processo de consistência dos inventários de barramento da agência elétrica nacional (ANEEL) e de estações hidrológicas da ANA.

Abaixo segue Tabela 1 das estações selecionadas e seus respectivos dados inventariais consistidos, e outros cálculos:

Tabela 1. Dados inventariais e consistências das estações utilizadas.

Codigo	Nome	Altitude (m)	Alt. SRTM30 (m)	Área Dren. (km ²)	Área Dren. SRTM30 (km ²)	Município	Município_IBGE	Declividade (%)	Distância (km)	Tempo Estimado (h)
74100000	Iraí	200	206	61900	62005	Iraí	Iraí	0.360	155.7	17.8
74500000	Alto Uruguai	120	150	82300	82343	Tiradentes do Sul	Tiradentes do Sul	0.277	202.3	32.9
74800000	Porto Lucena	83	94	95200	95262	Porto Lucena	Porto Lucena	0.265	105.5	31.5
75550000	Garruchos	54	66	116000	116085	Garruchos	Garruchos	0.047	107.1	29.1
75700000	Passo do Novo	50	68	3710	3704	São Borja	São Borja	0.083	84.3	13.6
75780000	Passo São Borja	47	61	125000	124767	São Borja	São Borja	0.094	85	19.1
75900000	Itaqui	40	53	131000	130806	Itaqui	Itaqui	0.000	100.4	18.5
76800000	Passo Mariano Pinto	51	61	42500	42463	Itaqui	Itaqui	0.053	150.5	30.5
77150000	Uruguaiana	38	53	190000	190461	Uruguaiana	Uruguaiana		78.1	12.7
77500000	Quaraí	86	95	4570	4566	Quaraí	Quaraí	0.278	172.6	41.6
77585000	Passo da Cruz	86	47	13100	13156	Barra do Quaraí	Barra do Quaraí	0.120	41.6	7.4
77590000	Barra do Quaraí	33	42	14600	14561	Barra do Quaraí	Barra do Quaraí		7.4	-

As colunas de declividade, distância e tempo estimado (da propagação da onda) exibem os valores calculados até a próxima estação, ou confluência (o que for mais próximo). Esses dados são posteriormente plotados no diagrama unifilar (Figura 15).

No item 4.3 consta a metodologia empregue para o cálculo do tempo de propagação da onda.

4.3. CÁLCULO DO TEMPO DE PROPAGAÇÃO DA ONDA

Calculou-se o tempo de propagação da onda de cheia até a próxima estação ou confluência. Isso foi feito a partir da identificação da maior velocidade média medida nas séries de resumo de descarga líquida fornecidas pela CPRM. Nesse processo se realizou breve consistência de dados ao se comparar a velocidade com a vazão e a maior profundidade da seção, pois às vezes velocidades incomumente altas eram encontradas.

Depois que as maiores velocidades médias foram identificadas, prosseguiu-se com a divisão da distância por essas, o que resultou em um tempo de propagação. Esse cálculo supõe que a velocidade não varia muito até a próxima estação, o que logicamente é uma falácia, não obstante usou-se como um indicativo do tempo de propagação da onda.

Esse método foi escolhido por ser relativamente simples. Na realidade cada onda de cheia apresentará uma diferente velocidade de propagação que está associado tanto à altura da onda (CHOW *et al.*, 1988), como também ao aumento rugosidade do perímetro molhado que atua como um agente retardador, principalmente do extravasamento para a planície de inundação. A celeridade da onda é dada pela razão entre a variação de vazão e a variação da área da seção que essa onda apresenta; em eventos de cheia a área tipicamente aumenta rapidamente ao extravasar para as planícies de inundação enquanto a vazão não, retardando por fim a onda. Há ainda outro fator que é a contribuição de afluentes no percurso que adicionarão outras ondas, como num processo de convolução. Também, espera-se que ocorra a atenuação do pico e achatamento da onda. Enfim, haveria uma complexidade maior que poderia ter sido considerada, mas não era este o foco principal do estudo.

Ainda assim, embora esse método utilizado possa implicar em superestimavas da velocidade, ele também está a favor da segurança por supor que a propagação será um tanto mais rápida.

4.4. CONSTRUÇÃO DE DIAGRAMAS UNIFILARES E A CONSISTÊNCIA DE DADOS INVENTARIAIS

Para uma melhor visualização de dados sequenciais, utiliza-se aqui a metodologia dos diagramas unifilares de Koefender *et al.* (2017). Diagramas unifilares são diagramas dos corpos hídricos aos quais se adicionam informações sobre estações fluviométricas, pluviométricas, barramentos, e distâncias relativas entre localidades, como encontros de rios. Guimarães *et al.* (2017) confeccionaram uma série de diagramas unifilares para as sub-bacias 80-84, em que se concatenaram dados de inventários de barramentos e estações hidrológicas.

O diagrama unifilar é apresentando na Figura 15, quando já se apresenta as regressões desenvolvidas.

4.5. REGRESSÕES DESENVOLVIDAS

O diagrama unifilar apresenta as estações utilizadas nesse trabalho, bem como as relações buscadas (cuja indicação é feita pelas flechas vermelhas) para as regressões calibradas (Figura 15). Diagramas unifilares detalhados da parte brasileira da bacia do rio Uruguai (sub-bacias 70 a 79), com diversas informações de interesse de estudos hidrológicos sistematizados, podem ser observados em Almeida *et al.* (2016), Koefender e Marcuzzo (2016) e Souza *et al.* (2017).

No Quadro 4, apresentam-se as variáveis explicadas e explicativas, salientando o tipo de dado que foi pré-selecionado para cada regressão.

REGRESSÃO	Tipo de Variável								Tipo de Dados		
	Explicada	Explicativa1	Explicativa2	Explicativa3	Explicativa4	Explicativa5	Explicativa6	Explicativa7	Cota	2 Leituras	Vazão
1. Porto Lucena	74800000	74500000	74100000	74800000	-	-	-	-	X	X	
2. Garruchos	75550000	74800000	75550000	-	-	-	-	-	X	X	X
3. São Borja	75780000	75550000	75700000	75780000	-	-	-	-	X	X	X
4. Itaqui	75900000	75550000	75700000	75780000	75900000	-	-	-	X	X	X
5. Uruguiana	77150000	75900000	76800000	77150000	-	-	-	-		X	X
6. Barra do Quaraí	77590000	77585000	77500000	77590000	-	-	-	-	X	X	
7. Rio Uruguai Total	77150000	74800000	74500000	74100000	75550000	75780000	75900000	77150000	X	X	

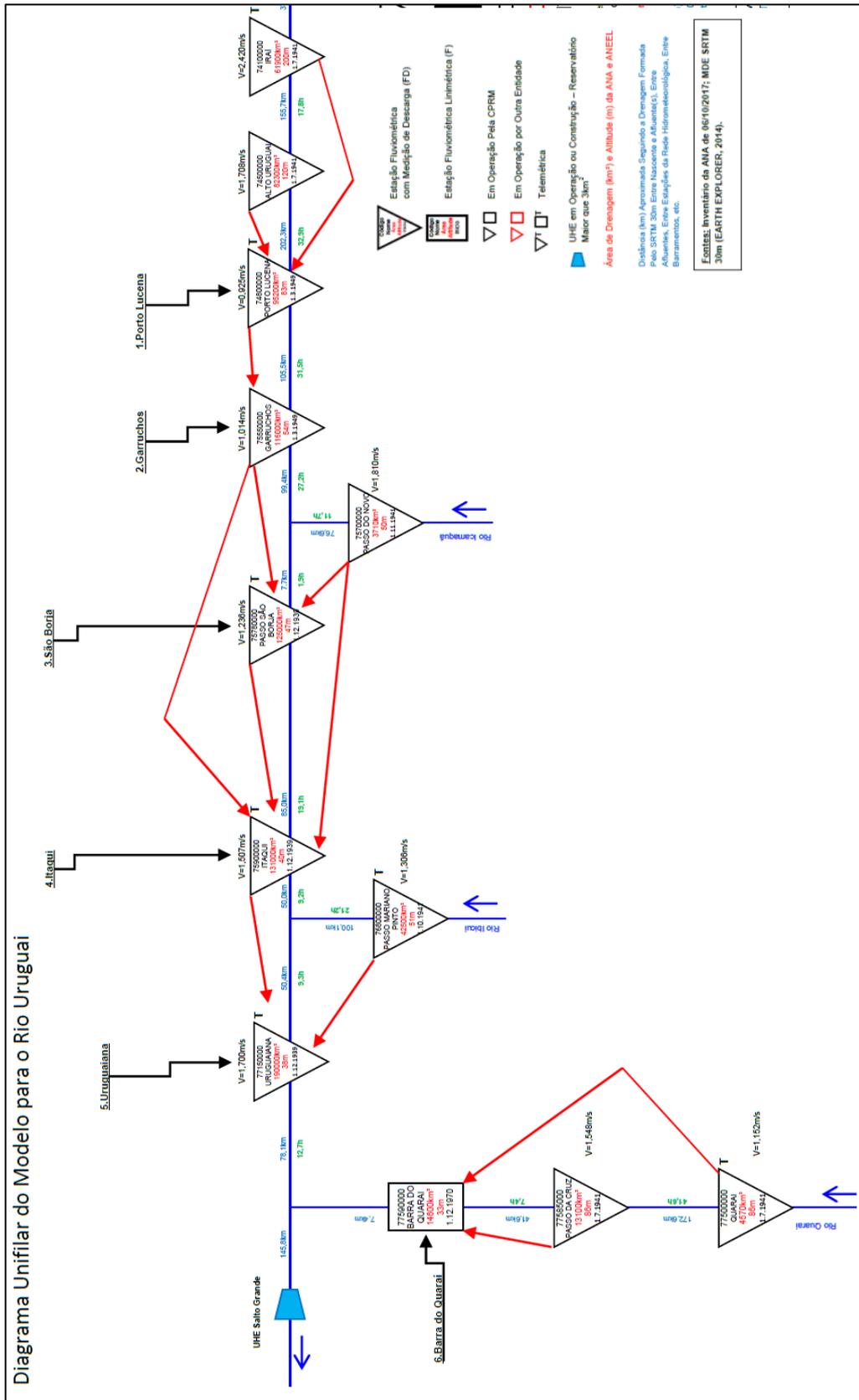
Quadro 4. Relação variável explicada e explicativa por regressão.

Procurou-se trabalhar, principalmente, com modelagem cota-cota duas leituras, porém com vistas a comparar também a diferença de utilizar dados diários ou duas

leituras, utilizaram-se também dados diários. Uma vez que seja possível desenvolver regressões de tão boa qualidade utilizando dados diários como dados duas leituras para certas localidades, também será um indicativo para utilizar as séries com período inteiro. Sendo assim, cada uma das sete regressões foram calibradas e aferidas para tanto dados diários, como também para dados duas leituras.

Para cada regressão desenvolvida, calculou-se a previsibilidade em função do tempo utilizando dados de no mínimo dez horas até cinco dias atrás no caso dos dados duas leituras ($t-1, t-2, \dots, t-10$), já que os dados são 7h e 17h, e de um dia até cinco atrás no caso dos dados de cota e vazão ($t-1, t-2, \dots, t-5$). Em dados diários, $t-1$ é o equivalente há 24 horas. Em dados duas leituras, $t-2$ é o equivalente há 24 horas. Analogamente, $t-4$ em dados diários, seria $t-8$ em dados duas leituras.

Figura 15. Diagrama unifilar do modelo para o rio Uruguai



As regressões desenvolvidas nesse estudo são regressões lineares múltiplas como a Equação 2, porém com a adição de um coeficiente linear e também com uma variável explicativa autoregressiva, isto é, uma variável que utiliza valores passados da própria variável explicada.

Assim, a equação geral utilizada nas regressões é a seguinte:

$$y_t = (b_1x_{1t-1-k} + b_2x_{2t-1-k} + \dots + b_nx_{nt-1-k}) + b_{n+1}y_{t-1-k} + b_{n+2} \quad (3)$$

Onde, y_t é a variável explicada; x_1, x_2, \dots, x_n , são as variáveis explicativas (1ª, 2ª, ..., n-ésima) de estações a montante; y_{t-1-k} é a variável explicativa autoregressiva; b_{n+2} é o coeficiente linear; b_1, b_2, \dots, b_{n+1} são os coeficientes angulares calibrados; k é o subíndice fase que exprime a defasagem temporal da previsão.

Abaixo a Tabela 2 exibe os tempos de propagação estimados para a onda de cheia de cada estação explicativa até a estação explicada. Esses resultados são importantes para a compreensão do item 5.

Tabela 2. Tempo de propagação estimado para ondas de cheia.

Tempo de Propagação Estimado da Onda													
REGRESSÃO	Explicada	Explicativa1	dt (h)	Explicativa2	dt (h)	Explicativa3	dt (h)	Explicativa4	dt (h)	Explicativa5	dt (h)	Explicativa6	dt (h)
1. Porto Lucena	74800000	74500000	32.9	74100000	50.7	-	-	-	-	-	-	-	-
2. Garruchos	75550000	74800000	31.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3. São Borja	75780000	75550000	29.1	75700000	13.6	-	-	-	-	-	-	-	-
4. Itaqui	75900000	75550000	48.2	75700000	32.7	75780000	19.1	-	-	-	-	-	-
5. Uruguaiana	77150000	75900000	18.5	76800000	30.5	-	-	-	-	-	-	-	-
6. Barrá do Quaraí	77590000	77585000	7.4	77500000	49.0	-	-	-	-	-	-	-	-
7. Rio Uruguai Total	77150000	74800000	98.2	74500000	131.1	74100000	148.0	75550000	66.7	75780000	37.6	75900000	18.5

Analisando a Tabela 2, nota-se que as variáveis explicativas 2 e 3 da regressão 7 apresentam o tempo estimado maior do que 120 horas (5 dias). A regressão 7, assim como as outras foram testadas para um horizonte de até 5 dias de previsão, o que, fisicamente falando, se o tempo de propagação estimado estiver próximo do real, não há uma grande relação real causa-efeito dos picos das estações 74500000 e 74100000 no pico da estação de Uruguaiana dentro do horizonte de previsão de 5 dias.

4.6. INCONSISTÊNCIA NOS DADOS DE VAZÃO

Como consta no Quadro 4, para as regressões 2 (Garruchos), 3 (São Borja) e 4 (Itaqui), num primeiro momento, buscou-se trabalhar com vazão-vazão para quantificar a influência de afluentes, pois a relação entre vazões é mais linearmente direta por se tratar de soma de ondas, enquanto a relação entre cotas não é tão diretamente linear.

Embora houvesse a intenção de trabalhar com dados de vazão para as regressões 2, 3 e 4, optou-se por não realizá-las porque se identificou possíveis inconsistências nas séries de vazão, como são apontadas a seguir.

As Figuras 16, 17 e 18 mostram em sequência uma análise feita de eventos que ultrapassaram a vazão de atenção durante o período de (1/1/1991-31/8/2017). A linha azul é a estação para qual se pretende realizar a previsão (**jusante**), enquanto a linha vermelha é a estação a **montante** que seria utilizada. Seria esperado que a vazão passante a jusante fosse maior daquela de montante para o mesmo evento.

Figura 16. Regressão 2 - vazão, eventos de inundação de 1/1/1991 até 31/8/2017.

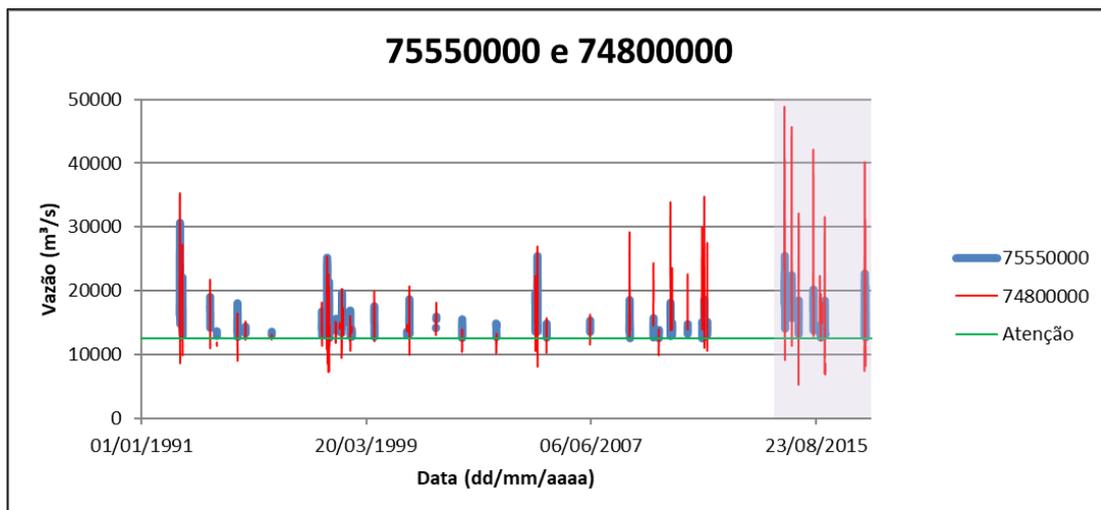


Figura 17. Regressão 3 - vazão, eventos de inundação de 1/1/1991 até 31/8/2017.

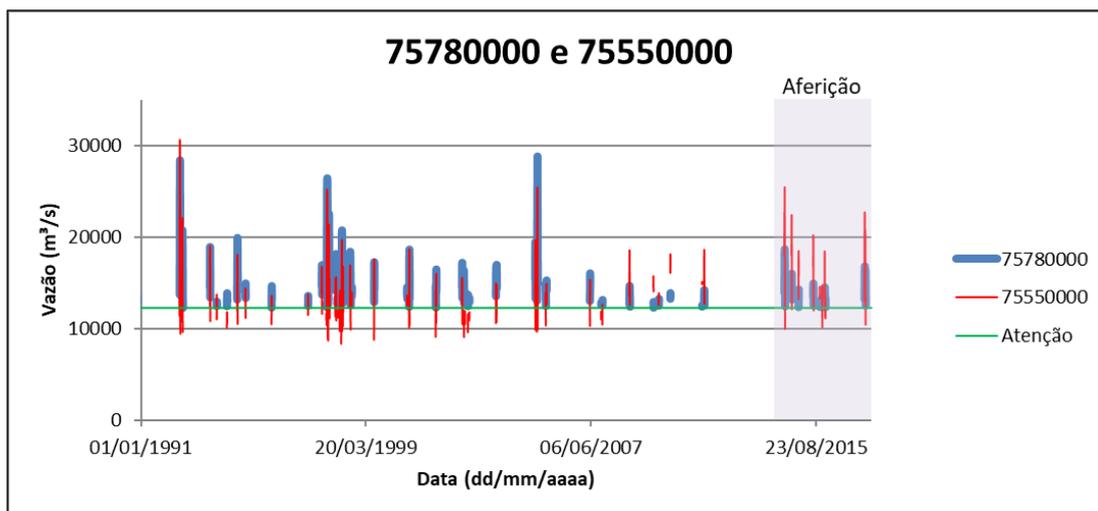
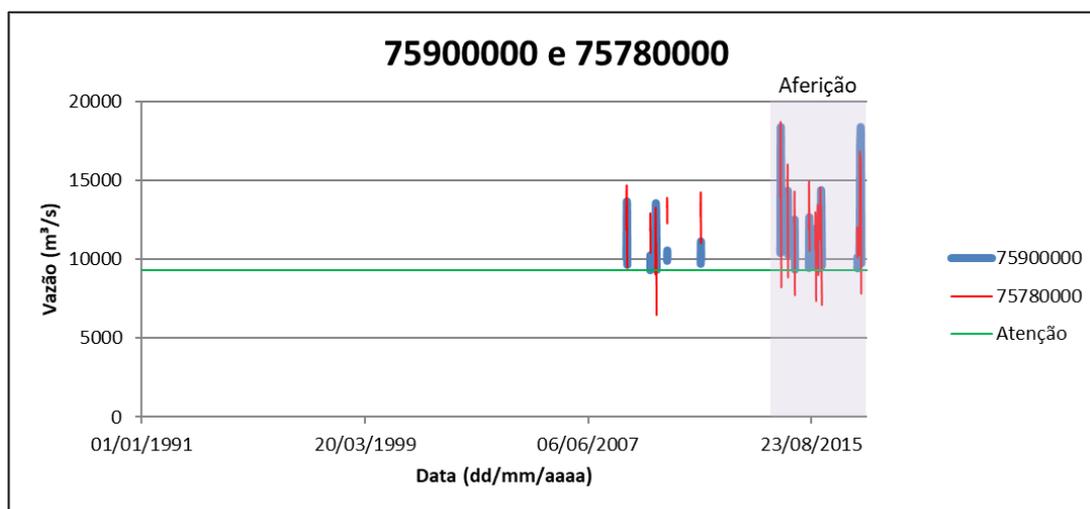


Figura 18. Regressão 4 - vazão, eventos de inundação de 1/1/1991 até 31/8/2017.



Com relação à Figura 16 e 17, valores de vazão de montante muito superiores aparecem após 2007 e, especialmente durante o período de aferição, o que levaria a uma incerteza grande apresentada pelos índices de aferição. Uma das possíveis causas dessa inconsistência seja a extrapolação da curva-chave que ocorre, pois geralmente não se possui dados de resumo de descarga líquida em momento de inundação porque há um grande risco associado a entrar no corpo hídrico nesses momentos.

Com relação à Figura 18, nota-se ausência de eventos entre 1991 e 2007 na série histórica, pois a própria série histórica na integra da estação 75900000 apresenta falhas (dados -1) nesse período, o que comprometeria a análise.

4.7. DISPONIBILIDADE TEMPORAL DAS ESTAÇÕES SELECIONADAS

Os dados duas leituras, que apresentam intervalo temporal mais curto, estão definidos apenas a partir de primeiro de janeiro de 1991. Com vistas a poder comparar a diferença entre calibrar e aferir com dados diários únicos e dados duas leituras, selecionaram-se os períodos a partir de primeiro de janeiro de 1991 de cada série utilizada.

Após tal processo, escolheu-se calibrar cada regressão utilizando dados de 1/1/1991 até 31/12/2013, enquanto a aferição realizada para um período final que se estende do dia 1/1/2014 até o final da série. O final da série é 31/08/2017 para todos dados, exceto para regressão 6 (Barra do Quaraí) que tem fim em 31/07/2017, assim como a regressão 1 (Porto Lucena) para dados de cota diários.

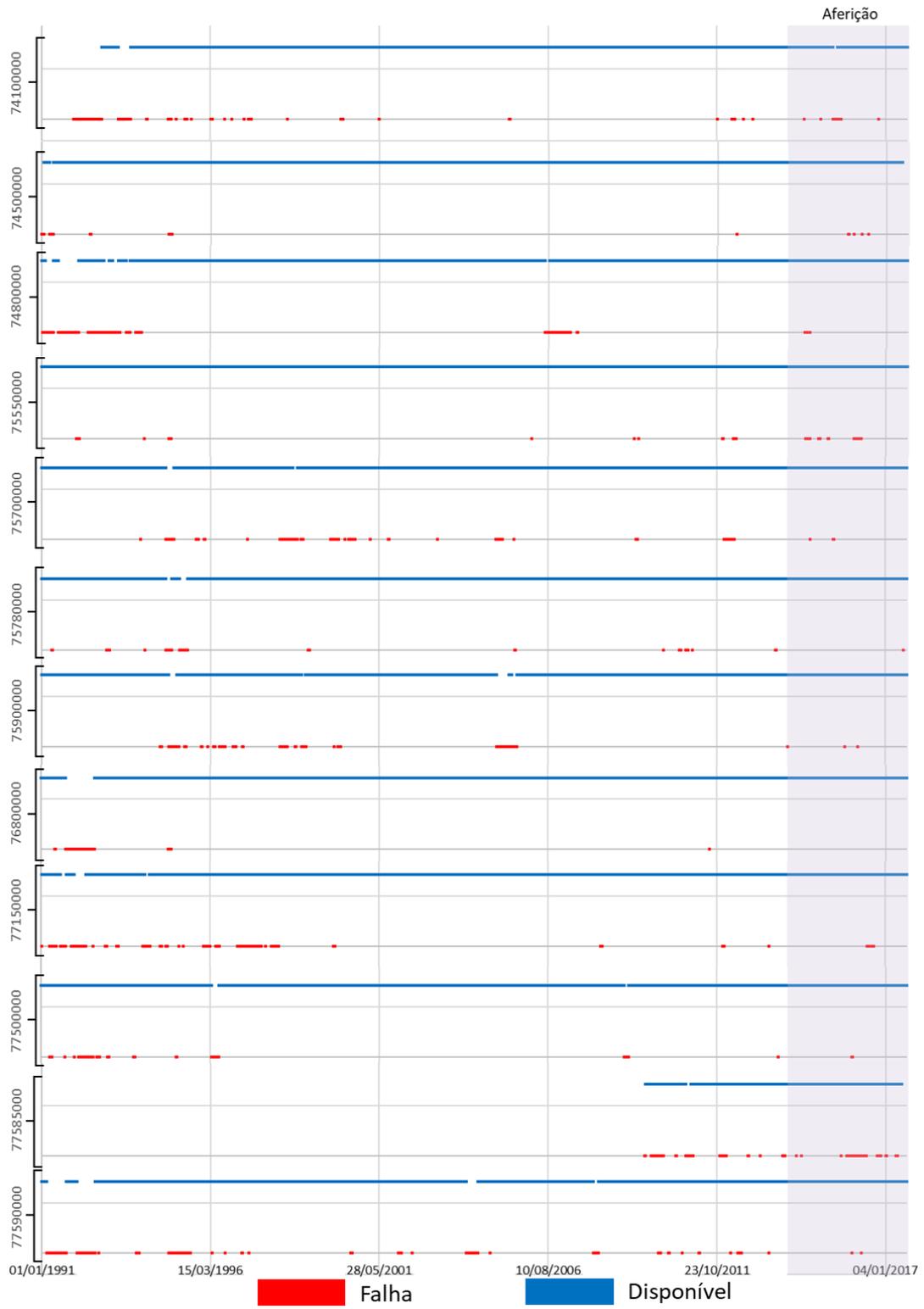
No período de 1/1/1991-31/08/2017 existem 9739 dias. No caso de dados duas leituras, são 19478 dados nesse período. Para representar a disponibilidade temporal de cada série, realizou-se uma transformação seguindo as tais regras: 1. se há medição, então recebe o valor +1 e é apresentado como um ponto azul; 2. se há uma falha, representado por um valor -1 na série bruta, então recebe o valor 0 e é apresentado como um ponto vermelho; 3. se não há dado algum, isto é, há ausência de qualquer valor que seja para esse dia na série histórica bruta, então não aparece nem ponto azul nem vermelho.

4.7.1. DUAS LEITURAS

Abaixo seguem três Figuras que representam a disponibilidade temporal para cada série histórica utilizada de cada estação para o período considerado, onde os pontos vermelhos representam falhas, e os pontos azuis não-falhas.

A Figura 19 apresenta as séries históricas de Duas Leituras para as estações utilizadas. A estação 77585000, por exemplo, só apresenta dados de Duas Leituras, para esse período, a partir de 2008. A estação 74800000 apresenta concentração de falhas nos primeiros três anos da série e também alguns poucos a partir de agosto de 2006.

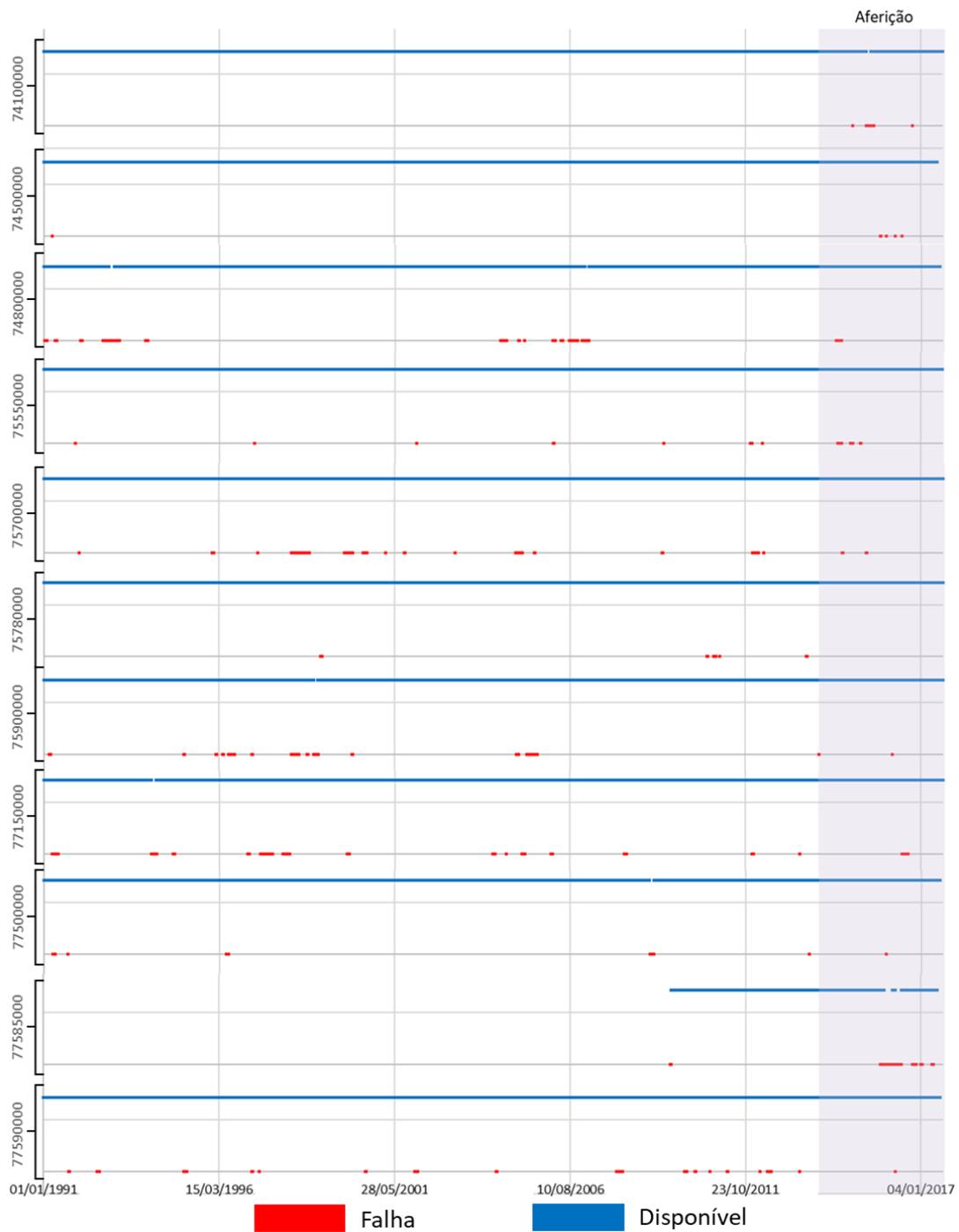
Figura 19. Disponibilidade de dados de Duas Leituras para o período utilizado.



4.7.2. COTAS

Na Figura 20, pode-se notar uma menor frequência de falhas nos dados para o mesmo período. A estação 77585000 apresenta dados apenas após meados de 2007.

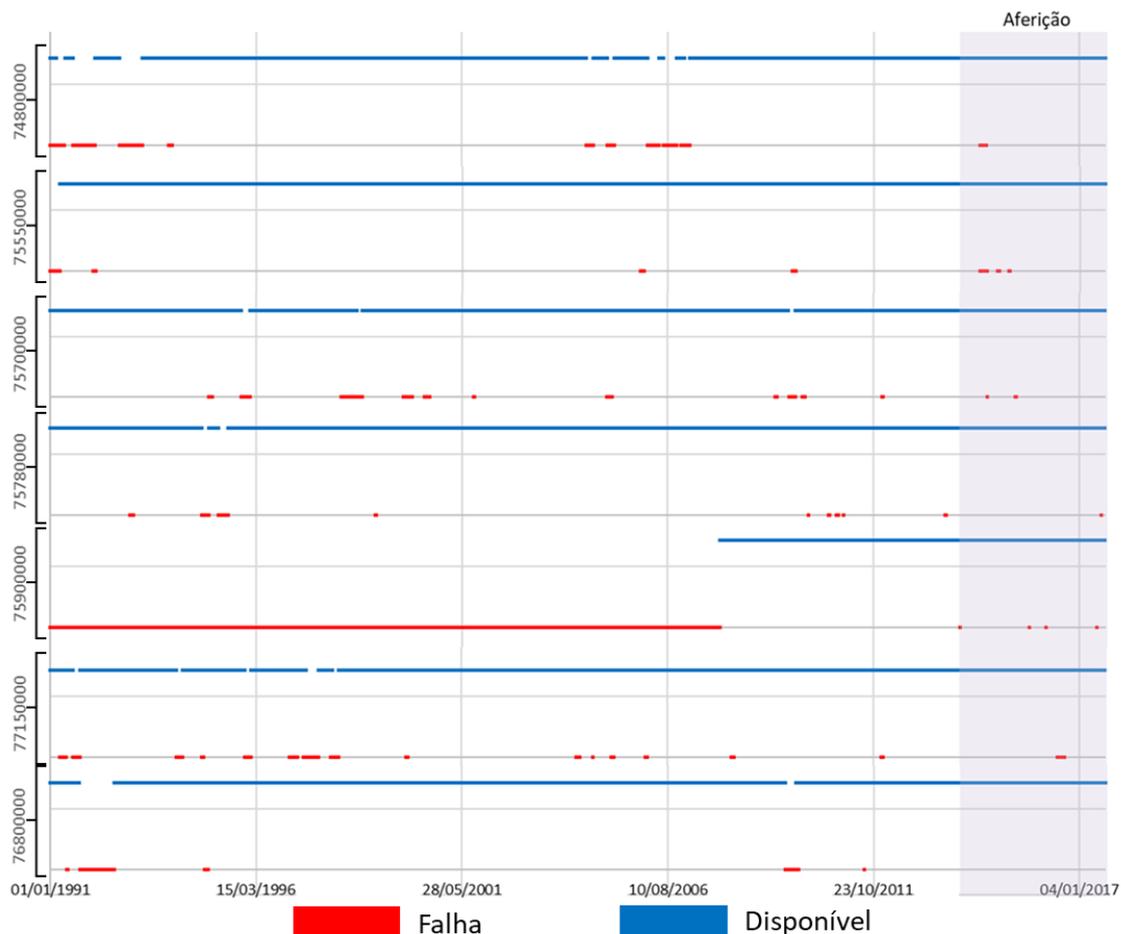
Figura 20. Disponibilidade de dados de Cotas para o período utilizado.



4.7.3. VAZÃO

Na Figura 21, a estação 75900000 apresenta muitas falhas até o ano de 2007, como consta também na Figura 18.

Figura 21. Disponibilidade de dados de Vazão para o período utilizado.



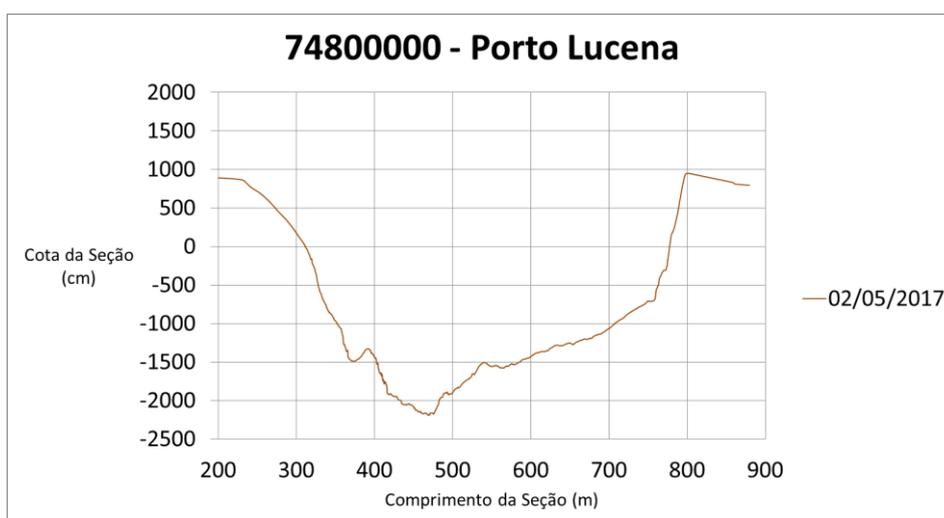
4.8. DEFINIÇÃO DOS VALORES DE REFERÊNCIA

Para definir os valores de referência, isto é, cota de inundação, cota de alerta, cota de atenção, fez-se uma análise do perfil transversal das estações, e assim que se identificou mudança brusca no nível da calha, identificou-se essa altura como a cota máxima de enchente, a qual foi então adotada como cota de inundação.

Buscou-se manter valores práticos para que fossem utilizados no campo, o que se explica a seguir.

Como exemplo, apresenta-se aqui a estação 74800000 (Porto Lucena). Buscaram-se os dados de medição do perfil transversal que são realizados quando se mede vazão em campo. Selecionou-se sempre aquele em que o perfil transversal apresentou maior cota. O perfil transversal de maior cota foi o do dia 2/5/2017 para Porto Lucena, como exprime Figura 22.

Figura 22. Perfil transversal 74800000 no dia 02/05/2017.



Nesse caso, na margem esquerda se identifica um valor de 845 cm, e, na margem direita, 951 cm. Mantem-se o valor de 845 cm, pois é o crítico entre os dois. Esse valor, porém, foi arredondado para 850 cm, e utilizado como a referência de cota inundação. Posteriormente, desse valor, reduziu-se um tanto arbitrariamente 100 cm para obter a cota de alerta, e mais 100 cm para obter a cota de atenção.

Assim, para essa estação as cotas de inundação, alerta e atenção são, respectivamente, 850, 750 e 650 cm.

Além disso, quantificou-se das cotas máximas mensais, a cota máxima anual dado que pelo menos 10 meses estivessem sem falha alguma, e a partir das, então, cotas máximas anuais, ajustou-se uma distribuição de máximos de Gumbel através do método dos momentos (NAGHETTINI e PINTO, 2007), que é a indicada para estudos de máximos.

Em estudo desenvolvido por Germano e Matos (2017), o tempo de retorno para os valores de referência de inundação variam entre 1,8 até 2,5 anos. Nesse estudo todas as cotas de atenção estiveram abaixo do TR 2 anos. A cota de inundação (850 cm) de Garruchos tem TR de em torno de 5 anos pela distribuição de máximos de Gumbel.

Para aquelas regressões que era preciso utilizar vazões de referência, aplicou-se transformação das cotas para vazões pelo método da curva-chave.

Apenas a definição das cotas de inundação para a regressão 6 (Barra do Quaraí) foi obtida de maneira diferente. Uma vez que não havia dados do perfil transversal do rio já que a estação 77590000 (Barra do Quaraí) mede apenas cota, adotou-se simplesmente a cota com TR de 2 anos para uma curva de permanência simples desenvolvida para o período de 01/01/1991-31/07/2017.

Na Tabela 3 estão apresentados os valores de referência obtidos para cada estação explicada, ou de controle.

Tabela 3. Valores de referência para as regressões desenvolvidas.

Regressão	Estação explicada	Valor de Referência						Tipo de Dados	
		Atenção		Alerta		Inundação		Cota	Vazão
		Cota (cm)	Vazão (m ³ /s)	Cota (cm)	Vazão (m ³ /s)	Cota (cm)	Vazão (m ³ /s)		
1. Porto Lucena	74800000	650		750		850		x	
2. Garruchos	75550000	1000	12562	1100	13986	1200	15410	x	x
3. São Borja	75780000	900	12280	950	13424	1000	14616	x	x
4. Itaqui	75900000	820	9175	870	9978	920	10810	x	x
5. Uruguiana	77150000	680	9582	730	10602	1000	17365	x	x
6. Barra do Quaraí	77590000	820		870		920		x	
7. Rio Uruguai Total	77150000	680		730		1000		x	

Os valores adotados para referência foram obtidos segundo a metodologia já mencionada anteriormente. Há algumas incertezas, porém, que se deve atentar ao método utilizado.

A metodologia utilizada é uma abordagem de “trabalho de escritório”, e não deve substituir a visita em campo, a fala com moradores locais e com os agentes da Proteção e Defesa Civil, pois é tanto possível que haja moradias ou outras construções que estejam instaladas abaixo da cota de inundação, como também é possível que a primeira construção esteja bem acima da cota máxima de enchente.

Todavia, por ser o foco do trabalho um desenvolvimento preliminar de sistema de alerta, optou-se por uma metodologia mais simples.

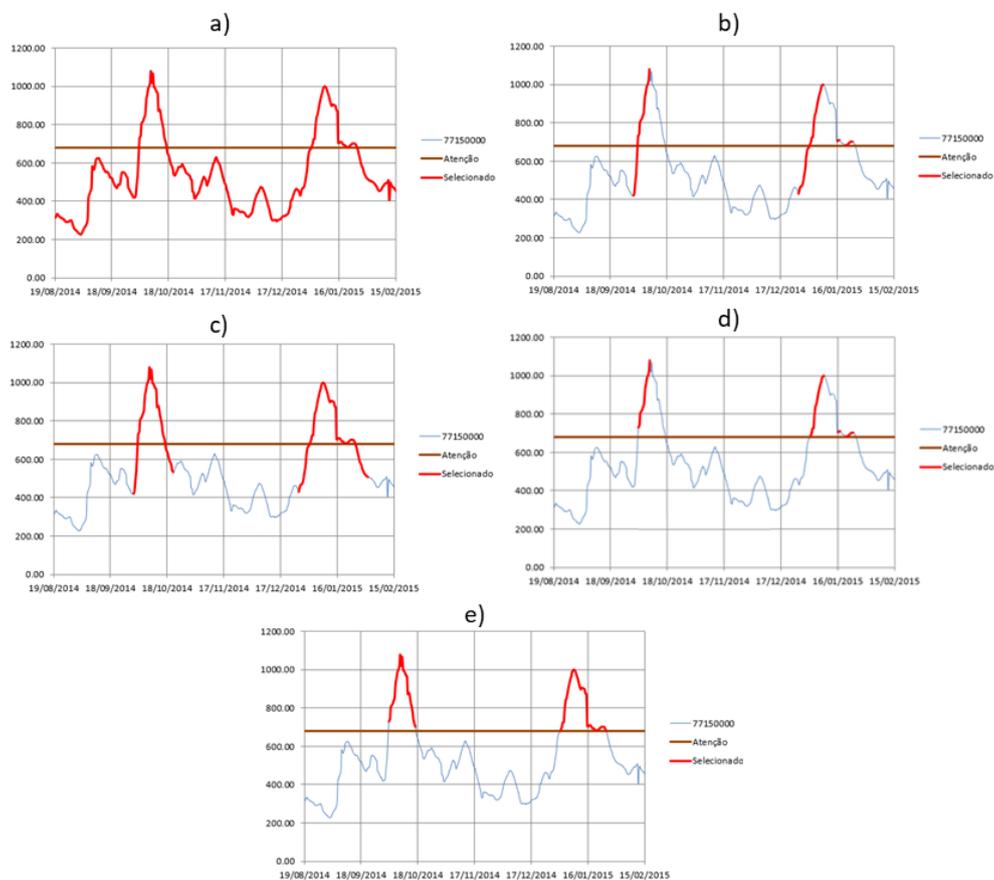
4.9. FILTROS POSSÍVEIS

Nesse trabalho poderia se utilizar diferentes filtros para selecionar pedaços da série que seriam efetivamente usados. Tapia *et al.* (2014) utilizaram apenas a subida dos eventos de inundação, por exemplo.

Aqui se elencaram cinco opções possíveis: a) Série na íntegra; b) Apenas a subida dos eventos de inundação; c) Subida e descida dos eventos de inundação; d) Subida dos eventos de inundação acima da cota de atenção; e) Subida e descida dos eventos de inundação acima da cota de atenção.

Segue abaixo na Figura 23 representação gráfica da aplicação de cada filtro para os dados da estação de Uruguaiana (77150000):

Figura 23. Filtros possíveis.



Escolheu-se utilizar o filtro “e” para calibrar e aferir os modelos, pois o objetivo final da regressão é que ela seja o quanto melhor possível para realizar previsões a partir da cota de atenção. Devido ao tempo disponível para o trabalho não foi possível utilizar outros filtros para averiguar a diferença entre seus usos.

4.10. MÉTRICAS PARA AFERIÇÃO DOS MODELOS

Dentre as métricas, estatísticas e índices que foram utilizados para aferir a valia dos modelos desenvolvidos, trabalharam-se com as seguintes métricas: coeficiente NS, CP, EMA, REMQ e o E95. Índices esses utilizados por Fan *et al.* (2017) e Moreira (2016).

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe exprime o quanto a previsão feita é melhor do que simplesmente se prever a média dos dados observados. Quanto mais próximo de um, mais o modelo é adequado para previsão. Calcula-se o NS assim:

$$NS = 1 - \left[\frac{\sum_1^n (y_{mod_t} - y_{obs_t})^2}{\sum_1^n (y_{obs_t} - \bar{y}_{obs})^2} \right] \quad (4)$$

O Coeficiente de Permanência mede o quanto é pior realizar uma previsão com o modelo ao invés de utilizar os dados anteriores medidos. Valores menores que um indicam que a valia da previsão é maior do que adotar simplesmente o dado do dia anterior, enquanto valores maiores que um indicam que é mais próximo da realidade utilizar o valor ligeiramente anterior como previsão do que realizar se quer uma previsão pelo modelo. Esse coeficiente é conhecido por “hoje é igual à ontem” e é expresso abaixo:

$$CP = \left[\frac{\sum_2^n (y_{mod_t} - y_{obs_t})^2}{\sum_2^n (y_{obs_t} - y_{obs_{t-1}})^2} \right] \quad (5)$$

Para elucidar a dinâmica do CP ao aferir com diferentes tempos de antecedência, cabe ainda aqui citar um exemplo. Tomando-se uma série histórica com dados do dia 1/1/1991 até 10/1/1991. Para saber o valor da variável estudada no dia 8/1/1991 com cinco dias de antecedência, utiliza-se o dado de 3/1/1991 para obter o y_{mod} do dia 8/1/1991. O CP é calculado pela razão entre a diferença desse y_{mod} para o dia 8/1/1991 e do observado nesse mesmo dia 8/1/1991, com a diferença do observado no dia 8/1/1991 e do observado no dia 2/1/1991.

O E95, erro absoluto que não é ultrapassado em 95% dos dados estimados, é obtido a partir do 95º percentil da série de erros absolutos. Esse índice é uma maneira de adicionar uma dimensão da incerteza do modelo de maneira mais direta. Quanto menor esse valor, menor o erro associado à previsão.

O EMA é o Erro Médio Absoluto, e mede a diferença absoluta entre o modelado e o observado. Semelhante ao E95, quanto menor o EMA, menor o erro da previsão. Ele é expresso assim:

$$EMA = \frac{1}{n} \left[\sum_1^n |y_{mod_t} - y_{obs_t}| \right] \quad (6)$$

O REMQ é a Raiz do Erro Médio Quadrado. Embora um tanto semelhante com a Equação 6 do Erro Médio Absoluto, o REMQ é mais sensível para diferenças absolutas maiores, e ao ser comparado com o EMA auxilia na compreensão da distribuição do erro (FAN *et al.* 2017). Menor o REMQ, mais adequado é o modelo para previsão. O REMQ é assim calculado:

$$REMQ = \left\{ \frac{1}{n} \left[\sum_1^n (y_{mod_t} - y_{obs_t})^2 \right] \right\}^{0.5} \quad (7)$$

y_{mod} é a variável dependente modelada, y_{obs} é a variável dependente observada pela série histórica, y_{med} é a média da variável dependente no período de aferição considerado, t é o subíndice do instante temporal da variável na série, n é o número total de instantes considerados.

4.11. CALIBRAÇÃO DOS MODELOS

Para calibração dos modelos, procurou-se minimizar o somatório do Erro Absoluto Médio, Equação 6, utilizando o algoritmo GRG Non-Linear pela ferramenta Solver do Microsoft Office Excel 2016.

O algoritmo GRG Non-Linear, *Generalized Reduced Gradient Non-Linear Algorithm*, em tradução livre, quer dizer Gradiente Reduzido Generalizado, e foi desenvolvido inicialmente por Leon Lasdon, Universidade do Texas, e por Allan Waren, Universidade do estado de Cleveland (MICROSOFT SUPPORT). Esse método, assim como virtualmente todos algoritmos clássicos não lineares de otimização, podem identificar uma solução ótima local numa escala “bem razoável” (FRONTLINE SOLVERS) . Ou seja, a própria natureza do algoritmo não é a de encontrar a solução ótima global, o que adiciona uma incerteza na aplicação pura dessa metodologia.

Outra opção seria utilizar a opção “*Multistart*”, Inicialização Múltipla, o que consiste em começar com diferentes valores iniciais dado que os coeficientes a serem ajustados estão todos restritos por um valor máximo e mínimo. Essa abordagem, porém, evidenciou um tempo maior; enquanto a operação levaria em torno de 3 minutos para uma solução ótima ser encontrada, com a Inicialização Múltipla o tempo associado tornava-se maior que 30 minutos. Isto ocorre porque o número mínimo de diferentes inicializações utilizadas pelo algoritmo é de 10. Ao notar que o processo de coeficientes para ótimos “mais globais” aumentaria no mínimo em dez vezes, essa opção foi totalmente descartada.

Uma opção oferecida pelo método é utilizar “*forward derivatives*” ou “*central derivatives*”. A segunda opção apresenta resultados de maior acurácia, no entanto requer duas vezes mais cálculos para cada inicialização (FRONTLINE SOLVERS). Utilizou-se a opção de derivadas centrais nesse trabalho. O parâmetro “*Convergence*” exprime qual o valor de convergência de parada da mudança relativa para as últimas cinco interações, isto é, se nas últimas cinco interações a mudança relativa for menor que esse valor, o algoritmo para de rodar.

Das restrições utilizadas, apenas se marcou para que cada coeficiente fosse sempre não-negativo, o que foi feito marcando a opção “*Make Unconstrained Variables Non-Negative*”.

Abaixo os parâmetros utilizados para o GRG Non-Linear foram os seguintes:

Quadro 5. Parâmetros do GRG Non-Linear.

Make Unconstrained Variables Non-Negative:	Checked
All Methods	
Constraint precision:	0,000001
Use Automatic Scaling:	Checked
Integer Optimality (%):	1
GRG Nonlinear	
Convergence:	0,0001
Derivatives:	Central
Multistart:	Unchecked
Require Bounds on Variables:	Checked

Há ainda outros dois tipos de algoritmos no Solver: LP Simplex e Evolutionary. Tentou-se testar o Evolutionary, porém esse rodou por mais de uma hora e mesmo assim não havia parado. Devido ao tempo disponível para a finalização do trabalho, não se prosseguiu com a análise desses outros algoritmos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No início de cada subcapítulo se apresenta um diagrama unifilar com as estações envolvidas na modelagem da regressão respectiva a ser discutida.

As Tabelas 4-17 exibem dados de calibração e aferição para cada uma das regressões desenvolvidas. Como já explicitado no item 4.7, as regressões foram feitas considerando utilizar dados de entrada anteriores até o período de 5 dias. Por isso, as Tabelas de dados diários vão de t-1 até t-5, enquanto que as Tabelas de cotas duas leituras vão de t-1 até t-10. Em dados diários, t-1 é o equivalente há 24 horas. Em dados duas leituras, t-2 é o equivalente há 24 horas. Analogamente, t-4 em dados diários, seria t-8 em dados duas leituras.

Os valores “b” são os ótimos encontrados durante a calibração. A calibração visou minimizar o erro absoluto médio (Erro Abs Médio), o qual sempre consta na última linha de cada Tabela. Também se calculou o mesmo índice para o período de aferição que aparece como EMA. O quão mais próximo o Erro Abs Médio da calibração é do EMA da aferição mais indica que os dois períodos são semelhantes.

O “b” de maior índice sempre se refere ao coeficiente linear da equação, (b4 para Regressão 1, Porto Lucena; b3 para Regressão 2, Garruchos; b8 para Regressão 7, rio Uruguai Total).

Ao final de cada subcapítulo, apresentam-se gráficos do observado e do estimado para 24 horas e 48 horas de antecedência de cada respectiva regressão abordada no subcapítulo.

5.4.1 – Porto Lucena (Regressão 1)

5.4.2 – Garruchos (Regressão 2)

5.4.3 – São Borja (Regressão 3)

5.4.4 – Itaqui (Regressão 4)

5.4.5 – Uruguaiana (Regressão 5)

5.4.6 - Barra do Quarai (Regressão 6)

5.4.7 – Rio Uruguai Total (Regressão 7)

5.1.1. REGRESSÃO 1 (PORTO LUCENA)

Figura 24. Diagrama unifilar Regressão 1.

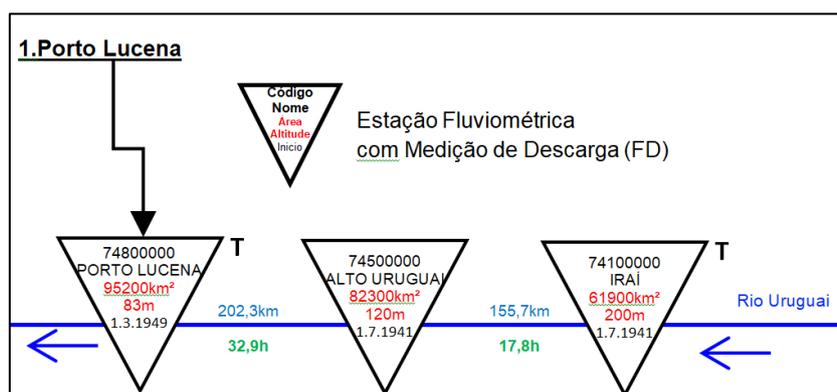


Tabela 4. Regressão Porto Lucena (74800000) com dados cota diária.

REGRESSÃO PORTO LUCENA (Cota Diária) $h > 650\text{cm}$						
t-		1	2	3	4	5
74500000	b1	0.218	0.003	0.003	0.003	0.003
74100000	b2	0.189	0.108	0.000	0.000	0.000
74800000	b3	0.153	0.074	0.098	0.079	0.075
	b4	230.9	670.3	726.0	743.9	747.9
	(E95/EMA - 1)	1.13	1.51	1.46	1.50	1.44
	(REMQ/EMA -1)	0.23	0.27	0.32	0.35	0.34
	EMA	120.97	149.57	152.06	140.42	142.49
	CP	0.25	0.13	0.12	0.10	0.10
	NS	0.00	-0.46	-0.54	-0.52	-0.56
	Erro Abs Médio	58.11	88.33	93.26	94.33	95.83

A regressão de dados diários para Porto Lucena (Tabela 4) apresenta pior qualidade conforme o horizonte de previsão aumenta. Nota-se que os coeficientes b1 e b2, referentes às estações 74500000 e 74100000 são máximos em t-1 (24h), o que deve estar relacionado ao tempo de propagação da onda dessas estações até Porto Lucena. Os tempos de propagação estimados são de 32,9 h e 50,7 h, respectivamente.

O NS é nulo ou negativo para os horizontes de previsão considerados, sendo então de péssima qualidade. No entanto, o CP indica que entre utilizar o modelo e adotar sempre o dado anterior (de 24h atrás), o uso do modelo ainda se apresenta melhor.

A memória da série de cotas da 74800000 aparenta ser curta (em torno de 24h), pois o coeficiente b3 assume valores bastante baixos já no horizonte de t-2 (48h) quando o coeficiente linear b4 praticamente é o triplo daquele de t-1.

Tabela 5. Regressão Porto Lucena (74800000) com dados cota duas leituras.

REGRESSÃO PORTO LUCENA (Cota Duas Leituras) h>650cm											
	t-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
74500000	b1	0.286	0.335	0.143	0.081	0.066	0.074	0.073	0.074	0.050	0.056
74100000	b2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
74800000	b3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	b4	67.4	310.2	608.9	687.5	706.3	706.8	711.0	712.8	730.2	728.7
	(E95/EMA - 1)	1.23	1.33	1.79	1.77	1.80	1.74	1.66	1.68	1.60	1.62
	(REMO/EMA -1)	0.29	0.26	0.34	0.40	0.43	0.41	0.39	0.40	0.39	0.40
	EMA	44.02	83.11	116.88	123.77	127.19	132.19	135.34	136.03	135.04	133.09
	CP	0.17	0.16	0.18	0.15	0.13	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11
	NS	0.85	0.35	-0.09	-0.33	-0.46	-0.47	-0.51	-0.59	-0.46	-0.46
	Erro Abs Médio	26.81	51.80	67.58	73.28	73.97	74.31	74.83	75.20	76.04	76.82

A regressão cota-cota de duas leituras diárias para Porto Lucena (Tabela 5) apresenta pior qualidade conforme o horizonte de previsão aumenta. O valor de b1 é decrescente a partir de t-2, onde b1 atinge um máximo. Estimou-se o tempo de propagação da onda de 74500000 até a estação de Porto Lucena (74800000) como sendo de 32,9 h. Estimou-se pelo cálculo do tempo de propagação da onda de cheia que o máximo de b1 ocorresse em t-3.

Analisando-se as métricas de aferição, em t-3 (previsão de 72h de antecedência) o NS já assume valores negativos. Isso indica que a partir de t-3 a regressão é pior do que adotar o dado médio do período. A melhor regressão segundo os índices é para o horizonte de t-1 (o que equivale a previsões de 10/14h de antecedência) que apresentou NS de 0,85, CP de 0,17 e E95 123% maior que o EMA, aqui de 44 cm.

Assim como presente na Tabela 5, o valor baixo do coeficiente b3 aponta para uma memória de cerva de 24 horas para cota da 74800000.

Figura 25. Regressão 1, Porto Lucena, cota diária.

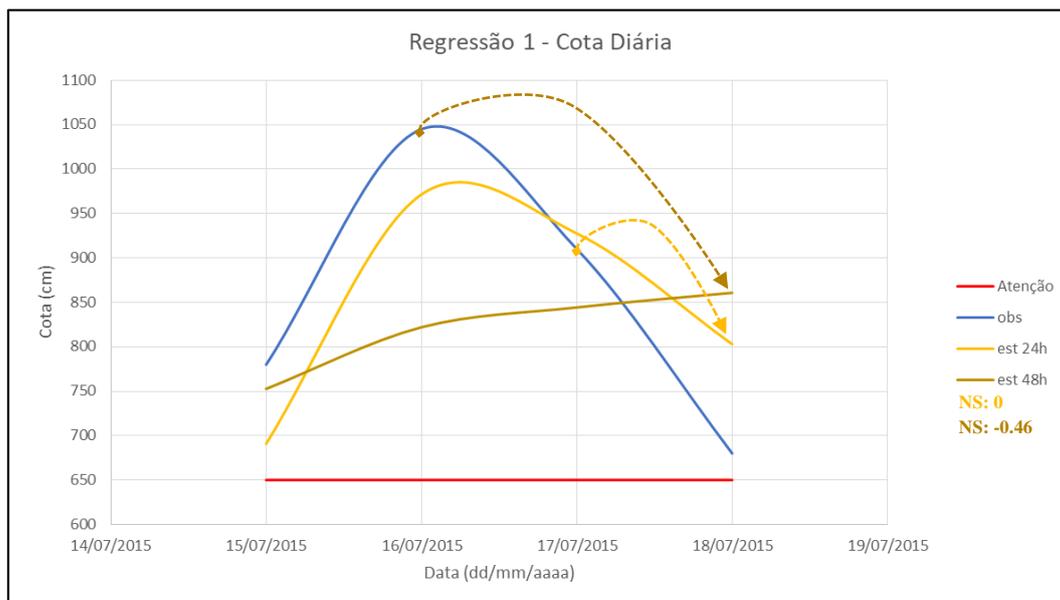
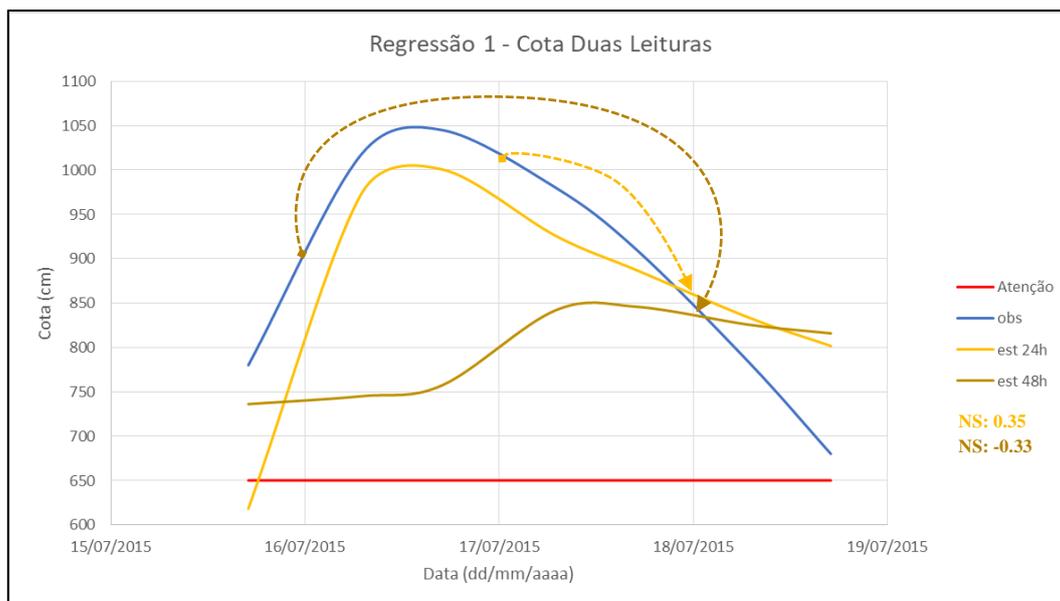


Figura 26. Regressão 1, Porto Lucena, cota duas leituras.



Os eventos que ultrapassam a cota de atenção para Porto Lucena são de curta duração frente aos das outras regressões, e por isso são de difícil modelagem. Nas Figuras 25 e 26 estão apresentados cotogramas para o evento a partir da cota de atenção entre o dia 15/07/2015 até 18/07/2015.

A subida do estimado com 24 horas de antecedência apresentou NS de 0,35 e CP 0,16 para dados duas leituras. Foram utilizadas linhas pontilhadas para mostrar que com dados os dados observados é feita a previsão com 24 e 48h.

5.1.2. REGRESSÃO 2 (GARRUCHOS)

Figura 27. Digrama unifilar Regressão 2.

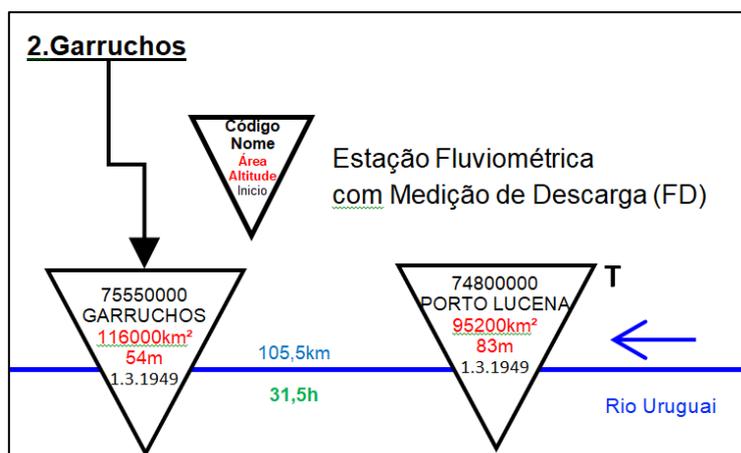


Tabela 6. Regressão Garruchos (75550000) com dados cota diária.

REGRESSÃO GARRUCHOS (Cota Diária) $h > 1000\text{cm}$						
t-		1	2	3	4	5
74800000	b1	0.855	0.481	0.243	0.157	0.132
75550000	b2	0.234	0.000	0.000	0.000	0.000
	b3	391.0	900.2	1049.9	1089.2	1110.7
	(E95/EMA - 1)	1.39	1.47	1.79	2.23	2.11
	(REMQ/EMA - 1)	0.29	0.31	0.36	0.39	0.38
	EMA	101.95	174.19	216.49	245.21	255.71
	CP	0.24	0.20	0.19	0.20	0.19
	NS	0.77	0.28	-0.06	-0.23	-0.28
	Erro Abs Médio	60.24	107.72	122.76	127.41	128.90

A regressão cota-cota com um único dado diário para Garruchos (Tabela 6) apresenta valores decrescentes para o coeficiente b1 conforme o tempo de antecedência aumenta. Ao passo que os coeficientes b1 e b2 diminuem, o coeficiente linear b3 aumenta, representando menor correlação de 74800000 e da variável autoregressiva para a previsão em Garruchos conforme o período de antecedência aumenta. Analogamente, quanto maior o período de antecedência, mais a variável linear impacta para a regressão.

Analisando-se as métricas de aferição, no terceiro dia o NS assume valores negativos, indicando que a regressão não é mais adequada para previsão.

As métricas indicam que a melhor regressão encontrada para Garruchos é para previsão com um dia de antecedência, apresentando NS de 0,77 e CP de 0,24. Apesar disso, o EMA é de 102 cm e o E95 de 244 cm, 139% maior que o EMA, o que exprime uma incerteza ainda um tanto grande, visto que os valores de referência para Garruchos são 1000, 1100 e 1200 cm; um erro de 100 cm, o qual seria a média dos erros segundo a métrica, e levaria a emitir um alerta de inundação (1200 cm), enquanto, na verdade, a cota poderia atingir somente a referência de alerta (1100 cm).

Tabela 7. Regressão Garruchos (75550000) com dados cota duas leituras.

REGRESSÃO GARRUCHOS (Cota Duas Leituras) h>1000cm											
t-		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
74800000	b1	0.447	0.735	0.635	0.421	0.273	0.197	0.180	0.141	0.142	0.137
75550000	b2	0.667	0.248	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	b3	123.2	437.6	771.8	930.2	1016.3	1059.1	1068.5	1085.9	1088.2	1089.7
	(E95/EMA - 1)	1.68	1.24	1.22	1.38	1.37	1.56	1.99	1.91	1.87	1.85
	(REMQ/EMA - 1)	0.39	0.24	0.22	0.26	0.27	0.29	0.31	0.31	0.31	0.31
	EMA	46.32	106.97	160.46	195.14	224.92	243.66	257.24	268.31	275.04	279.71
	CP	0.29	0.29	0.29	0.27	0.27	0.26	0.25	0.25	0.24	0.23
	NS	0.94	0.73	0.40	0.09	-0.17	-0.32	-0.40	-0.47	-0.51	-0.56
	Erro Abs Médio	39.11	65.40	93.38	108.02	115.95	119.67	121.19	121.79	122.28	122.42

A regressão cota-cota de duas leituras para Garruchos (Tabela 7) demonstra comportamento semelhante, salvo um detalhe interessante que não aparece para Tabela 6 por esta não apresentar menor intervalo que 24h.

No diagrama unifilar das estações (Figura 15) consta o tempo calculado de 31,5h para propagação da onda entre a estação 74800000 (Porto Lucena) e 75550000 (Garruchos). Na Tabela 7, o coeficiente b1, isto é, a influência dos dados de Porto Lucena para Garruchos, é maior em t-2 do que em t-1, o que indica que há maior relação entre essas cotas próximo do horizonte de 24 horas.

Quanto às métricas de aferição o NS atinge valor máximo para t-1, 0,94, e o CP valor de 0,29.

O coeficiente da variável autoregressiva exprime que a memória da estação 75550000 é de algo em torno de 34 horas, pois o valor de b2 é praticamente nulo a partir de t-3.

Figura 28. Regressão 2, Garruchos, cota diária.

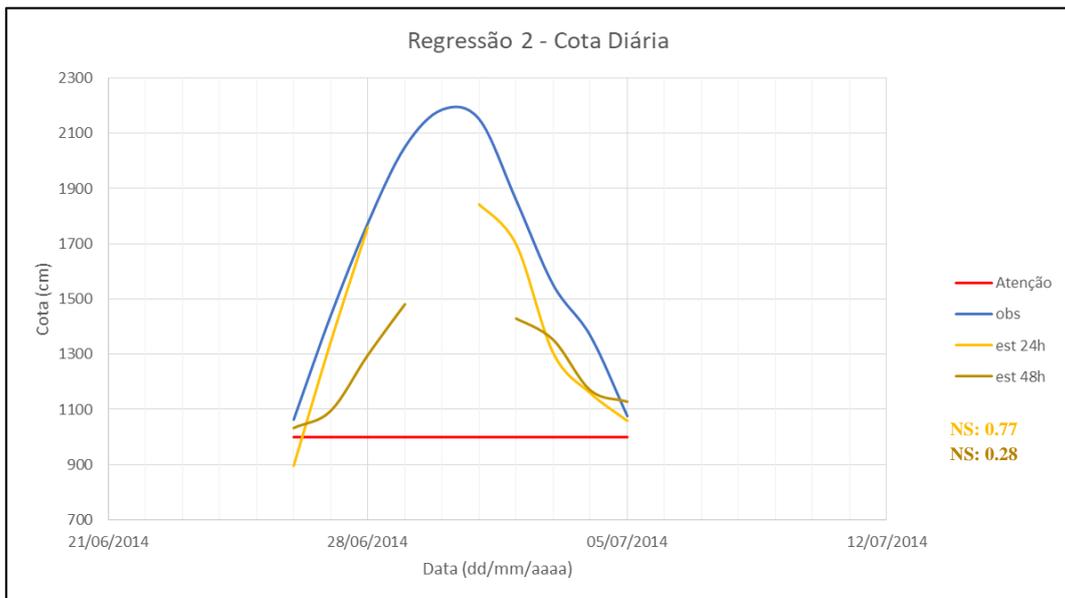
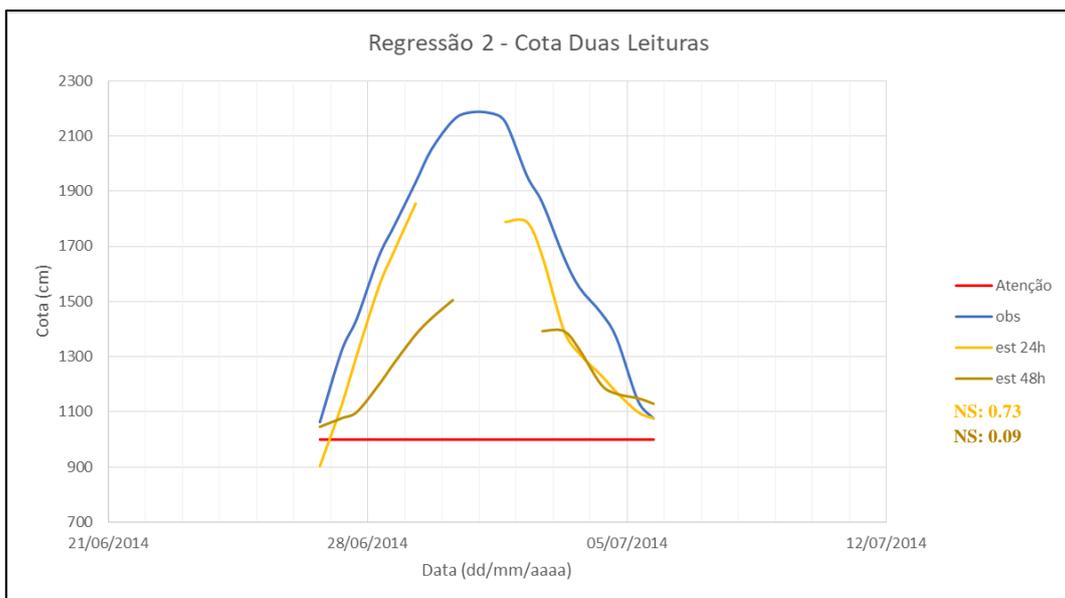


Figura 29. Regressão 2, Garruchos, cota duas leituras.



Nas Figuras 28 e 29, apresenta-se um evento que passou da cota de atenção e ocorreu no período de 26/06/2014 até 5/07/2014. A regressão utilizando dados diários demonstra-se pouco melhor do que aquela com dados duas leituras. As métricas NS e CP para o estimado 24h para cota diária e duas leituras são, respectivamente, 0,77 e 0,24; 0,73 e 0,29.

Há uma lacuna nos cotogramas das Figuras 28 e 29. Isso reflete uma fragilidade da regressão. A regressão é feita para utilizar uma série de dados de entrada e nos dias 29 e 30 de maio de 2014 para estação 74800000 não houve medições.

5.1.3. REGRESSÃO 3 (SÃO BORJA)

Figura 30. Diagrama unifilar Regressão 3.

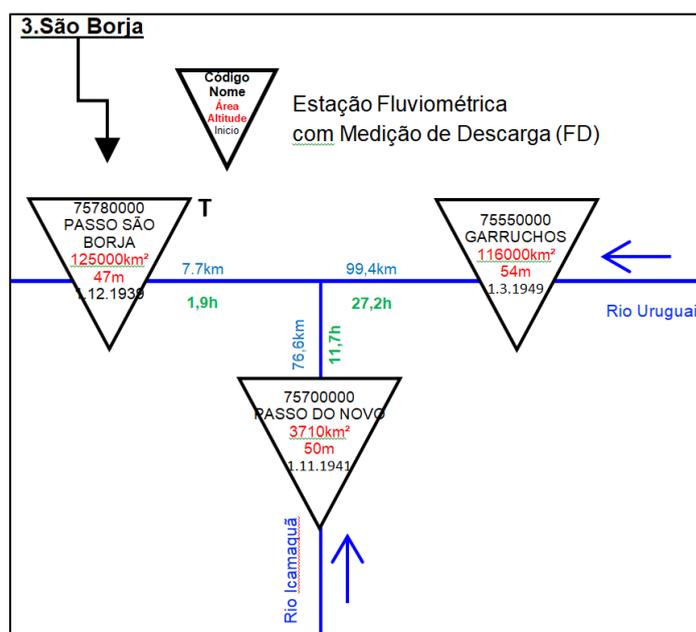


Tabela 8. Regressão São Borja (75780000) com dados cota diária.

REGRESSÃO SÃO BORJA (Cota Diária) $h > 900\text{cm}$						
	t-	1	2	3	4	5
75550000	b1	0.340	0.389	0.194	0.120	0.085
75700000	b2	0.077	0.126	0.073	0.071	0.065
75780000	b3	0.342	0.000	0.000	0.000	0.000
	b4	300.7	590.7	839.3	911.6	947.7
(E95/EMA - 1)		1.38	1.51	1.41	1.65	1.66
(REMQ/EMA - 1)		0.26	0.29	0.24	0.29	0.31
EMA		27.86	64.97	105.17	121.81	130.25
CP		0.14	0.16	0.19	0.19	0.18
NS		0.96	0.75	0.39	0.12	-0.04
Erro Abs Médio		24.29	54.47	73.80	82.54	86.87

A regressão de dados diários para São Borja (Tabela 8) também apresenta pior qualidade conforme o horizonte de previsão aumenta. Nota-se que os coeficientes b1 e b2, referentes à interferência das estações 75550000 e 75700000 são máximos em t-2, o que deve estar relacionado ao tempo de propagação da onda dessas estações até São Borja. Os tempos de propagação estimados são de 29,1 h e 13,6 h, respectivamente. Aqui o método de estimativa do tempo de propagação da onda resultou em tempos menores que os encontrados pela análise dos máximos dos coeficientes. A estimativa atuou então a favor da segurança.

Quanto às métricas de aferição, o NS se torna negativo apenas depois do quarto dia. O CP mantém-se abaixo de 0,2.

A memória da série de cotas diárias da 75780000 aparenta ser nula após 24 horas, pois o coeficiente b3 atinge valor nulo em t-2.

Tabela 9. Regressão São Borja (75780000) com dados cota duas leituras.

REGRESSÃO SÃO BORJA (Cota Duas Leituras) h>900cm											
t-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
75550000	b1	0.148	0.289	0.345	0.303	0.228	0.179	0.141	0.114	0.100	0.090
75700000	b2	0.034	0.079	0.111	0.113	0.102	0.082	0.083	0.083	0.077	0.066
75780000	b3	0.744	0.428	0.189	0.039	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	b4	100.8	266.6	447.7	651.1	780.9	847.1	884.4	913.1	928.5	943.5
	(E95/EMA - 1)	1.89	1.87	1.40	1.47	1.40	1.42	1.62	1.63	1.63	1.62
	(REMQ/EMA -1)	0.51	0.45	0.34	0.23	0.24	0.26	0.29	0.30	0.30	0.31
	EMA	15.50	28.35	49.25	73.48	93.24	105.53	114.17	120.25	125.77	129.34
	CP	0.24	0.17	0.17	0.18	0.20	0.20	0.20	0.19	0.18	0.18
	NS	0.98	0.94	0.85	0.71	0.52	0.37	0.23	0.13	0.05	-0.02
	Erro Abs Médio	18.57	35.46	52.39	64.01	71.30	76.20	79.65	82.69	85.27	86.96

A regressão de duas leituras para São Borja (Tabela 9) exhibe qualidade inferior conforme o horizonte de previsão aumenta. Os coeficientes b1 e b2, referentes às estações 75550000 e 75700000, assumem seus máximos em t-3 e t-4, respectivamente. Os valores estimados de tempo de propagação da onda foram de 29,1h e 13,6h, respectivamente. Aqui o método de estimativa do tempo de propagação da onda resultou em tempos menores que os encontrados pela análise dos máximos dos coeficientes. A estimativa atuou então a favor da segurança

Os valores de NS indicam que é pior usar o modelo do que usar a média do período aferido a partir do horizonte de t-9.

A memória da série de duas leituras da 75780000 aparenta ser nula de $t-5$ em diante, sendo possivelmente não maior que 48 horas, pois o coeficiente b_3 assume valor nulo em $t-5$.

Figura 31. Regressão 3, São Borja, cota diária.

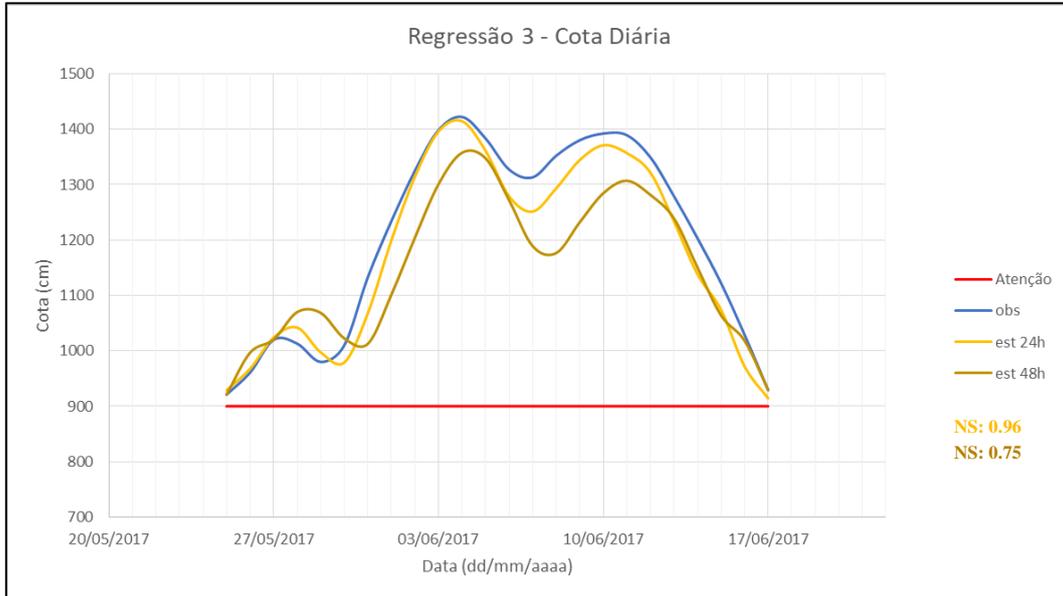
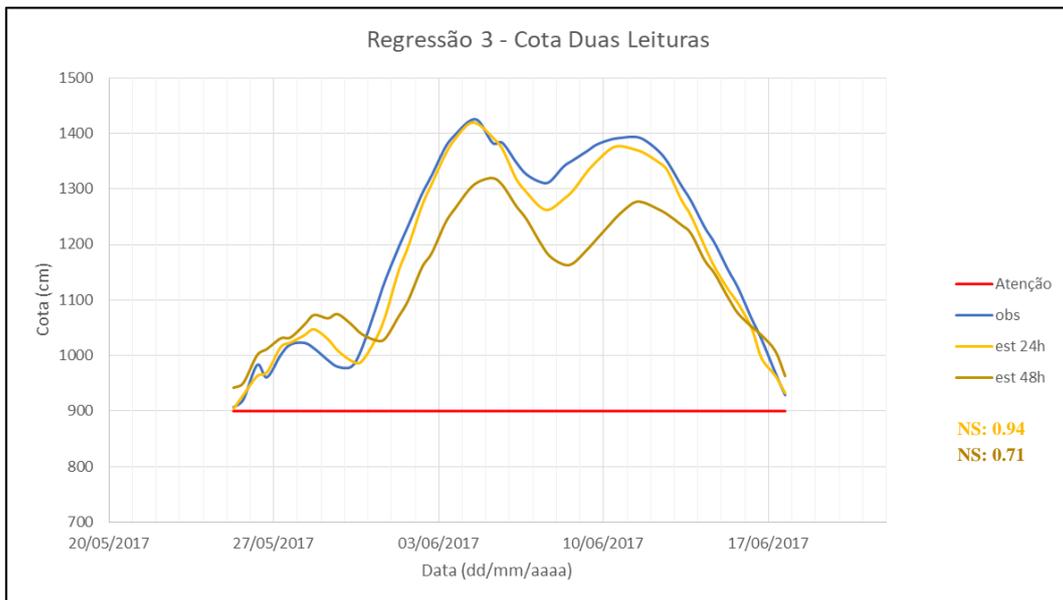


Figura 32. Regressão 3, São Borja, cota duas leituras.



Nas Figuras 31 e 32 são exibidos os cotogramas para 24 e 48h de antecedência para cota diária e cota duas leituras no período de 25/05/2017 e 17/06/2017. Esse evento apresenta reincidência de pico, isto é, não é uma subida e descida única. Num geral, o

comportamento do estimado é bastante fidedigno ao observado. Os estimados 24h para cota diária e cota duas leituras apresentaram NS de 0.96 e 0.94, respectivamente.

5.1.4. REGRESSÃO 4 (ITAQUI)

Figura 33. Diagrama unifilar Regressão 4.

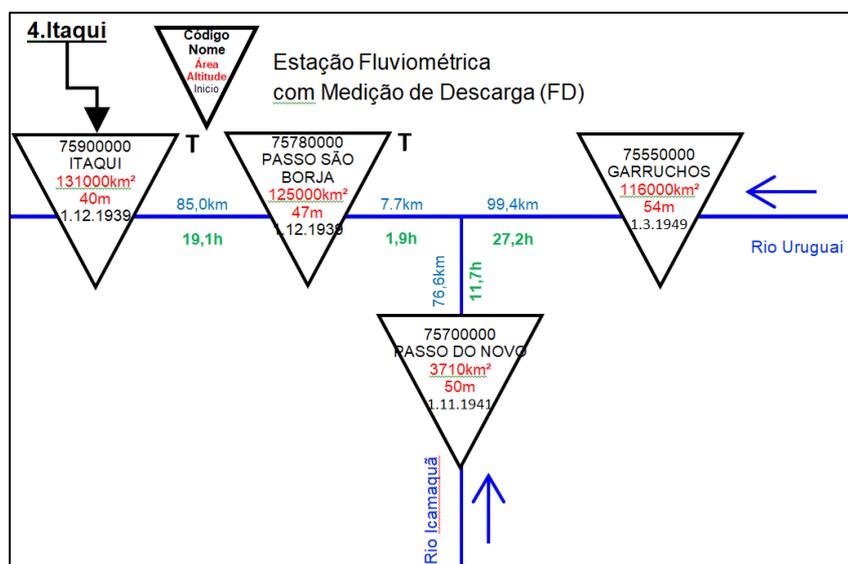


Tabela 10. Regressão Itaqui (75900000) com dados cota diária.

REGRESSÃO ITAQUI (Cota Diária) $h > 820\text{cm}$						
	t-	1	2	3	4	5
75780000	b1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
75550000	b2	0.087	0.156	0.179	0.141	0.120
75700000	b3	0.051	0.108	0.168	0.164	0.123
75900000	b4	0.859	0.694	0.498	0.299	0.169
	b5	36.5	105.4	247.4	479.9	643.7
	(E95/EMA - 1)	1.41	1.73	1.99	1.72	1.72
	(REMQ/EMA - 1)	0.27	0.50	0.38	0.30	0.30
	EMA	11.06	23.07	42.89	61.03	74.24
	CP	0.09	0.12	0.16	0.17	0.17
	NS	0.99	0.94	0.82	0.68	0.52
	Erro Abs Médio	12.06	23.41	39.58	54.60	64.68

Os coeficientes b2 e b3 das estações 75550000 e 75700000 assumem valor máximo em t-3 (72 horas atrás). Os tempos de propagação estimados são de 48,2 h e 32,7 h, respectivamente. Aqui o método de estimativa do tempo de propagação da onda

resultou em tempos menores que os encontrados pela análise dos máximos dos coeficientes. A estimativa atuou então a favor da segurança. O melhor coeficiente encontrado para estação 75780000 é nulo, o que indica que possivelmente as outras variáveis explicam mais o comportamento da 75900000.

Quanto às métricas de aferição, o coeficiente NS expressa que a regressão é mais adequada do que utilizar simplesmente a média do período pelo menos até o horizonte de t-5.

A série de cotas diárias da 75900000 aparenta ter uma memória maior do que as outras regressões a montante, pois o coeficiente b4 em nenhum momento atinge valor nulo.

Tabela 11. Regressão Itaqui (75900000) com dados cota duas leituras.

REGRESSÃO ITAQUI (Cota Duas Leituras) h>820cm											
	t-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
75780000	b1	0.045	0.069	0.064	0.017	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
75550000	b2	0.021	0.052	0.087	0.144	0.157	0.159	0.153	0.133	0.115	0.107
75700000	b3	0.026	0.054	0.083	0.108	0.134	0.153	0.166	0.159	0.141	0.132
75900000	b4	0.916	0.828	0.749	0.684	0.587	0.493	0.386	0.295	0.218	0.164
	b5	7.0	28.9	64.3	111.3	183.8	283.6	385.9	496.2	594.9	658.0
	(E95/EMA - 1)	1.45	1.77	1.86	2.06	1.98	1.95	1.74	1.79	1.73	1.79
	(REMQ/EMA - 1)	0.47	0.35	0.35	0.44	0.42	0.35	0.31	0.30	0.31	0.32
	EMA	8.02	13.04	19.33	25.53	34.11	43.69	52.53	60.67	67.44	72.98
	CP	0.23	0.14	0.13	0.14	0.15	0.16	0.16	0.17	0.17	0.17
	NS	0.99	0.98	0.96	0.93	0.88	0.82	0.76	0.68	0.59	0.52
	Erro Abs Médio	8.00	13.66	20.06	26.59	34.42	41.98	48.92	55.15	60.23	64.01

Os coeficientes b2 e b3 das estações 75550000 e 75700000 assumiram valor máximo em t-6 e t-7, respectivamente. Os tempos de propagação estimados são de 48,2 h e 32,7 h, respectivamente. Aqui o método de estimativa do tempo de propagação da onda resultou em tempos menores que os encontrados pela análise dos máximos dos coeficientes. A estimativa atuou então a favor da segurança. O coeficiente b1 atinge valor máximo em t-2, o que corrobora para valia do método utilizado para estimar a propagação da onda, que resultou em 19,1 h. Para horizontes maiores de previsão depois de t-5, a interferência do observado na 75780000 se torna nula.

Quanto às métricas de aferição, o NS expressa que pelo menos até o horizonte de t-10 a regressão é mais adequada do que utilizar a média do período.

A série de cotas diárias da 75900000 aparenta ter uma memória maior do que as outras regressões a montante, pois o coeficiente b_4 até $t-10$ em nenhum momento atinge valor nulo.

Figura 34. Regressão 4, Itaqui, cota diária.

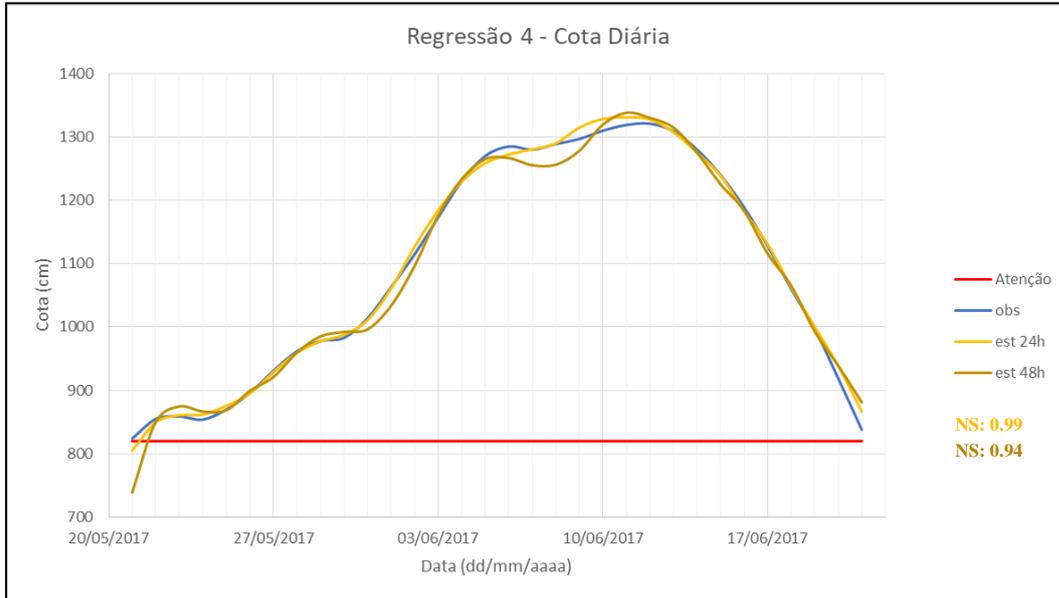
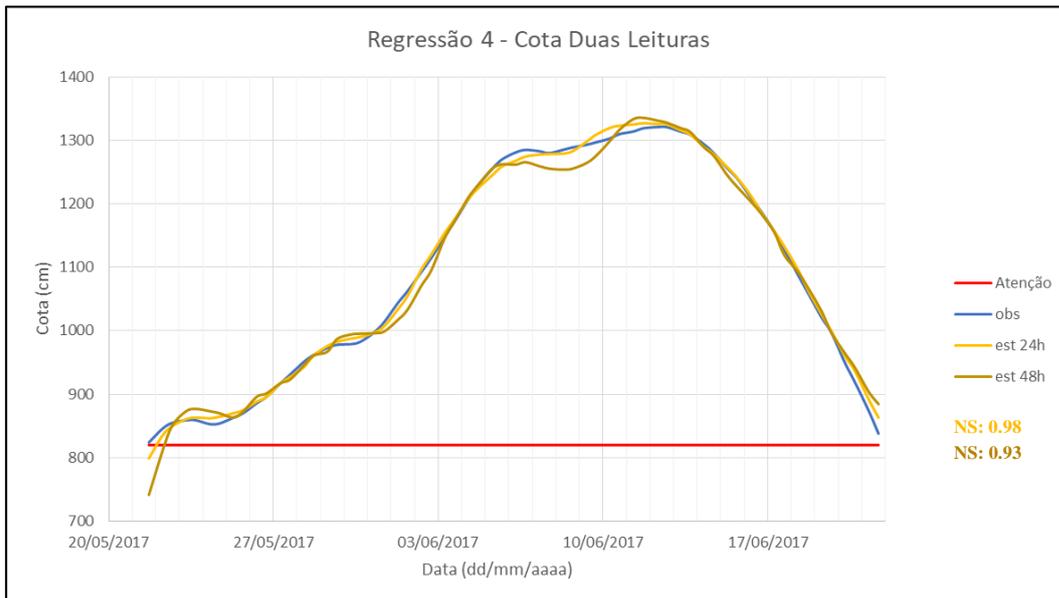


Figura 35. Regressão 4, Itaqui, cota duas leituras.



No período apresentado de 21/05/2017 até 21/06/2017, os estimados seguem bastante o traçado do observado. Não por menos o coeficiente NS foi acima de 0.92 para antecedência de até 48h. Atenta-se apenas para um pequeno erro nos picos embora esse seja ínfimo de em torno de 20 cm.

5.1.5. REGRESSÃO 5 (URUGUAIANA)

Figura 36. Diagrama unifilar Regressão 5.

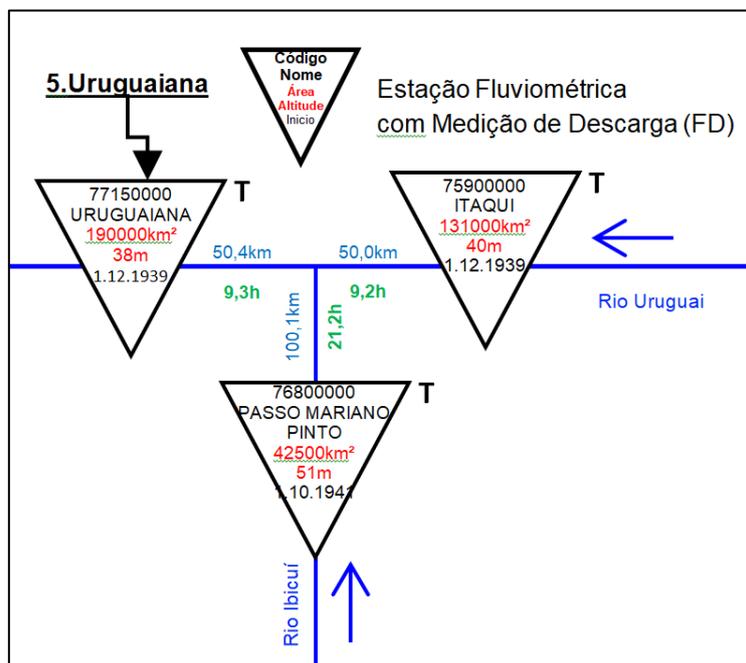


Tabela 12. Regressão Uruguiana (77150000) com dados vazão diária.

REGRESSÃO URUGUAIANA (Vazão Diária) Q>680cm						
	t-	1	2	3	4	5
76800000	b1	0.195	0.324	0.329	0.283	0.256
75900000	b2	0.784	1.086	0.701	0.490	0.386
77150000	b3	0.352	0.000	0.000	0.000	0.000
	b4	845.6	2353.8	5579.4	7524.2	8471.7
	(E95/EMA - 1)	1.84	1.75	1.78	2.22	2.34
	(REMQ/EMA -1)	0.42	0.32	0.32	0.34	0.36
	EMA	399.92	901.24	1746.28	2291.44	2608.89
	CP	0.32	0.35	0.62	0.66	0.61
	NS	0.98	0.92	0.69	0.46	0.29
	Erro Abs Médio	373.35	738.09	1121.19	1311.24	1420.66

Os coeficientes b1 e b2 das estações 76800000 e 75900000 assumiram valor máximo em t-3 e t-2, respectivamente. Os tempos de propagação estimados são de 30,5h e 18,5h, respectivamente. Pelo método empregado para estimar a propagação da

onda, esperar-se-ia que os valores máximos fossem obtidos em t-1, ou antes. Portanto, o método atuou conforme a hipótese de ser a favor da segurança.

Quanto às métricas de aferição, o NS expressa que pelo menos até o horizonte de t-5 a regressão é mais adequada do que utilizar a média do período.

A série de cotas diárias da 77150000 aparenta ter uma memória pequena de em torno de 24 horas, pois o coeficiente b3 atinge valor nulo já em t-2.

Tabela 13. Regressão Uruguiana (77150000) com dados cota duas leituras.

REGRESSÃO URUGUAIANA (Cota Duas Leituras) h>680cm											
	t-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
76800000	b1	0.032	0.073	0.106	0.111	0.116	0.130	0.129	0.137	0.144	0.157
75900000	b2	0.265	0.575	0.778	0.714	0.628	0.532	0.465	0.384	0.326	0.275
77150000	b3	0.671	0.277	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	b4	44.3	100.8	150.0	201.9	272.5	346.1	404.9	467.3	510.1	541.1
	(E95/EMA - 1)	2.46	2.45	1.92	1.40	1.16	1.14	1.22	1.37	1.49	1.59
	(REMQ/EMA - 1)	0.73	0.77	0.67	0.41	0.28	0.23	0.21	0.22	0.22	0.24
	EMA	9.46	16.17	25.18	37.15	50.21	62.11	71.78	80.03	86.77	93.07
	CP	0.47	0.44	0.42	0.38	0.37	0.37	0.37	0.37	0.36	0.35
	NS	0.99	0.97	0.93	0.88	0.83	0.76	0.68	0.60	0.53	0.45
	Erro Abs Médio	11.26	17.17	23.33	31.69	40.70	49.19	56.03	61.39	65.44	68.37

Os coeficientes b1 e b2 das estações 76800000 e 75900000 assumiram valores máximos em t-10 e t-3, respectivamente. Os tempos de propagação estimados são de 30,5h e 18,5h, respectivamente. Pelo método empregado para estimar a propagação da onda, esperar-se-ia que os valores máximos fossem obtidos em t-3 e t-2, respectivamente. O coeficiente b1 apresentou comportamento atípico porque há um máximo local em t-6 (72 horas), o que faria mais sentido já que o máximo do mesmo na Tabela 12 foi alcançado em t-3 (72 horas). Talvez tenha ocorrido algum problema numérico, como uma otimização local de parâmetros, que é plenamente possível dada a natureza do método empregado descrito em 4.12.

Quanto às métricas de aferição, o NS expressa que pelo menos até o horizonte de t-10 a regressão é mais adequada do que assumir a média do período como previsão.

A série de cotas diárias da 77150000 aparenta ter uma memória pequena de em torno de 24 horas, pois o coeficiente b3 atinge valor nulo já em t-3.

Figura 37. Regressão 5, Uruguiana, vazão diária.

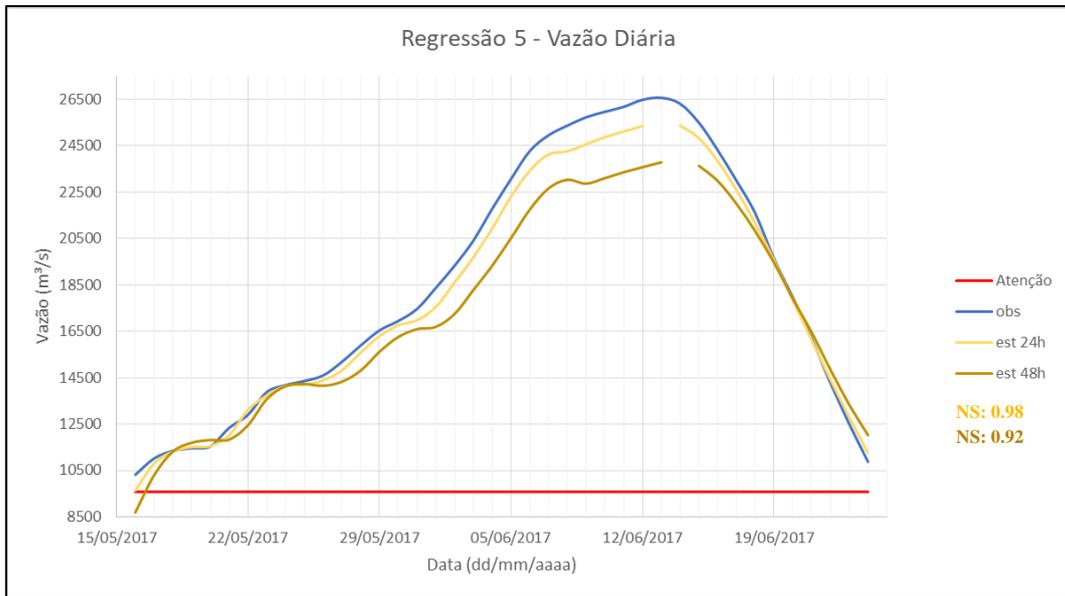
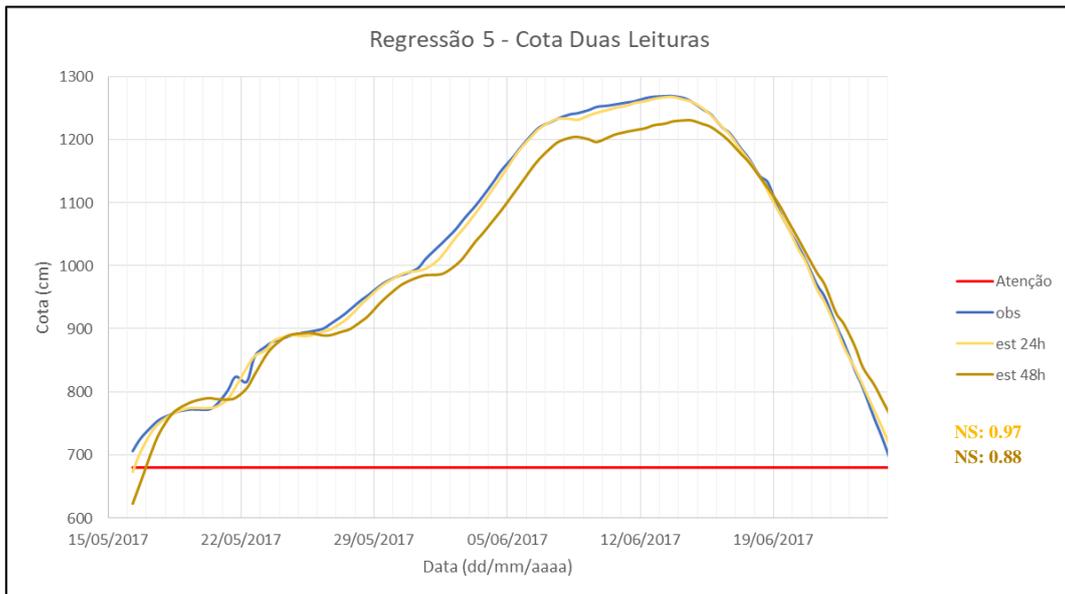


Figura 38. Regressão 5, Uruguiana, cota duas leituras.



Nas Figuras 37 e 38 estão apresentadas as regressões para o período de 15/05/2017 até 24/05/2017. Os estimados 24 e 48h para cota diária apresentaram NS de 0.98 e 0.92. Os estimados 24 e 48h para cota duas leituras apresentaram NS de 0.97 e 0.88. Apesar de que pelas as regressões vazão diária parecerem pior que as de cota duas

leituras, as métricas apontam o contrário. Isso se deve ao fato dos dados de vazão e cotas apresentarem grandezas diferentes.

Novamente, ocorre a não disponibilidade de dados para previsão durante o momento do pico máximo na Figura 37. Isso ocorre porque se deve ter falhado em registrar o dado para uma das estações de montante.

5.1.6. REGRESSÃO 6 (BARRA DO QUARAÍ)

Figura 39. Diagrama unifilar Regressão 6.

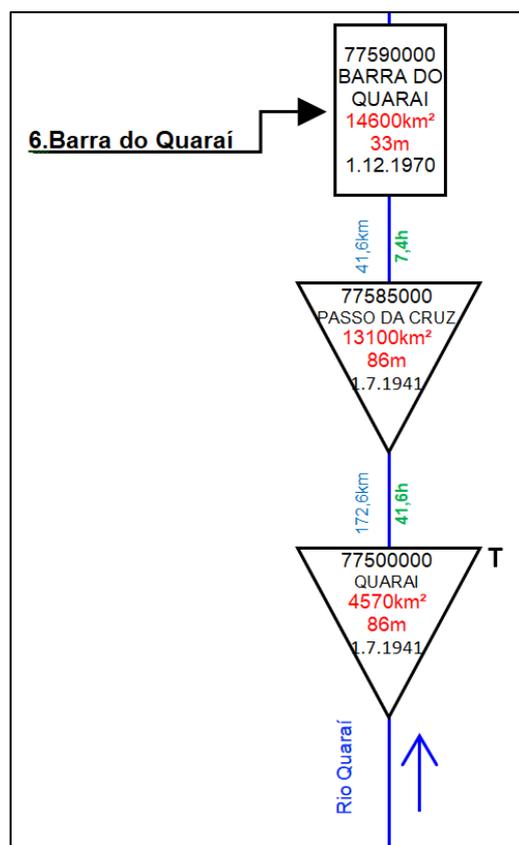


Tabela 14. Regressão Barra do Quaraí (77590000) com dados cota diária.

REGRESSÃO BARRA DO QUARAÍ (Cota Diária) h>820cm						
t-	1	2	3	4	5	
77500000	b1	0.037	0.054	0.040	0.045	0.050
77585000	b2	0.004	0.019	0.050	0.072	0.087
77590000	b3	0.921	0.759	0.521	0.336	0.251
	b4	38.5	138.4	299.4	410.0	456.7
(E95/EMA - 1)		2.20	1.62	1.46	1.61	1.69
(REMQ/EMA -1)		0.39	0.31	0.28	0.33	0.35
EMA		27.09	49.78	62.27	70.11	75.61
CP		0.88	0.69	0.50	0.40	0.34
NS		0.89	0.68	0.52	0.34	0.20
Erro Abs Médio		23.64	45.36	57.55	62.38	67.36

Os coeficientes b1 e b2 das estações 77500000 e 75850000 assumiram valores máximos em t-2 e t-5, respectivamente. Os tempos de propagação estimados são de 51,0 h e 7,4 h, respectivamente. Pelo método empregado para estimar a propagação da onda, esperar-se-ia que os valores máximos fossem obtidos em t-2 e t-1, ou em períodos respectivamente maiores. Devido à tamanha proximidade temporal entre a estação 77585000 e Barra do Quaraí, combinada com o grande intervalo temporal de medição configurado, o uso de regressão linear múltipla não seja tão recomendável.

Quanto às métricas de aferição, o NS expressa que pelo menos até o horizonte de t-5 a regressão é mais adequada do que utilizar a média do período.

A série de cotas diárias da 77590000 aparenta ter uma memória maior que 5 dias, pois o coeficiente b3 não atinge valor nulo até t-5.

Tabela 15. Regressão Barra do Quaraí (77590000) com dados cota duas leituras.

REGRESSÃO BARRA DO QUARAÍ (Cota Duas Leituras) h>820cm											
	t-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
77500000	b1	0.007	0.012	0.001	0.010	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
77585000	b2	0.000	0.012	0.050	0.077	0.019	0.021	0.042	0.047	0.067	0.094
77590000	b3	0.940	0.912	0.896	0.814	0.586	0.141	0.115	0.102	0.092	0.052
	b4	35.0	47.6	48.2	93.2	265.7	514.2	523.0	530.1	529.1	540.4
	(E95/EMA - 1)	2.02	1.89	1.73	1.51	1.61	2.19	2.22	2.26	2.32	2.34
	(REMQ/EMA -1)	0.48	0.33	0.34	0.28	0.26	0.38	0.38	0.38	0.38	0.39
	EMA	16.57	27.90	38.82	50.36	67.36	115.69	117.81	118.27	119.54	122.32
	CP	1.11	0.98	0.85	0.78	0.91	2.35	1.88	1.52	1.29	1.18
	NS	0.97	0.93	0.86	0.79	0.64	-0.30	-0.34	-0.37	-0.37	-0.47
	Erro Abs Médio	12.20	22.33	33.62	41.09	39.45	32.65	33.01	33.28	33.44	33.80

Os coeficientes b1 e b2 das estações 77500000 e 75850000 assumiram valores máximos em t-2 e t-10. Os tempos de propagação estimados são de 51,0 h e 7,4 h, respectivamente. Pelo método empregado para estimar a propagação da onda, esperar-se-ia que os valores máximos fossem obtidos em t-4 e t-1, ou maiores, respectivamente. Os coeficientes b1 e b2 apresentaram valores relativamente baixos em comparação ao b3 da variável autoregressiva, a qual até t-4 dominou a regressão no poder explicativo.

Quanto às métricas de aferição, o NS expressa que pelo menos até o horizonte de t-5 a regressão é mais adequada do que assumir a média do período como previsão.

A série de cotas diárias da 77590000 aparenta ter uma memória considerável até t-4, pois o coeficiente b3 mantém valor acima de 0,8 até t-4. Salienta-se que mesmo em t-10 o valor de b3 ainda se encontra positivo, embora extremamente baixo.

Figura 40. Regressão 6, Barra do Quaraí, cota diária.

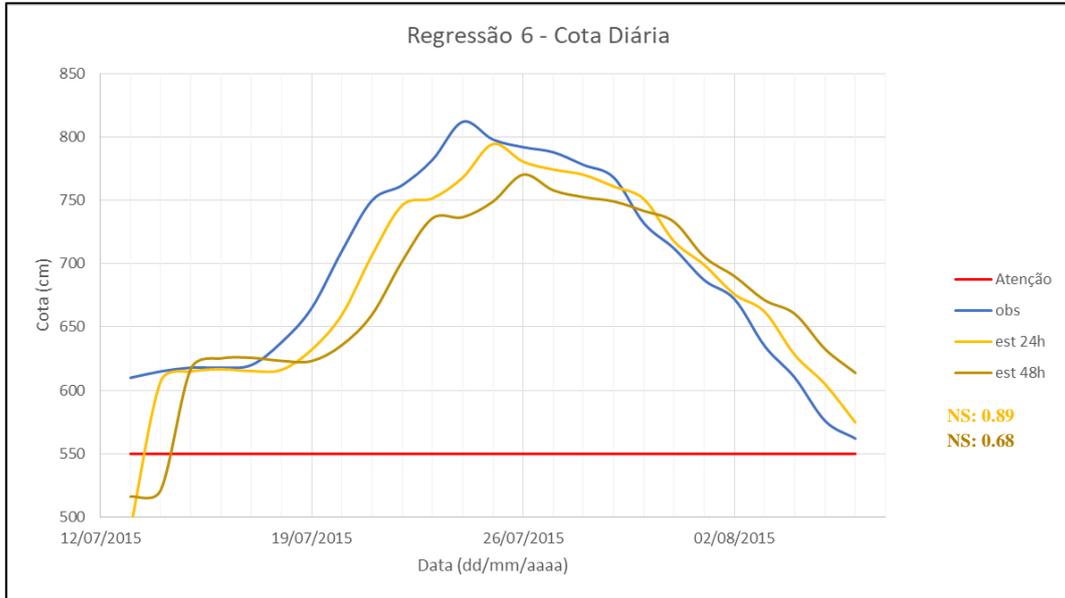
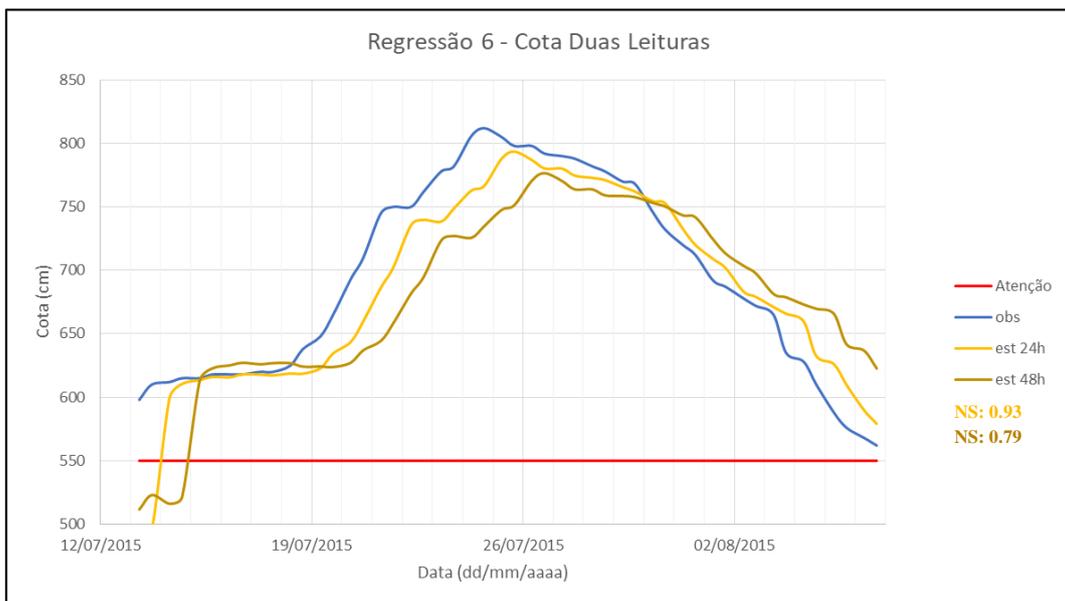


Figura 41. Regressão 6, Barra do Quaraí, cota duas leituras.



Nas Figuras 40 e 41 os estimados parecem à primeira vista estar atrasados, porém isso acontece porque a calibração encontrou a solução ótima ao dispor bastante peso para a variável autoregressiva.

5.1.7. REGRESSÃO 7 (RIO URUGUAI TOTAL)

Figura 42. Diagrama unifilar Regressão 7.

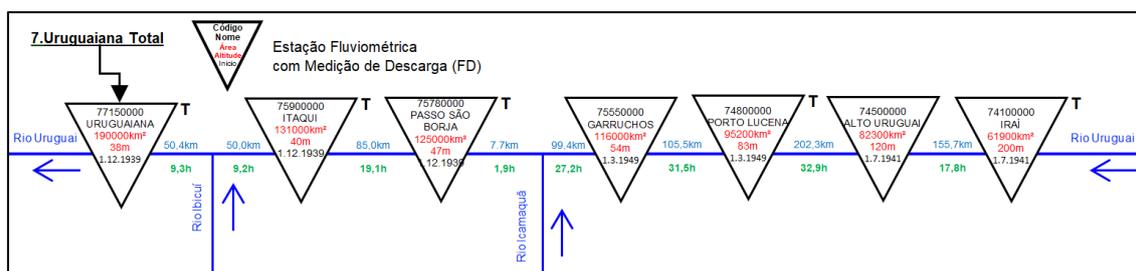


Tabela 16. Regressão Uruguaiana Total (77150000) com dados cota diária.

REGRESSÃO URUGUAIANA TOTAL (Cota Diária) h>680cm						
	t-	1	2	3	4	5
75900000	b1	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002
75780000	b2	0.092	0.039	0.000	0.000	0.000
75550000	b3	0.035	0.135	0.161	0.133	0.077
74800000	b4	0.000	0.000	0.046	0.081	0.153
74500000	b5	0.000	0.004	0.002	0.002	0.003
74100000	b6	0.000	0.000	0.031	0.060	0.058
77150000	b7	0.820	0.658	0.520	0.371	0.274
	b8	51.2	157.2	259.0	379.1	478.4
	(E95/EMA - 1)	1.49	1.64	1.36	1.25	1.23
	(REMQ/EMA -1)	0.47	0.28	0.22	0.19	0.20
	EMA	18.68	37.20	54.53	68.10	78.43
	CP	0.39	0.31	0.28	0.25	0.24
	NS	0.96	0.87	0.76	0.65	0.52
	Erro Abs Médio	17.72	31.44	43.73	54.03	62.69

. Os coeficientes b1-b6 fornecem um indicativo do tempo de propagação da onda até a estação de Uruguaiana. O dado medido na estação 75550000, por exemplo, parece levar algo em torno de 72 horas para chegar a Uruguaiana. A estimativa de tempo de propagação da onda aponta como 66,7h esse mesmo tempo.

Quanto às métricas de aferição, o NS expressa que pelo menos até o horizonte de t-5 a regressão é mais adequada do que utilizar a média do período.

A série de cotas diárias da 77150000 nessa regressão apresentou comportamento diferente que a da Tabela 12, aparentando uma memória maior do que 5 dias, pois o coeficiente b7 não atinge valor nulo até t-5.

Tabela 17. Regressão Uruguaiana Total (77150000) com dados cota duas leituras.

REGRESSÃO URUGUAIANA TOTAL (Cota Duas Leituras) h>680cm											
t-		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
75900000	b1	0.107	0.231	0.296	0.299	0.263	0.227	0.221	0.170	0.125	0.024
75780000	b2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
75550000	b3	0.024	0.047	0.068	0.075	0.079	0.079	0.092	0.095	0.093	0.103
74800000	b4	0.000	0.009	0.022	0.076	0.118	0.160	0.025	0.000	0.000	0.000
74500000	b5	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.086	0.107	0.115	0.111
74100000	b6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
77150000	b7	0.844	0.653	0.513	0.416	0.367	0.325	0.258	0.240	0.202	0.237
	b8	29.9	71.2	118.1	171.4	225.5	275.6	326.6	377.2	440.9	487.2
	(E95/EMA - 1)	2.17	1.63	1.43	1.26	1.24	1.32	1.29	1.33	1.26	1.34
	(REMQ/EMA - 1)	0.60	0.45	0.37	0.29	0.25	0.22	0.20	0.20	0.20	0.21
	EMA	10.82	18.52	27.60	37.20	46.34	54.86	60.62	66.74	72.55	77.19
	CP	0.51	0.38	0.35	0.33	0.31	0.31	0.28	0.28	0.28	0.27
	NS	0.98	0.96	0.92	0.87	0.81	0.74	0.70	0.64	0.57	0.50
	Erro Abs Médio	11.86	19.21	25.66	31.94	37.95	43.71	48.24	53.29	58.24	62.21

Os coeficientes b1-b6, assim como na Tabela 15, fornecem um indicativo do tempo de propagação das ondas. A estação 75900000, por exemplo, apresentou coeficiente máximo em t-4. A estimativa do tempo de propagação foi de 18,5h. O método de estimativa atuou a favor da segurança. Na regressão 7 os coeficientes expressam que pelo menos as estações 757800000 e a 74100000 nada contribuem para a previsão.

Quanto às métricas de aferição, o NS expressa que pelo menos até o horizonte de t-10 a regressão é mais adequada do que assumir a média do período como previsão.

A série de cotas duas leituras da 77150000 nessa regressão apresentou comportamento diferente que a da Tabela 13, aparentando uma memória maior do que 5 dias, pois o coeficiente b7 não atinge valor nulo até t-10.

Há acontecimentos bastante interessantes expressos nas Tabelas 16 e 17. Como mencionado no item 5.2, não deve haver nenhuma relação causa-efeito real para essas regressões advindas da estação 74100000 e 74500000, considerando que o método utilizado para estimar a propagação da onda de cheia atua a favor da segurança, isto é, fornecendo uma estimativa de tempo de propagação menor ou igual a real.

Aqui se depara com um dos principais impasses dos modelos empíricos, e que também, não por menos, é salientado no capítulo de regressão e correlação de

Naghetini e Pinto (2007): não é porque se encontra uma correlação, um resultado matemático favorável, que haja uma realidade causal entre as variáveis.

Figura 43. Regressão 7, rio Uruguai Total, cota diária.

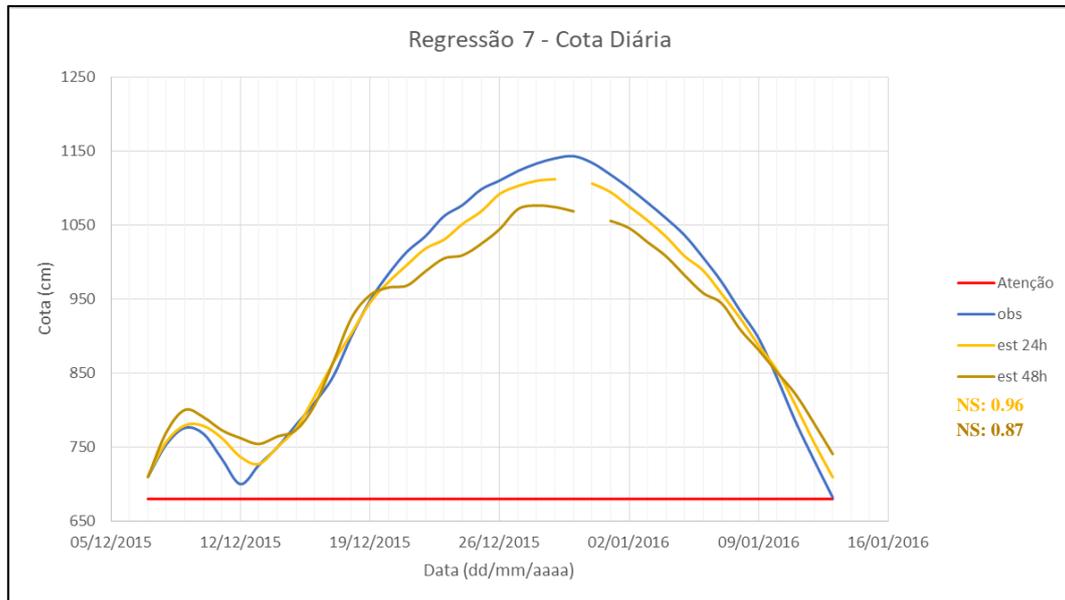
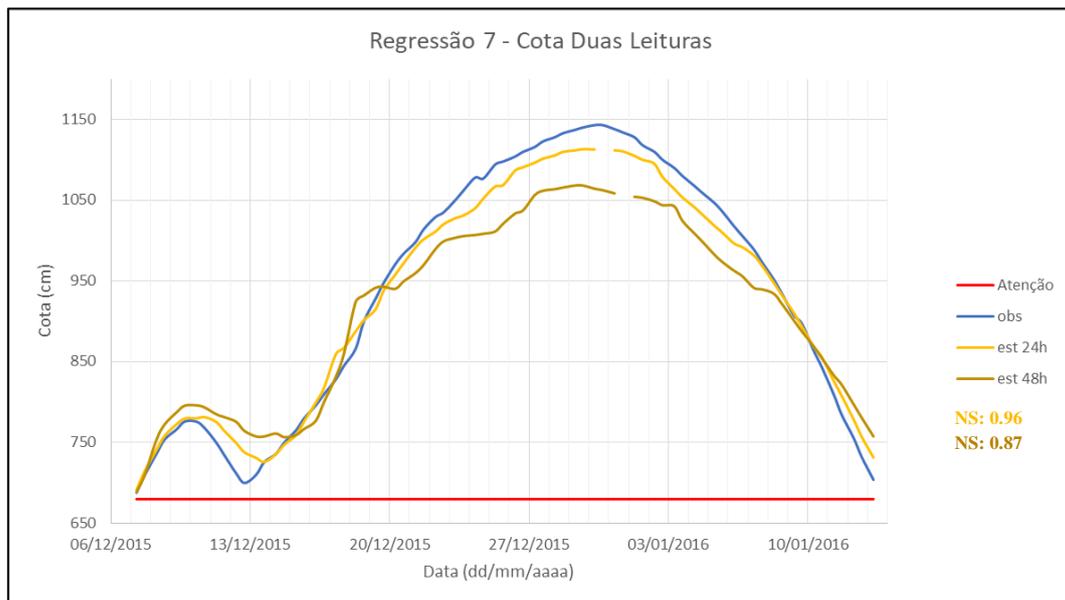


Figura 44. Regressão 7, rio Uruguai Total, cota duas leituras.



Nas Figuras 43 e 44 encontram-se os cotagramas de cota diária e cota duas leituras para 24 e 48 horas de antecedência para o evento do período de 7/12/2015 até 13/01/2016. Há aqui novamente uma falha na previsão devido à falta de algum dos dados de montante.

5.1.8. DISCUSSÃO GERAL

Os resultados apontam que num geral o método utilizado para a estimativa do tempo de propagação da onda fornece tempos menores ou iguais aos reais. O método, então, realmente funciona a favor da segurança. O método não funcionou a favor da segurança apenas para a Regressão 1, Porto Lucena.

As regressões apresentam pior qualidade conforme o horizonte de previsão aumenta.

Entre utilizar dados diários e dados duas leituras, o segundo é preferível porque é possível que a previsão possa ser feita em intervalos menores do que 24 horas. No entanto, os NS para 24 e 48h não foram sempre maiores para as estimativas feitas por duas leituras, nem para cotas diárias.

Como exibido na Tabela 18. O NS para a Regressão 1 indica uma regressão de péssima qualidade. Os NS para as Regressões 2-5 são maiores para cota diária. Exceção foi a Regressão 6, em que duas leituras levou a NS melhor, e a Regressão 7 que apresentou valores iguais.

Tabela 18. NS para antecedência 24 e 48h por regressão.

		NS da Regressão						
		1	2	3	4	5	6	7
Cota Diária	24h	0.00	0.77	0.96	0.99	0.98	0.89	0.96
	48h	-0.46	0.28	0.75	0.94	0.92	0.68	0.87
Cota Duas Leituras	24h	0.35	0.73	0.94	0.98	0.97	0.93	0.96
	48h	-0.33	0.09	0.71	0.93	0.88	0.79	0.87

As regressões montadas contam sempre com variável autoregressiva, e essa costuma apresentar alta contribuição para explicar a previsão. Isto pode ser eventualmente um problema porque é no momento de eventos extremos que a estação costuma deixar de funcionar. Com a estação não funcionando, elas passam a apresentar

falhas que comprometem as regressões. Porém, na realidade, qualquer estação pode eventualmente deixar de funcionar, e por isso seria interessante equações-reservas, com outras combinações de estações, para quando isso ocorra.

Há uma planilha Excel (MICROSOFT EXCEL OFFICE) que foi utilizada durante esse trabalho e pode ser utilizada para novos estudos durante a montagem de outras regressões. Nela estão todos os dados utilizados e alguns outros. A operação da planilha não é complicada e está disponível no seguinte sítio: <https://drive.google.com/open?id=1Pk2LOHtwq9_dq8XTIQf-_quH_BWlpmv6>

Na primeira aba, há uma explicação de como proceder com o uso da planilha.

6. CONCLUSÃO

O objetivo geral desse estudo foi avaliar o uso de um modelo hidrológico baseado em regressões lineares que fosse capaz de prever cotas na bacia do rio Uruguai. As localidades estudadas foram de montante para jusante: Porto Lucena, Garruchos, São Borja, Itaqui, Uruguai e Barra do Quaraí. O uso de regressão linear para previsão das localidades mais a jusante no rio Uruguai, como São Borja, Itaqui e Uruguai, apresentou melhor qualidade. Em regra nas localidades quanto mais a montante por apresentarem eventos de inundação mais rápidos que nas de jusante, apresentaram piores qualidades segundo as métricas utilizadas.

Para Uruguai e Itaqui, por exemplo, que são dois municípios bastante atingidos por eventos de inundação, o estudo aponta ser possível o desenvolvimento de um modelo hidrológico de regressão linear. Porém, para Porto Lucena, ao menos dada à metodologia utilizada, a construção de um modelo não é indicada. Devido à velocidade de propagação da onda de cheia ser muito rápida em comparação com o grande intervalo temporal entre medições, pode ser, inclusive, que nenhuma metodologia que trabalhe com dados cota-cota das estações de Alto Uruguai e Iraí para prever Porto Lucena apresente boa qualidade, dado a atual disponibilidade de dados.

Sugere-se o uso das regressões de até 48 horas para a regressão 7, 5 e 4 (Uruguai e Itaqui), pois apresentam NS maior que 0.87. Para São Borja, sugere-se o uso das regressões de até 24 horas de antecedência. A regressão 6 desenvolvida para Barra do Quaraí, duas leituras, pode ser usada até 24 horas de antecedência.

Uma solução para realizar a previsão nessas localidades mais a montante possa ser o uso de previsão chuva-vazão, como o MGB-IPH, por exemplo, e concomitantemente coletar dados telemétricos em intervalos de tempo menores, como, por exemplo, de hora em hora, para que num futuro se desenvolvam regressões para localidade.

Dos dados utilizados nesse trabalho, o portal Hidroweb apresenta uma grande quantidade de estações fluviométricas, porém muitas estações, geralmente aquelas não operadas pela CPRM, não apresentavam série histórica. As estações procuradas presentes no Hidroweb em território internacional não possuíam dados em séries históricas. No caso da Argentina, podem-se encontrar dados facilmente no portal BDHI. Os dados do Uruguai foram de difícil obtenção. Esses precisaram ser requisitados para o MVOTMA frente à explicação do objetivo em mente para o uso dos dados. No caso, esse estudo.

As análises de consistência empregadas localizaram períodos de falhas nas séries. No caso das séries de vazão, identificaram-se possíveis inconsistências nas estações de Porto Lucena e Garruchos, pois essas apresentam vazões medidas bem maiores que as vazões medidas logo nas estações a jusante.

Construiu-se um diagrama unifilar das 12 estações utilizadas nesse estudo, e, além de estimar o tempo de propagação da onda cheia entre elas, realizou-se breve consistência dos dados, e, dado as regras de consistências utilizadas, dentre essas estações não se encontrou nenhum indicativo de equívoco, exceto a estação de Alto Uruguai que apresentou discrepância de 30 metros entre a altitude fornecida e a calculada via SRTM30.

Realizou-se análise de disponibilidade de dados no período de 1991 até agosto de 2017 para as estações utilizadas. A estação 77585000 possui dados apenas de meados de 2008 em diante, e a estação 75900000 possui falhas até em torno do fim de 2007. Esses foram dois fatores que interferiram nos modelos desenvolvidos. Os dados das séries históricas também nem sempre são consistidos, como esse estudo apontou no item 4.8.

Os dados da Proteção e Defesa Civil presentes no portal S2iD são importantes do momento de identificação dos principais municípios atingidos por eventos extremos,

e nesse mesmo portal consta dados de outros eventos extremos que levaram a situação de emergência, porém não foram utilizados nesse estudo.

Conseguiu-se desenvolver modelos hidrológicos para previsão de cheias e inundações na bacia do rio Uruguai embora alguns deles apresentem uma qualidade não tão boa segundo as métricas utilizadas: NS, CP, EMA, E95.

Nesse trabalho se fez o uso de variáveis exógenas (as estações a montante), variáveis autoregressivas (a própria estação para qual se realiza previsão) e também o coeficiente linear (aquele não multiplica nenhuma variável). As regressões para Uruguaiana, Itaqui e São Borja, embora tenham apresentado boas métricas, como NS acima de 0.9, apresentam certa fragilidade porque dependem da garantia de funcionamento da estação que mede a variável explicada durante o evento extremo.

Utilizar muitas componentes para uma regressão não é adequado porque dificulta a definição dos pontos ótimos para os coeficiente no momento da calibração. A Regressão 7, que possuía 8 coeficientes para serem calibrados levou algo como 30 minutos para cada calibração e, devido ao algoritmo utilizado, nada garante que seja o ótimo global. Pode ser que alguns coeficientes tenham sido zerados apenas porque a interferência da estação respectiva fosse pequena frente a outras, como a variável autoregressiva em períodos de antecedência menores.

Dentre os impasses encontrados nesse trabalho, a dificuldade de obtenção de dados fluviométricos do Uruguai foi um deles. Isso ocorreu não por problemas com o idioma, mas por não haver um portal de dados destinado ao usuário público, como há no Brasil (Hidroweb) e na Argentina (BDHI).

Outro impasse foi na utilização do algoritmo de calibração utilizado, pois nada garante que os coeficientes calibrados representem realmente um ponto de ótimo global. Não se utilizou outros filtros que foram cogitados, ou de outras espécies de regressão, testando retirar variáveis autoregressivas e os coeficientes lineares, como feito em outros trabalhos encontrados na literatura

Não foi possível neste momento automatizar os modelos desenvolvidos, ou trabalhar com atualização deles, visto que para tal seria necessário um desenvolvimento de um programa mais específico numa linguagem computacional, como o VBA, e isso exigiria mais tempo.

7. RECOMENDAÇÕES

Restam algumas sugestões para trabalhos futuros:

- É de se pensar o uso associado de diferentes modelos para o sistema de alerta do rio Uruguai. Talvez o caso seja de utilizar previsão chuva-vazão para estações a montante e acoplar com regressões lineares cota-cota para menores períodos de antecedência (24 ou 48h) para as estações a jusante.
- Muitas estações telemétricas no rio Uruguai são recentes e num futuro poderão fornecer dados com maior frequência temporal, o que pode vir a propiciar o desenvolvimento de regressões para as estações que aqui nesse trabalho os índices apresentaram qualidade não tão boa.
- É possível refazer o mesmo estudo utilizando outros filtros e comparar a diferença entre a adoção desses.
- Averiguar a possibilidade de montar os modelos sem o uso das variáveis autoregressivas, bem como o uso de outras abordagens de modelos também empíricos, como, por exemplo, o uso de redes neurais, que já foi aplicado com sucesso na bacia do rio Caí (PEDROLLO *et al.*, 2011).
- Utilizar os dados disponibilizados do BDHI para aperfeiçoar a modelagem da bacia do rio Uruguai. Os dados do Uruguai foram obtidos apenas para duas estações no dia 19 de Dezembro após mais de dois meses de espera. A obtenção de dados do Uruguai é demorada e deve ser o primeiro passo em estudos futuros. O processo de obtenção dos dados do Uruguai começa por pedido junto ao MVOTMA – *Ministerio de Vivencia Ordenamento Territorial y Meio Ambiente*.
- A cota de alerta e atenção foram definidas de maneira, no mínimo, subjetiva. Um estudo mais aguçado preocupar-se-ia em identificar a partir de qual cota (de alerta) é possível com baixo grau de incerteza começar a realizar as previsões, testando a razão entre alertas falsos e alertas verdadeiros. Em Fan (2015), por exemplo, faz-se uso da metodologia ROC, *Relative Operating Characteristic*, para medir a qualidade do modelo em prever um evento discreto em função de diferentes limiares. O método consiste em trabalhar com dois índices: Probabilidade de Detecção, *Probability Of Detection* (POD); Probabilidade de Falsa Detecção, *Probability Of False Detection* (POFD).

- Encontrou-se na literatura trabalho sobre a extração de células centrais de máscaras de água para melhorar as redes de drenagem gerada por MDEs em trabalho de Jardim *et al.* (2017). É possível gerar uma rede de drenagem mais realística daquela obtida pelo algoritmo do GRASS, e fica como uma recomendação a ser utilizada em trabalhos futuros no momento de otocodificação e cálculo de distância entre estações.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, D. B.; KOEFENDER, A.; SOUZA, C. J. R.; MARCUZZO, F. F. N. Diagramas unifilares e mapeamento das estações F, FD, P, Pr e barramentos das sub-bacias 70 a 74 no Rio Uruguai. In: SIMPÓSIO DOS RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 13., 2016, Aracaju. **Anais...** Aracaju: ABRH, 2016. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/17189>>. Acesso em: 21 jan. 2018.

AMARAL, R. do; RIBEIRO, R. R. Inundações e enchentes. In: TOMINAGA, L. K.(Org.); SANTORO, J. (Org.); AMARAL, R. (Org.); SOUZA, C. R. de G.; FARIA, D. G. M.; TAVARES, R.; MENDES, R. M.; RIBEIRO, R. R.; FILHO, W. S. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. 1ª Ed. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2009. Cap. 3. p. 39-52.

ANA – Agência Nacional de Águas. Base hidrográfica otocodificada da bacia do rio Uruguai. 2016. Autor dos metadados: TEIXEIRA, A. de A, extensão temporal de 16/02/2015 até 16/12/2015. Disponível em: <<http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/sr/v/pt/metadata.show?id=426&currTab=distribution>>. Acesso em: 20 jun. 2017.

ANAb – Agência Nacional de Águas. Codificação de bacias hidrográficas pelo Método de Otto Pfafstetter. Disponível em: <<https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/104/1/apostila.pdf>>. Acesso em 18 dez. 2017.

ANTON, H.; BIVENS, I., DAVIS, S.; DOERING, C. I. (Trad.). **Cálculo**. 8ª Ed. Porto Alegre: Bookman, 2007. v. 1, 680 p.

BEVEN, K.; BINLEY, A. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. **Hydrological Processes**. [S.l.]: v. 6, i. 3, p. 279-298, September 1992.

BOTH, G. C.; HAETINGER, C.; FERREIRA, E. R.; DIEDRICH, V. L.; AZAMBUJA, J. L. F. de; Uso de modelagem matemática para a previsão de enchentes no Vale do Taquari – RS. In: **VI Simpósio de Engenharia Ambiental**. 2008. Serra Negra, SP.

BRASIL. Lei no 6.766, de 19 de dezembro de 1979. Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília-DF, v., n. 243 , p. 19457, 20 dez. 1979. Diário Oficial da República

Federativa do Brasil, Brasília, DF, 19 dez. 1979. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6766.htm>. Acesso em: 18 mar. 2017.

BRASIL. Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília-DF, 3 agosto 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 28 dez. 2017.

BRASIL. Lei Nº 12.334, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília-DF, 5 janeiro 2007. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm>. Acesso em: 28 dez. 2017.

BRASIL. Lei Nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nos 12.340, de 1o de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília-DF, seção 1, p. 1-4, 11 abril 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112608.htm>. Acesso em: 8 oct. 2017.

BRUBACHER, J. P.; OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A.; ALVES, R. C. M. Análise espacial e temporal de eventos extremos de precipitação e limiares para a ocorrência de desastres na bacia hidrográfica do rio dos Sinos, RS. In: GUASSELLI, L. A.; de OLIVEIRA, G. G.; ALVES, R. de C. M. **Eventos Extremos no Rio Grande do Sul**: inundações e movimentos de massa. 1ª Ed. Porto Alegre: Evangraf, 2013. cap. 3, p. 45-62.

CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A. T. (Org.). **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Brasília: Ministério das Cidades/Instituto de Pesquisas Tecnológicas–IPT, 2007. 176 p.

CASTANHARO, G.; GIBERTONI, R. F. C.; MÜLLER, I. I. ; ANDRIOLO, M. V.; KAVISKI, E.; GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F. Previsão de vazões na Bacia do Rio Iguaçu baseada no Modelo SMAP e com incorporação de informações de precipitação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.l.], v.12, n. 3, p. 57-68, set. 2007.

CASTRO, A. L. C. **Manual de Desastres**: Desastres Naturais. Brasília - DF: Ministério da Integração Nacional, 2003. 182 p.

CASTRO, A. L. C. **Glossário de Defesa Civil estudos de riscos e medicina de desastres**. 5^a Ed. Brasília: Secretaria Nacional de Defesa Civil, 2007. Volume único. 191 p. Disponível em: <http://www.mi.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=71458606-5f48-462e-8f03-4f61de3cd55f&groupId=10157>. Acesso em: 02 abr. 2017.

CHAU, K. W.; WU, C. L.; LI, Y. S.; Comparison of Several Flood Forecasting Models in Yangtze River. **Journal of Hydrologic Engineering**. 2005. v. 10, p. 485-491. November-December. ASCE.

CHOI, O.; FISHER, A. The Impacts of Socioeconomic Development and Climate Change on Severe Weather Catastrophe Losses: Mid-Atlantic Region (MAR) and the U.S. **Climate Change**. 2003. v. 58, p. 149-170.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. New York: McGraw Hill, 1988. Disponível em: <https://ponce.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2017.

CHOW, V.T. **Handbook of Applied Hydrology**. New York: MacFraw-Hill Book, 1964.

COELHO, V. R.; FAN, F. M. Manual do programa super manejo de dados: versão 1.1. [S.l.] 2016. 17 p. Grupo de pesquisa em Hidrologia de Grande Escala (HGE). Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/0B1CDpnDPA5HMdV9ZRvhoclP4X3M/view>>. Acesso em: 17 dez. 2017.

COLLISCHONN, B.; PAIVA, R. C. D. de; COLLISCHONN, W.; MEIRELLES, F. S. C.; SCHETTINI, E. B. C.; FAN, F. M. Modelagem hidrológica de uma bacia com uso intensivo de água: caso do rio Quaraí-RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 16, n.4, p. 119-133, dez. 2011. Disponível em: <https://abrh.s3-sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/1/bd2d29be94798b6bb084aa1d11ef6f66_e97796eacf6001e296bbf9d65b6375f5.pdf>. Acesso em: 6 dez. 2017.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia: para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013.

COLLISCHONN, W.; HAAS, R.; ANDREOLLI, I.; TUCCI, C.E.M. Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. **Journal of Hydrology**. [S. l.], v. 305, 1-4, p. 87-98, Abril 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169404004093?via%3Dihub>>. Acesso em: 28 out. 2017.

CPRM - Serviço Geológico Brasileiro. **Bacias Monitoradas: Bacia do Caí, SACE Monitoramento**. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/sace/index_bacias_monitoradas.php>. Acesso em: 3 out. 2017.

DEFESA CIVIL RS. **Aviso meteorológico para quinta-feira (5) para todo o Estado.** Disponível em: <<http://www.defesacivil.rs.gov.br/aviso-meteorologico-para-quinta-feira-5-para-todo-o-estado>>. Acesso em: 3 out. 2017.

DOOGE, J.C.I. **Linear Theory of Hydrologic Systems.** Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1973. Technical Bulletin n. 1948 Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.

DOOGE, J. C. I. The development of hydrological concepts in Britain and Ireland between 1674 and 1874. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 19, n. 3, p. 279-302. 1974. Disponível em:< <http://dx.doi.org/10.1080/02626667409493917>>. Acesso em: 28 ago. 2017.

DORNELLES, F. **Previsão contínua de níveis fluviais com redes neurais utilizando previsão de chuvas.** 2007. 99 p. Dissertação de mestrado (Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

EARTH explorer. Desenvolvido por U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2014. Permit your search in area: type in an address or place name, enter coordinates or click the map to define your search area (for advanced map tools, view the help documentation), and/or choose a date range. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 20 jun. 2017

ECKHARDT, K.; HAVERKAMP, S.; FOHRER, N.; FREDE, H.-G. SWAT-G, a version of SWAT99.2 modified for application to low mountains range catchments. **Physics and chemistry of the earth**. v. 27. p. 641-644. 2002.

ECKHARDT, R. R. **Geração de modelo cartográfico aplicado ao mapeamento das áreas sujeitas às inundações urbanas da cidade de Lajeado/RS.** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FAN, F. M., PONTES, P. R. M., BUARQUE, D. C., COLLISCHONN, W. Evaluation of upper Uruguay river basin (Brazil) operational flood forecasts. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 22, e37, 13 p., 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.0217160027>>. Acesso em: 6 dez. 2017.

FAN, F. M. **Previsão por conjunto de vazões afluentes a reservatórios em grandes bacias hidrográficas brasileiras.** 2015. 424 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

FERREIRA, C. da C.. **Previsão de Vazões Naturais Diárias Afluentes ao Reservatório da UGE Tucuruí Utilizando a Técnica de Redes Neurais Artificiais.**

2012. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação). Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

FINCK, J. S.; GUIMARÃES, G. M.; KOEFENDER, A.; SOUZA, C. J. R.; ALMEIDA, D. B.; MARCUZZO, F. F. N. Diagrama unifilar de dados hidrológicos em bacia hidrográfica: proposta de modelo e passo a passo de como fazer consistindo os dados. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 22., 2017, Florianópolis, SC. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2017. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/18491>>. Acesso em: 12 dez. 2017.

FLORES, J. H. F. **ARMA-CIGMN – An Incremental Gaussian Mixture Network for time series analysis and forecasting**. 2015. 90 f. Thesis (Doctor of Computer Science). Programa de Pós-Graduação em Computação, Instituto de Informática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

FOWLER, J.; COHEN, L.; JARVIS, P.; **Practical Statistics for Field Biology**. 2nd Ed. Chichester, England. John Wiley & Sons. 2013. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=zq9Lyqi3YL4C&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>> Acesso em: 19 mar. 2017.

FRONTLINE SOLVERS, **Excel solver - GRG nonlinear solving method stopping conditions**. Disponível em: <<https://www.solver.com/excel-solver-grg-nonlinear-solving-method-stopping-conditions>>. Acesso em: 16 dez. 2017.

FURTADO, C. R. Intervenção do Estado e (re)estruturação urbana: um estudo sobre gentrificação. **Cad. Metropolitano**. v. 16, n. 32, p. 341-363, nov. 2014. São Paulo. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/2236-9996.2014-3203>>. Acesso em: 13 out. 2017.

G1, 2012a. **Estiagem de agosto o mais seco dos últimos 20 anos no RS**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2012/09/estiagem-faz-de-agosto-o-mais-seco-dos-ultimos-20-anos-no-rs.html>>. Acesso em: 11 mar. 2017.

G1, 2012b. **Racionamento de água completa sete meses em Bagé-RS**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/estiagem/noticia/2012/08/racionamento-de-agua-completa-sete-meses-em-bage-rs.html>>. Acesso em: 11 mar. 2017.

G1, 2012c. **Estiagem faz água desaparecer de rio em açude em Vacaria no RS**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/vc-no-g1-rs/noticia/2012/05/estiagem-faz-agua-desaparecer-de-rio-e-acude-em-vacaria-no-rs.html>>. Acesso em: 11 mar. 2017.

G1, 2012d. **Sem dar tregua no RS estiagem agora prejudica culturas de inverno**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/estiagem/noticia/2012/06/sem-dar-tregua-no-rs-estiagem-agora-prejudica-culturas-de-inverno.html>>. Acesso em: 11 mar. 2017.

GALVÃO, M.I. da S. **Zoneamento de risco à inundação da área urbana de Porto Xavier /RS**. 2014. 106f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

GAUCHA ZH. **Uruguaiana chega à segunda maior enchente da história**. Disponível em: <<https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2017/06/uruguaiana-chega-a-segunda-maior-enchente-da-historia-9811122.html>>. Acesso em: 9 out. 2017.

GERMANO, A. de O; MATOS, A. J. S.; Metodologia para definição de cotas de referência em sistemas de alerta e previsão hidrológica. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 22., 2017, Florianópolis, SC. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2017. Disponível em:<http://evolvedoc.com.br/xxiisbrh/detalhes-766_metodologia-para-definicao-de-cotas-de-referencia-em-sistemas-de-alerta-e-previsao-hidrologica>. Acesso em: 30 dez. 2017.

GERMANO, A.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. da. Estimativa dos parâmetros do modelo IPH II para algumas bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 3, n. 4, p. 103-120, Out/Dez 1998.

GUASELLI, L. A.; de OLIVEIRA, G. G.; ALVES, R. de C. M. **Eventos Extremos no Rio Grande do Sul: inundações e movimentos de massa**. 1ª Ed. Porto Alegre: Evangraf, 2013. FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos, UFRGS.

GUIMARÃES, G. M.; FINCK, J. S.; MARCUZZO, F. F. N. Espacialização pluviométrica da precipitação média mensal na parte brasileira da bacia do rio Uruguai. In: Congresso ABES FENASAN, 2017, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABES. 2017. Disponível em: < <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/18201> >. Acesso em 6 dez. 2017.

GUTIERREZ, J. C. T. **Atualização de dados de entrada aplicada à previsão de vazões de curto prazo**. 2015. 137 p. Dissertação de mestrado (Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo de Municípios IBGE 2015**. Disponível em:< <https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html>>. Acesso em: 16 dez. 2017.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Solos do Brasil**. 2017. Escala 1:5000000, EMBRAPA. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/mapas/brasil/solos.pdf>. Acesso em: 20 out. 2017.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Terra Monitoramento Análise e Alerta:** TerraMA. 2012. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/terrama2/>>. Acesso em: 25 out. 2017.

JARDIM, P. F.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. Extração de células centrais de máscaras de água para melhoria da rede de drenagem gerada de MDEs. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 22., 2017, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABRH, 2017.

JORNAL NACIONAL. Enchentes no Rio Grande do Sul fazem 490 famílias saírem de casa. 19 dez. 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2016/10/enchentes-no-rio-grande-do-sul-fazem-490-familias-sairem-de-casa.html>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

KIRCHNER, J. W. Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. **Water Resources Journal**. 2006. Res., 42,

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. de O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORF, F. de M.; **Prevenção de desastres naturais:** conceitos básicos. Florianópolis – SC: *Organic Trading*, 2006. 109 p.

KOEFENDER, A.; MARCUZZO, F. F. N. Modelo e conceituação de diagrama unifilar de bacia hidrográfica: o caso da sub-bacia 76. **Revista de Geografia**, Recife, v. 33, n. 3, p. 201-229, 2016. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/17524>>. Acesso em: 21 jan. 2018.

KOEFENDER, A.; SOUZA, C. J. R.; ALMEIDA, D. B.; GUIMARÃES, G. M.; FINCK, J. S.; MARCUZZO, F. F. N. **A CONCEPÇÃO DE DIAGRAMA UNIFILAR DE BACIA HIDROGRÁFICA PARA ESTUDOS DE INTERESSE HIDROLÓGICO: O passo a passo de como obter as informações, como montar o diagrama unifilar e como verificar e corrigir seus dados inventariais básicos.** 2017. 87p. Tutorial. Manual desenvolvido durante estágio no projeto de regionalização de vazões na CPRM-PA/GEHITE. Porto Alegre, 2017. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/0B5VdVLR05QEeGw4MHN3b2V6b2s/view?usp=sharing>>. Acesso em: 28 mai. 2017.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. In: KÖPPEN, W. (Org.); GEIGER, R. (Org.); ALT, E.; BERG, L.; BIRKELAND, B. J.; BORCHARDT, W.; BRAAK, C.; BROOKS, F.; CASTENS, G.; CONNOR, A.; CONRAD, V.; COX, G. W.; FÖYN, N. J.; FUJIWHARA, S.; KAMINSKI, A.; KIDSON, E.; KNOCH, K.; KUHNBRODT, E.; LOEWE, F.; MEINARDUS, W.; MILANKOVITCH, M.; NORMAND, C. W. B.; OKADA, T.; PETERSEN, H.; ROBERTSON, C. L.; RUBISTEIN, E.; SAPPER, K.; SCHOTT, G.; SELICK, N. P.; SEMMELHACK, W.; SVERDRUP, H. U.; TAYLOR, T. Gr.; WAGNER, A.; WALKER, Sir Gilbert T.; WARD, R. DeC.; WEGENER, K.; WEICKMANN, L. **Handbuch der Klimatologie:** in fünf Bände. Berlin: Gebrüder Bornträger, 1936, Band 1, Teil C, p. 44.

LIU, L.; HUDAK, G. B. **Forecasting and time series analysis using the SCA statistical system**. Chicago: Scientific Computing Associates, 1994. v. 1. Disponível em: <http://scausa.com/SCADocs/SCAFTS_V1.pdf>. Acesso em: 8 out. 2017.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. SMAP - A Simplified Hydrological Model. **Applied Modelling in Catchment Hydrology**, Ed. V.P.Singh, Water Resources Publications, 1982.

LUBW e LfU, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg e Bayerisches Landesamt für Umwelt. **Hochwasserportal**. 2015. Disponível em: <<http://www.hochwasserzentralen.de/index.htm>>. Acesso em: 3 out. 2017.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: Impacts Adaptation and Vulnerability**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 976 p. *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. PARRY, M. L.; CANZIANI, O. F.; PALUTIKOF, J. P.; van der LINDEN, P. J.; HANSON C. E. Disponível em:<https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4_wg2_full_report.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2017.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios

LATT, Z. Z.; WITTENBERG, H. Improving flood forecasting in a developing country: a comparative study of stepwise multiple linear regression and artificial neural network. **Water resources manage**. v. 28, n. 2, p. 2109-2128. 2014. Disponível em:<<https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-014-0600-8>>. Acesso em: 6 dez 2017.

MACANA, E.C. **Impactos potenciais da mudança climática no desenvolvimento humano**: uma análise baseada na abordagem das capacitações. 2008. 242 f. Dissertação (Mestrado em Economia) – Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MARCUZZO, F. F. N. Bacia hidrográfica do rio Uruguai: altimetria e áreas. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 22., 2017, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ABRH, 2017. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/18489>>. Acesso em: 12 dez. 2017.

MARCUZZO, F. F. N. Modelagem Hidrológica Utilizando Regressão: Conceituação Matemática, Logaritmização e Avaliação. In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos do Nordeste, Natal. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2014. p. 1-10. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/17447>>. Acesso: 6 out. 2017.

MARENGO, J. A.; ALVES, L.; VALVERDE, M.; LABORBE, R.; ROCHA, R. **Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI**: projeções de clima futuro usando três modelos regionais.

Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas, Diretoria de Conservação da Biodiversidade, relatório 5, p. 08-62, 2007.

MCCULLOCH, W.; PITTS, W. **A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity**, Bulletin of Mathematical Biophysics, Vol 5. p. 115-133. 1943. Disponível em: <<http://www.cs.cmu.edu/~./epxing/Class/10715/reading/McCulloch.and.Pitts.pdf>>. Acesso em: 7 dez. 2017.

MEIRELLES, F. S.; FADEL, A. W.; DE PAULA, J. R.; TURCATO, K.; CORDONE, L. B.; VALENTE, C.; NECTOUX, M. P.; KOBIYAMA, M.; FAN, F. M.; MICHEL, G. P.; TSCHIEDEL, A.; ZANANDREA, F.; PAIXÃO, M. A.; GODOY, J. V. **Diagnóstico Preliminar**: Descritivo dos eventos ocorridos no dia 5 de janeiro de 2017 entre as regiões dos municípios de São Francisco de Paula e Rolante/RS. [S.l.: s.n.], 2017. 26 p. Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: <http://www.rs.gov.br/upload/20170125183225diagnostico_preliminar_gt_rolante_revfinal.pdf> Acesso em: 12 mar. 2017.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M.; Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. Disponível em: <<https://mega.nz/#!aZdilZ5b!ide2VfkMc7xzzgMiyn6c27QEV7PjQThIvguLrptjGHo>>. Acesso em: 12 out. 2017.

MEYER, A.; FLEISCHMANN, A.; PAIVA, R.; COLLISCHONN, W. Como acertar pelos motivos certos? Integração de modelagem hidrológica-hidrodinâmica e sensoriamento remoto visando a calibração de modelos. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 22., 2017, Florianópolis, SC. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2017. Disponível em: <http://evolvedoc.com.br/xxiisbrh/detalhes-43_como-acertar-pelos-motivos-certos-integracao-de-modelagem-hidrologica-hidrodinamica-e-sensoriamento-remoto-visando-a-calibracao-de-modelos>. Acesso em: 30 dez. 2017.

MICROSOFT SUPPORT, Solver Uses Generalized Reduced Gradient Algorithm. Disponível em: <<https://support.microsoft.com/en-us/help/82890/solver-uses-generalized-reduced-gradient-algorithm>>. Acesso em: 16 dez. 2017.

MICROSOFT EXCEL OFFICE, versão 2010: Gerenciador de planilhas eletrônicas. [S.l.]:Microsoft Corporation, 2010. Programa. 1 CD-ROM. 2017. Disponível em: <<http://office.microsoft.com/pt-br/>>. Acesso em: 19 dez. 2017.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. Ed. 7 [S.l.]: Wiley, 2012.

MOREIRA, A. A. **Análise da seca/estiagem no norte do estado de Minas Gerais a partir de dados modis**. 2016a. 124 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/147931/001000980.pdf?sequence=1>> Acesso em: 26 mar. 2017.

MOREIRA, G. C. **Previsão de níveis fluviais em tempo atual com modelo de regressão adaptativo: aplicação na bacia do rio Uruguai.** 2016b. 153 f. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MULVANY, T. J. On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rain fall and of flood discharges in a given catchment. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, v. 4, 18-33 p. Disponível em: <http://digitalcollections.tcd.ie/home/index.php?DRIS_ID=ICEI-020_308#folder_id=1043&pidtopage=ICEI-004_198&entry_point=93>.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. de A. **Hidrologia Estatística.** Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/454/livro_hidrologia_estatistica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 8 out. 2017.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**. v.10, n.3, p. 282-290, 1970. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)>. Acesso em: 6 dez. 2017.

OLIVEIRA, L. F. C.; FIORENZE, A. P.; MEDEIROS, A. M. M.; SILVA, M. A. S. **Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação-pluvial anual.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.14 n.11 p. 1186-1192, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v14n11/v14n11a08.pdf>>. Acesso em: 26 mar. 2017.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Aplicação do modelo SMAP para previsão de vazões à curto prazo na bacia incremental da UHE Itaipu.** [S.l.], 2013, 84 . Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Relat%C3%B3rio%20de%20aplica%C3%A7%C3%A3o%20do%20modelo%20SMAP%20-%20incremental%20de%20Itaipu.pdf> Acesso em: 19 out. 2017.

PAGANO, T. C.; WOOD, A. W.; RAMOS, M-H.; CLOKE, H. L.; PAPPENBERGER, F.; CLARK, M. P.; CRANSTON, M.; KAVETSKI, D.; MATHEVET, T.; SOROOSHIAN, S.; VERKADE, J. S. Challenges of Operational River Forecasting. **Journal Of Hydrometeorology**, Boston, v. 15, n. 4, p. 1692-1707, Aug. 2014.

PEDROLLO, O. C. Previsão de Níveis Fluviais com Redes Neurais: Aplicação para Rosário do Sul - RS. In: **Anais do AGUASUL - 1º Simpósio de Recursos Hídricos do Sul e 1º Simpósio de Águas da AUGM**, Santa Maria, 2005. 19 p.

PEDROLLO, M.; GERMANO, A.; SOTÉRIO, P.; RODRIGUES, E.; MADUELL, J. C. Alerta Hidrológico da Bacia do Rio Caí: concepção e implantação do sistema. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2011.

PEDROLLO, O.; PEDROLLO, M. Sistema de alerta de cheias da bacia do rio Caí: previsão de níveis com redes neurais artificiais. In: GUASELLI, L. A.; de OLIVEIRA, G. G.; ALVES, R. de C. M. **Eventos Extremos no Rio Grande do Sul**: inundações e movimentos de massa. 1ª Ed. Porto Alegre: Evangraf, 2013. cap. 5, p. 101-120.

PEDROLLO, M. C. R.; SOTÉRIO, P. W.; GERMANO, A. de O. Estudo técnico para instalação e operação de um sistema de alerta hidrológico na bacia do rio Uruguai. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 22., 2017, Florianópolis, SC. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2017. Disponível em: <http://evolvedoc.com.br/xxiisbrh/detalhes-43_como-acertar-pelos-motivos-certos-integracao-de-modelagem-hidrologica-hidrodinamica-e-sensoriamento-remoto-visando-a-calibracao-de-modelos>. Acesso em: 30 dez. 2017.

PINTO, E. J. de A.; AZAMBUJA, A. M. S. de; FARIAS, J. A. M.; SALGUEIRO, J. P. de B.; PICKBRENNER, K. (Coords.). Atlas pluviométrico do Brasil: isoietas mensais, isoietas trimestrais, isoietas anuais, meses mais secos, meses mais chuvosos, trimestres mais secos, trimestres mais chuvosos. Brasília: CPRM, 2011. 1 DVD. Escala 1.5:000.000. Equipe Executora: Da Costa, Margarida Regueira; Dantas, Carlos Eduardo de Oliveira; Melo, De Azambuja, Andressa Macêdo Silva; De Rezende, Denise C.; Do Nascimento, Jean Ricardo da Silva; Dos Santos, André Luis M. Real; Farias, José Alexandre Moreira; Machado, Érica C.; Marcuzzo, Francisco Fernando Noronha; Medeiros, Vanesca Sartorelli; Rodrigues, Paulo de Tarso R.; Weschenfelder, Adriana Burin; SIG - versão 2.0 - atualizada em 11/2011; Levantamento da Geodiversidade. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>>. Acesso em: 07 jun. 2017.

PMPA - Prefeitura Municipal de Porto Alegre. **Plano Diretor de Drenagem Urbana**: manual de drenagem urbana. Porto Alegre: DEP – Departamento de Esgotos Pluviais, 2005. v. VI. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dep/usu_doc/manual_de_drenagem_ultima_versao.pdf>. Acesso em: 8 out. 2017.

PONTES, P. R. M. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada da bacia do rio da Prata**. 2016. 210 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

PONTES, P. R. M.; FAN, F. M.; FLEISCHMANN, A. S.; PAIVA, R. C. D. de; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A.; JARDIM, P. F.; SORRIBAS, M. V.; COLLISCHONN, W. MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling & Software**. [S. l.], v. 94, p. 1-20, Agosto 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136481521630189X?via%3Dihub>>.

QGIS, Development Team. **QGIS**: sistema de informação geográfica para área de trabalho de computador. Versão 2.18.6. 2017. Licença de software livre GNU GPL.

Disponível em: <<http://www.qgis.org/en/site/forusers/download.html>>. Acesso em: 22 maio 2017.

REIS, J. B. C. dos; PONS, N. A. D.; LOPES, E. S. S. Monitoramento e alerta de inundação no município de Itajubá (MG) por regressão polinomial. **Geociências UNESP**, São Paulo, v. 35, n.1, p. 134-148. 2016. Disponível em: <<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/9002>>. Acesso em: 7 dez 2017.

ROBAINA, L. E. de S. Áreas de risco por processos de dinâmica geomorfológica: introdução ao tema. In: GUASELLI, L. A.; de OLIVEIRA, G. G.; ALVES, R. de C. M. **Eventos Extremos no Rio Grande do Sul: inundações e movimentos de massa**. 1ª Ed. Porto Alegre: Evangraf, 2013. cap. 1, p. 11-24.

ROGERS, D.; TSIRKUNOV, V.; **Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction: Costs and benefits of early warning systems**. [S. l.: s. n.] , 2010. 17 p. ISDR , The World Bank. Disponível em: <<http://documents.worldbank.org/curated/en/609951468330279598/pdf/693580ESW0P1230aster0Risk0Reduction.pdf>>. Acesso em: 26 mar. 2017.

ROSA, E. da. **Uso racional da água ajuda a garantir abastecimento**. Notícias. Prefeitura de Canoas. 10 jan. 2012. Disponível em: <<http://www.canoas.rs.gov.br/site/noticia/visualizar/idDep/15/id/4172>>. Acesso em: 11 mar. 2017.

ROSSATO, R. **Cidades Brasileiras: A urbanização Patológica**. Ciência & Ambiente, Santa Maria, v. 7, p.23-32, 1993.

S2iD – Sistema Integrado de Informações sobre Desastres. **Sistema Integrado de Informações sobre Desastres**. Disponível em: <<https://s2id.mi.gov.br/>>. Acesso em: 9 out. 2017.

SANCHES, F. de O. **Os areais do sudoeste do Rio Grande do Sul: estudo sobre as chuvas no século XX e um possível cenário para o século XXI**. Porto Alegre. 2013

SANTOS, C. A. G.; ALMEIDA, C. das N.; SOARES JÚNIOR, A.; FREIRE, P. K. M. M.; BARBOSA, F. A. R. Hydrological modelling in the Brazilian Water Resources Information System (SNIRH). **International Association of Hydrological Sciences**, Xth Kovacs Colloquium (Proceedings of the 19th Session of the Intergovernmental Council of the International Hydrological Programme held at UNESCO, Paris, July 2010 . p. 203-204. Disponível em: < <https://iahs.info/uploads/dms/15070.52-203-204-Celso-Santos.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2017.

SEMA RS. **Sala de Situação: Monitoramento, prevenção e mapeamento de eventos hidrológicos**. Disponível em: <<http://www.saladesituacao.rs.gov.br/>>. Acesso em: 3 out. 2017.

SHAHIN, M.; OORSCHOT, H. J. L. van; LANGE, S. J. de; **Statistical Analysis in Water Resources Engineering**. Ed. 1^a. Rotterdam: Brookfield, 1993. 394 p.

SHAHZAD, K. M.; PLATE, E. J. Flood forecasting for river Mekong with data-based models. **Water Resources Research**. v. 50, p. 7115-7133. 2014. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2013WR015072/epdf>>. Acesso em: 7 dez. 2017.

SIQUEIRA, V. A. **Previsão de cheias por conjunto em curto a médio prazo: bacia do Taquari-Antas/RS**. 2015. 168 p. Dissertação de mestrado (Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

SOARES, J. de B. **Dicionário de matemática**. São Paulo: Hemus, 1995. ROCHA, R. A. D. (Rev.) e CHANIN, H. (Rev.). 285 p.

SOUZA, C. J. R.; ALMEIDA, D. B.; KOEFENDER, A.; MARCUZZO, F. F. N. Diagramas unifilares e mapeamento das estações F, FD, P, PR e barramentos das Sub-bacias 75 a 79 no rio Uruguai. **Tecno-lógica**, Santa Cruz do Sul, v. 21, n. 2, p. 65-74, jul./dez. 2017. Disponível em: <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/17839>>. Acesso em: 21 jan. 2018.

TAPIA, R. P.; PINEDA, R. V.; OLIVARES, C.; GONZÁLEZ, P. A.; Development of upstream data-input models to estimate downstream peak flow in two mediterranean river basins of Chile. *Open Journal of Modern Hydrology*, 2014. v. 4, p. 132-143

TUCCI, C. E. M. **Gestão de inundações urbanas**. Ministério das Cidades. Global Water Partnership. World Bank. 2005b. Unesco, 269 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2^a Ed. Porto Alegre: UFRGS. 2005. Revista e Ampliada, 678 p. Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH.

TUCCI, C. E. M. (Org.); BERTONI, J. C. (Org.); VILLANUEVA, A. O. N.; GERMANO, A. de O.; PERITO, A.; SILVEIRA, A. L. L. da; PAOLI, C. U.; CAIAFA, H.; GOLDENFUM, J. A.; REYES, J.; AVILA, J. L.; GENTA, J. L.; ARRESE, J.; BÁEZ, J.; CHAMORRO, L.; AYALA, L.; TERRAZAS, L. E. M.; TEIXEIRA, L.; ESCOBAR, M. S.; DOMEQ, R. M. **Inundações Urbanas na América do Sul**. 1^a Ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2003. Disponível em: <<https://www.cepal.org/samtac/noticias/documentosdetrabajo/5/23335/inbr02803.pdf>>. Acesso em: 8 out. 2017.

TUCCI, C. E. M.; ORDONEZ, J. S.; SIMÕES, L. M. Modelo Matemático Precipitação-Vazão IPH II: alguns resultados. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, 4, 1981, Fortaleza. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 1981. p. 83-103

WALKER, P. M. B. **Science and Technology Dictionary**. Cambridge: W&R Chambers and Cambridge University, 1988. 1008 p. General Editor: Prof. Peter M.B. Walker,

WMO: WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Manual on Flood Forecasting and Warning**. Geneva, n. 1072, 2011. 142 p.

ZERO HORA. Como se formou a enchente que atingiu Rolante e Riozinho. 6 jan. 2017a. Disponível em: <<http://zh.clicrbs.com.br/rs/noticias/noticia/2017/01/como-se-formou-a-enchente-que-atingiu-rolante-e-riozinho-9157773.html>>. Acesso em: 11 mar. 2017.

ZERO HORA. Chuvarada deixa ruas alagadas no bairro Lami. 4 jan. 2017b. Disponível em: <<http://zh.clicrbs.com.br/rs/noticia/2017/01/chuvarada-deixa-ruas-alagadas-no-bairro-lami-9105248.html>>. Acesso em: 11 mar. 2017.