

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO**

**ANÁLISE DAS INUNDAÇÕES NO MÉDIO CURSO DO  
RIO URUGUAI - RS**

**GREICE VIEIRA SILVEIRA**

**PORTO ALEGRE  
2019**

GREICE VIEIRA SILVEIRA

**DINÂMICA DAS INUNDAÇÕES POR MEIO DE SÉRIES TEMPORAIS,  
RIO URUGUAI - RS**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado em Sensoriamento Remoto do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Área de Concentração Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutora em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento**

Prof. Dr. Laurindo Antonio Guasselli  
(orientador)

Prof. Dr. Waterloo Pereira Filho (co-orientador)

PORTO ALEGRE, RS  
2019

**GREICE VIEIRA SILVEIRA**

**DINÂMICA DAS INUNDAÇÕES POR MEIO DE SÉRIES TEMPORAIS,  
RIO URUGUAI - RS**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado em Sensoriamento Remoto do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Área de Concentração Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutora em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento**

**Aprovado em 22 de agosto de 2019**

---

**Laurindo Antonio Guasselli, Dr. (UFRGS)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Guilherme Oliveira, Dr. (UFRGS)**

---

**Rosana Corazza Dra. (IFRS)**

---

**Sidnei Luís Bohn Gass Dr. (UNIPAMPA)**

Porto Alegre, RS  
2019

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM), pela oportunidade da realização do curso de doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela oportunidade de bolsa de pós-graduação.

Ao meu orientador, Laurindo Antonio Guasselli, pelo grande profissional dedicado que é, que me auxiliou do início ao fim em minha tese. Muito obrigada pelo apoio, incentivo e orientações.

Ao meu co-orientador Waterloo Pereira Filho pela disponibilidade de uso do espaço do CRS/INPE.

Aos membros da banca de qualificação e de defesa Dr. Guilherme Oliveira, Dra. Rosana Corazza, Dra. Tatiana Silva e Dr. Sidnei Luís Bohn Gass pelas contribuições no projeto de pesquisa.

Aos meus grandes amigos, que me apoiaram em todos os momentos. Àqueles que divido meus bons e maus momentos. Muito obrigada por sempre acreditarem no meu potencial.

À Patricia Trindade pela amizade nas idas e vindas de Porto Alegre.

Aos meus amigos peludinhos Dérick e Nick, meus queridos amigos de quatro patas, meus companheiros em todos os momentos.

À minha família, meus pais Vitor e Geneci e ao meu irmão Matheus pelo apoio, incentivo e carinho em todos os momentos

À Deus pela vida.

*As nuvens mudam sempre de posição, mas são sempre nuvens no céu. Assim devemos ser todo dia, mutantes, porém leais com o que pensamos e sonhamos; lembre-se, tudo se desmancha no ar, menos os pensamentos”.*

(Paulo Beleki)

## RESUMO

As planícies de inundação são áreas predominantemente planas, e se caracterizam por serem áreas suscetíveis a inundações em magnitudes e frequências variáveis. Neste sentido, o presente estudo tem por objetivo identificar o comportamento das inundações a partir de imagens de satélite, dados de precipitação, cota e vazão do rio, entre 1980 e 2017, no médio curso do rio Uruguai na bacia hidrográfica do rio Uruguai, no município de Itaqui/RS. Os procedimentos metodológicos consistiram no processamento de imagens Landsat TM e OLI de 1987, 1997, 2001, 2009, 2010 e 2017 para mapear as áreas de inundação, por meio de índices da água (NDWI, MNDWI e NDPI). Imagens de superfície para análise sinótica (28 a 31/05/17), disponibilizadas pelo CPTEC, foram utilizadas para identificar os sistemas atuantes em períodos de precipitações extremas, que ocasionaram inundações no rio Uruguai. Dados da série histórica (1940 a 2017) de precipitação, cota e vazão foram utilizados para entender a dinâmica dos eventos hidrológicos que resultaram em inundações no médio curso. A partir da análise destes dados observou-se que o uso de imagens de satélite para espacializar inundações demonstrou ser eficiente, na comparação entre as áreas inundadas, nos eventos de inundação. Na comparação entre os índices NDWI, MNDWI e NDPI, ambos apresentaram bons resultados para o mapeamento dos corpos d'água, facilitado pelo forte contraste entre a água e a superfície terrestre. Ao utilizar o índice Kappa e Tau para validar as classificações pelo algoritmo MAXVER, os melhores resultados foram dos índices MNDWI e NDWI respectivamente. Destaca-se que as chuvas locais têm uma participação considerável na elevação da cota e vazão do rio em Itaqui. Entretanto, é importante destacar que as chuvas regionais na bacia hidrográfica do rio Uruguai, são as que mais influenciam na dinâmica dos eventos de inundação. As imagens sinóticas de superfície mostram que, de modo geral, as precipitações são resultantes de sucessivas passagens de sistemas frontais. Sendo assim, o volume, a duração e a distribuição espacial e temporal das precipitações, estão diretamente relacionadas à dimensão de eventos extremos de precipitações que ocasionam inundações devido a chuvas fortes e/ou prolongadas no rio Uruguai. Mas tanto as chuvas locais quanto as regionais interferem diretamente na magnitude dos eventos de inundação.

**Palavras-chave:** Dados Hidrológicos, Inundações, Índices de Umidade, Sistemas Atuantes, Eventos adversos.

## ABSTRACT

Floodplains are predominantly flat areas, and are characterized by flood-susceptible areas of varying magnitude and frequency. In this sense, the present study aims to identify the behavior of floods from satellite images, rainfall data, quota and river flow between 1980 and 2017, in the middle course of the Uruguay River in the Uruguay River Basin, in the municipality of Itaqui / RS. The methodological procedures consisted of processing Landsat TM and OLI images from 1987, 1997, 2001, 2009, 2010 and 2017 to map flooded areas through water indices (NDWI, MNDWI and NDPI). Surface images for synoptic analysis (28 to 31/05/17), provided by CPTEC, were used to identify the systems acting in periods of extreme precipitation, which caused floods in the Uruguay River. Data from the historical series (1940-2017) of rainfall, quota, and flow were used to understand the dynamics of hydrological events that resulted in mid-course flooding. From the analysis of these data it was observed that the use of satellite images to spatialize floods proved to be efficient, when comparing flooded areas, in flood events. Comparing the NDWI, MNDWI and NDPI indices, both showed good results for the mapping of water bodies, facilitated by the strong contrast between water and land surface. When using the Kappa and Tau index to validate the classifications by the MAXVER algorithm, the best results were from the MNDWI and NDWI indices respectively. It is noteworthy that local rains play a considerable role in elevating the river's quota and flow in Itaqui. However, it is important to highlight that regional rainfall in the Uruguay River basin is the one that most influences the dynamics of flood events. Synoptic surface images show that precipitation generally results from successive passages of frontal systems. Thus, the volume, duration and spatial and temporal distribution of rainfall are directly related to the extent of extreme precipitation events that cause flooding due to heavy and / or prolonged rainfall on the Uruguay River. But both local and regional rainfall directly interfere with the magnitude of flood events.

**Keywords:** Hydrological Data, Flood, Moisture Indices, Acting Systems, Adverse Events.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo: trecho do rio Uruguai entre Itaqui ao norte e o rio Ibicuí ao sul, Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai - RS.....	20
Figura 2 - Inundações e enxurradas no Rio Grande do Sul. ....	21
Figura 3- Mapa do modelo digital de elevação e Mapa de solos, Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai.23	
Figura 4 - Tipos de clima e sua distribuição no RS.....	25
Figura 5 – Fluxograma Metodológico. ....	35
Figura 6 - Mapa de localização da área de estudo. ....	45
Figura 7 - Distribuição espacial das estações pluviométricas e fluviométrica. ....	48
Figura 8 - Imagens Landsat 5 TM, banda 5, com eventos de inundação: 03/08/87(A), 18/11/97 (B), 12/10/01(C) e sem eventos de inundação 22/01/10 (D). ....	51
Figura 9 - Imagem de NDWI de 03/08/87(A), 18/11/97 (B), 12/10/01(C) e 22/01/10 (D). ....	54
Figura 10 - Fatiamento NDWI de 03/08/87(A), 18/11/97 (B), 12/10/01(C) e 22/01/10 (D). ..	56
Figura 11 - Mapa de localização e imagem Landsat 8 da área de estudo.....	68
Figura 12 - Estações meteorológicas no curso do rio Uruguai - RS.....	69
Figura 13 - Mapas de precipitação Total (a); Anomalia de Precipitação (b); Precipitação por Classificação de Quantis maio (c); junho (d) de 2017. ....	72
Figura 14 – Gráfico da Cota da estação fluviométrica de Itaqui, de maio e junho, no rio Uruguai. ....	73
Figura 15 - Imagem Landsat 8, banda 6, do dia 11/06/2017.....	74
Figura 16 - Carta sinótica de superfície de 28/05 (A); 29/05 (B); 30/05 (C); 31/05 (D). ....	76
Figura 17 - Área de estudo, município de Itaqui/RS. ....	86
Figura 18 - Localização das estações pluviométricas e fluviométrica na BHRU, RS e SC. ....	87
Figura 19 – Gráfico das Médias anuais de precipitações (A), Médias mensais de precipitações (B), entre 1971 e 2018, Itaqui - RS. ....	89
Figura 20 - Gráfico da Frequência das cotas máximas, entre 1971 e 2018, Itaqui - RS. ....	90
Figura 21 – Quadro dos Tempos de retorno empíricos métodos de Kimball e Califórnia.....	91
Figura 22 – Localização da área de estudo, município de Itaqui – RS.....	101
Figura 23 – Índices espectrais da água: NDWI (A), MNDWI (B), NDPI (C), imagens Landsat 5 de 05/12/09, seção do rio Uruguai - RS.....	104



Figura 24 – Classificação Supervisionada, algoritmo MAXVER, NDWI (A), MNDWI (B) e NDPI (C). .....	106
---	-----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Precipitação antecedente à inundação da imagem de 03/08/1987. ....	50
Tabela 2 - Precipitação antecedente a inundação da imagem de 18/11/1997. ....	52
Tabela 3 - Precipitação antecedente a inundação da imagem de 12/10/2001. ....	53
Tabela 4 - Classes fatiamento de NDWI. ....	55
Tabela 5 - Tabela do período do fenômeno El Niño. ....	57
Tabela 6 – Dados de cota para os dias antecedentes a imagem de satélite.....	58
Tabela 7 - Precipitação para os meses de maio e junho de 2017.....	71
Tabela 8 - Número de eventos em relação ao nível de cota, Itaqui (1971-2018).....	90
Tabela 9 – TR estimado pela distribuição de Gumbel.....	92
Tabela 10 - Valores de precipitação média e desvio padrão de estações pluviométricas da sub-bacia Ijuí e de vazão e cota registrados na estação fluviométrica de Itaqui. ....	93
Tabela 11 - Estações fluviométricas à jusante de Itaqui - RS. ....	94
Tabela 12 - Classes temáticas dos índices NDWI, MNDWI e NDPI ....	107
Tabela 13 – Estatística de desempenho da classificação MAXVER – limiar 99,9%.....	108

## SIGLAS

**ANA** – Agência Nacional das Águas

**CAPES** - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

**CAS** – Academia Chinesa de Ciências

**CEPED** – Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres

**CNRH** – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

**CPTEC** – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

**CRED** – *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*

**ECP** – Estado de Calamidade Pública

**EM-DAT** – *Emergency Events Database*

**ENOS** – El Niño-Oscilação Sul

**HAND** - *Height Above the Nearest Drainage*

**IAC** – Índice de Anomalia de Chuva

**IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**INMET** - Instituto Nacional de Meteorologia

**INPE** – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

**IRSA** – Instituto de Aplicações de Sensoriamento Remoto

**MAXVER** – Máxima Verossimilhança

**MIR** – Infravermelho Médio

**MNDWI** - *Modified Normalized Difference Water Index*

**NDPI** – *Normalized Difference Pond Index*

**NDVI** - *Normalized Difference Vegetation Index*

**NDWI** - *Normalized Difference Water Index*

**NIR** – Infravermelho Próximo

**NOAA** – *National Oceanic and Atmospheric Administration*

**OLI** – *Operational Land Imager*

**ONU** – Organização das Nações Unidas

**RS** - Rio Grande do Sul

**SC** – Santa Catarina

**SE** – Situação de Emergência

**SEMA** – Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura

**SIG** – Sistemas de Informações Geográficas

**SRTM** – *Shuttle Radar Topographic Mission*

**SWIR** – Infravermelho de ondas curtas

**TM** - *Thematic Mapper*

**TR** – Tempo de Retorno

**UFSC** – Universidade Federal de Santa Catarina

**UFRGS** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**USGS** – *United States Geological Survey*

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Objetivos.....	18
1.1.1 Objetivo Geral .....	18
1.1.2 Objetivos Específicos .....	18
1.2 Hipótese .....	18
1.3 Estrutura da Tese .....	19
1.4 Caracterização da área de estudo.....	20
1.4.1 Características geomorfológicas e altimétricas .....	22
1.4.2 Características climáticas .....	23
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	26
2.1 Eventos adversos e sua relação com a climatologia .....	26
2.2 Sensoriamento Remoto aplicado no mapeamento de corpos d'água .....	30
2.3 Estudos na Bacia Hidrográfica do rio Uruguai.....	33
3. METODOLOGIA.....	35
3.1 Materiais Utilizados.....	35
4. REFERÊNCIAS .....	36
ARTIGO 1: MAPEAMENTO DAS INUNDAÇÕES A PARTIR DE NDWI NO MUNICÍPIO DE ITAQUI, RIO URUGUAI – RS .....	41
1 Introdução.....	43
1.1 Área de estudo .....	45
2 Materiais e Métodos .....	47
2.1 Definição dos eventos de inundação e aquisição dos dados.....	47
2.2 Processamento das imagens.....	48
3 Resultados e Discussões .....	49
3.1 Relação entre a precipitação e as manchas de inundações .....	49
3.2 Espacialização a partir do Índice de Diferença Normalizada da Água- NDWI.....	53
4 Considerações Finais .....	59
5 Agradecimentos .....	60
6 Referências .....	60

ARTIGO 2 - ANÁLISE DE EVENTO DE INUNDAÇÃO A PARTIR DE IMAGENS LANDSAT, IMAGENS DE SUPERFÍCIE E DADOS HIDROLÓGICOS, ITAQUI-RS. ....	64
1 Introdução.....	66
1.1 Área de estudo .....	67
2 Material e Métodos.....	68
2.1 Dados hidrológicos.....	68
2.2 Aquisição e processamento das imagens.....	69
3 Resultados e Discussão.....	70
3.1 Análise das precipitações .....	70
3.2 Análise das imagens de superfície.....	75
4 Conclusões.....	77
5 Agradecimentos.....	78
6 Referências Bibliográficas.....	78
ARTIGO 3 - PADRÕES TEMPORAIS DE PRECIPITAÇÕES RELACIONADOS A INUNDAÇÕES, MUNICÍPIO DE ITAQUI – RS .....	82
1 Introdução.....	84
1.1 Área de estudo .....	85
2 Metodologia e Dados.....	86
3.1 Análise da série histórica das precipitações em Itaquí .....	88
3.2 Análise dos padrões de distribuição temporal das chuvas nos eventos de inundação.....	92
4. Conclusões.....	95
5. Agradecimentos.....	96
6. Referências .....	96
ARTIGO 4 - COMPARAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES NDWI, MNDWI E NDPI PARA O MAPEAMENTO DE PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO.....	98
1 Introdução.....	99
1.1 Área de estudo .....	100
2 Metodologia.....	101
2.1 Índices espectrais.....	102
3 Resultados.....	103
3.1 Análise dos índices espectrais da água.....	103
4 Conclusões.....	108

5 Agradecimentos .....	109
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	113

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo de áreas inundáveis destaca-se por sua grande importância, visto que, de acordo com a *United Nations University* (ONU, 2004), estima-se que a população mundial vulnerável às inundações cresça rapidamente para 2 bilhões de pessoas até 2050. Esse aumento ocorre devido ao crescimento populacional, ao desmatamento, às mudanças climáticas e aumento do nível do mar.

Conforme dados do *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* (CRED), desde 1995, as inundações foram responsáveis por 47% de todos os desastres naturais, afetando 2,3 bilhões de pessoas no mundo. O número de inundações por ano subiu para uma média de 171, no período entre 2005 e 2014, diferente do que ocorria na década anterior com uma média anual de 127. Na América do Sul, em média, 560.000 pessoas foram afetadas pelas inundações a cada ano, entre 1995 e 2004. Entre 2005 e 2017 esse número tinha aumentado para 2,5 milhões de pessoas.

Segundo a estimativa do EM-DAT do *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* (CRED) da Universidade de Louvain, entre 1900 e 2017 no Brasil uma população de cerca de 10,9 milhões foi atingida pelas inundações (EM-DAT, 2013). Entre 1991 e 2010, aproximadamente 730 mil pessoas foram atingidas por inundações em todo o Rio Grande do Sul. Além disso, foram desalojadas 73.628 pessoas conforme dados do Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres da Universidade Federal de Santa Catarina (CEPED/UFSC, 2013).

A região sul do Brasil, depois da região sudeste, é a mais afetada por desastres naturais. O Rio Grande do Sul enfrenta com frequência dois tipos de desastres que são antagônicos, inundações e estiagem, mas que causam grandes prejuízos à economia, ao meio ambiente e transtornos à população (SAUSEN; REIS, 2013). Muitos municípios do Rio Grande do Sul, em especial os que margeiam o rio Uruguai, tem sua população vulnerável à ocorrência de inundações. Soma-se a isso a falta de conhecimento sobre a dinâmica fluvial e meteorológica, ausência de políticas públicas de restrições à ocupação de áreas de risco e as poucas obras de contenção de inundações (RIGHI, 2013).

A variável de grande importância na dinâmica das inundações refere-se à precipitação. A precipitação é um evento extremamente aleatório, e, é um processo de origem climática, com formação local e/ou regional (PISTRIKA; TSAKIRIS, 2007). Importante considerar, que, quando há a ocorrência de precipitações extremas, o solo fica saturado e diminui a capacidade de infiltração, logo, há um maior volume de escoamento das águas, excedendo o volume



máximo possível do leito menor do rio, e, por consequência, há o extravasamento das águas, ou seja, a ocorrência de inundações (TUCCI, 2005).

Outro fator natural de influência às inundações é a cobertura vegetal, a qual protege o solo contra a ação da erosão. A perda dessa cobertura gera, principalmente, o assoreamento dos rios, e, como consequências o adensamento de eventos de inundação. Deve-se salientar que as condições artificiais são interligadas às ações do homem dentro da bacia hidrográfica, como por exemplo: a construção de obras, o desmatamento da vegetação, a urbanização e o uso agrícola (TUCCI, 2005).

O sensoriamento remoto atua como uma ferramenta que facilita o mapeamento e análise de áreas afetadas por desastres relacionados a eventos extremos. Técnicas de processamento e classificação digital de imagens podem ser utilizadas em estudos de inundações. Townsen & Walsh (1998) utilizaram dados Landsat e de radar *Japanese Earth Resource Satellite (JERS-1)* para delimitar a extensão máxima das inundações em várzea fluvial. A álgebra de bandas como o NDWI (*Normalized Difference Waters Index*) pode ser utilizada para identificar, monitorar e mapear áreas úmidas ou inundadas, e tem se mostrado de grande valia em estudos de inundações. Leivas *et al.* (2013) realizaram o monitoramento de seca a partir de NDWI e NDVI padronizado do *SPOT-Vegetation*; Namikawa (2015) utilizou NDWI na comparação de métodos de classificação para reconhecimento de corpos d'água em imagens do sensor OLI do Landsat 8.

Na análise dos registros de Situação de Emergência e Calamidade Pública de inundações nos municípios que margeiam o rio Uruguai no Rio Grande do Sul, Reckziegel (2007) mostra que alguns municípios têm mais de 25 ocorrências entre 1980 e 2005. Por consequência as cidades atingidas tiveram perdas e danos significativos, muitas moradias ficaram submersas, e houve destruição de lavouras, estradas e pontes.

Mesmo diante de tantos danos e prejuízos oriundos das inundações, ainda muito poucos trabalhos analisam as planícies de inundação como um todo ou mesmo de forma pontual. O que se observa é uma gama de trabalhos mais voltados para os impactos nas áreas urbanas, de forma pontual nos municípios atingidos.

Especificamente no rio Uruguai os trabalhos são mais voltados para as questões que abordam zoneamento das áreas de risco e modelos matemáticos que simulam o grau do nível de inundação local. Assim, este trabalho tem o intuito de contribuir para a Região Hidrográfica do Rio Uruguai, pois existe uma carência de trabalhos voltados para este tipo de temática, com vistas a entender como precipitações extremas (intensidade e volume), sejam elas locais ou regionais, influenciam nas inundações no médio curso no rio Uruguai, no município de Itaqui.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Identificar o comportamento das inundações a partir de imagens de sensoriamento remoto, dados de precipitação, cota e vazão do rio, entre os anos de 1980 e 2017, no médio curso do rio Uruguai na bacia hidrográfica do rio Uruguai, no município de Itaqui/RS.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Analisar a dinâmica das inundações em uma seção do rio Uruguai a partir de imagens de satélite;
- Analisar a partir dos dados de precipitação e imagens de superfície os tipos de sistemas meteorológicos atuantes, no evento de inundação ocorrido em maio de 2017, no município de Itaqui;
- Analisar as precipitações anuais, mensais e os padrões de chuva relacionados a eventos de inundação no rio Uruguai, no município de Itaqui – RS;
- Identificar áreas inundadas a partir de diferentes índices espectrais (NDWI, MNDWI e NDPI) e comparar suas diferenças a partir de classificações.

## **1.2 Hipótese**

A presente pesquisa parte de um problema geral, o registro cada vez mais frequente de ocorrência de inundações no Brasil e no mundo. O Brasil devido à sua grande área territorial, às condições climáticas e fisiográficas e aos diferentes graus de desenvolvimento urbano, está sujeito permanentemente à ocorrência de desastres. No Brasil os desastres tendem a estar relacionados a fenômenos climáticos, potencializados pela ação e exposição do homem (INSTITUTO GEOLÓGICO, 2009).

Desta forma, a hipótese central da pesquisa é de que é possível, a partir de técnicas de processamento digital de imagens de satélite e Sistemas de Informações Geográficas (SIG), aliado a séries históricas de dados de precipitação e de inventários de eventos adversos, estabelecer padrões espaciais de inundações em função do tipo de sistema meteorológico atuante.

### 1.3 Estrutura da Tese

A Tese está organizada em forma de artigos científicos enviados a revistas científicas qualificadas na área de Geociências, sob diferentes abordagens envolvendo temas associados a inundações, por meio de sensoriamento remoto.

Inicialmente é apresentada a caracterização da área de estudo, abordando a geomorfologia, geologia e climatologia. Após isto a revisão sobre os temas envolvidos na pesquisa. Os tópicos abordam os seguintes temas: Eventos Adversos e a sua relação com a Climatologia; Sensoriamento Remoto aplicado a inundações e estudos realizados na Bacia Hidrográfica do rio Uruguai.

A partir disto o texto passa a ser estruturado na forma de quatro artigos complementares, sob diferentes abordagens envolvendo temas associados a inundações em médio curso no rio Uruguai, no município de Itaqui, RS. O primeiro artigo analisa a dinâmica das inundações a partir de imagens de satélite, dados de precipitação e cota. Aborda-se a relação entre a precipitação e as manchas de inundações nos anos de 1987, 1997, 2001 e 2010, especializando estas áreas a partir do Índice de Diferença Normalizada da Água.

O segundo artigo para entender as dinâmicas dos eventos adversos, analisa a partir das imagens de superfície e dados de precipitação, o evento de inundação ocorrido em maio de 2017, o qual levou o município de Itaqui a decretar Situação de Emergência em decorrência da inundação do rio Uruguai. A partir das imagens sinóticas de superfície disponibilizadas no boletim técnico do CPTEC pode-se observar no período de 28 a 31 de maio, os sistemas atmosféricos atuantes neste evento.

No terceiro artigo optou-se por analisar as precipitações anuais, mensais e os padrões de chuva relacionados a eventos de inundação no rio Uruguai, em uma de suas sub-bacias, a qual o município de Itaqui está inserido. A partir da análise temporal dos dados de cota, identificou-se as estações do ano e os meses em que o nível do rio ultrapassou a cota de inundação. Também foi analisado os dados de vazão de estações fluviométricas à jusante de Itaqui, para entender a relação no tempo que decorre na elevação das águas em médio curso.

O quarto artigo aborda técnicas de sensoriamento remoto para identificar áreas inundadas a partir de diferentes índices espectrais (NDWI, MNDWI e NDPI), classificando as imagens pelo algoritmo MAXVER para comparar os mapeamentos de inundações. Também foi realizada a validação das classificações dos índices espectrais, por meio dos índices Kappa e Tau.

## 1.4 Caracterização da área de estudo

O rio Uruguai divide os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina e faz limite com a Argentina. A área total drenada pela Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai (conforme Resolução CNRH n.º 30/2003), é de cerca de 385.000 km<sup>2</sup>, destes, 45% (ou seja, 174.412km<sup>2</sup>) estão situados em território brasileiro, sendo que 73% estão no Rio Grande do Sul e 27% em Santa Catarina. Seus principais tributários estão situados no setor leste da bacia. A vazão média anual é de 3600 m<sup>3</sup>/s e seu volume médio anual é de 114 km<sup>3</sup> (CADERNO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO URUGUAI, 2006).

A área de estudo corresponde a uma seção do rio Uruguai e afluentes, Figura 1, situada na fronteira entre a Argentina e o Brasil. O município de Itaqui localizado ao norte da imagem e o rio Ibicuí ao sul, afluente do rio Uruguai, se situam na margem esquerda do rio Uruguai no RS. Este trecho foi escolhido por ser considerado de alta suscetibilidade à inundação, em frequência e impactos (ANA, 2016). Medeiros (2011) destaca que uma zona de alto risco é definida por apresentar cheias com frequência menor que 5 anos.

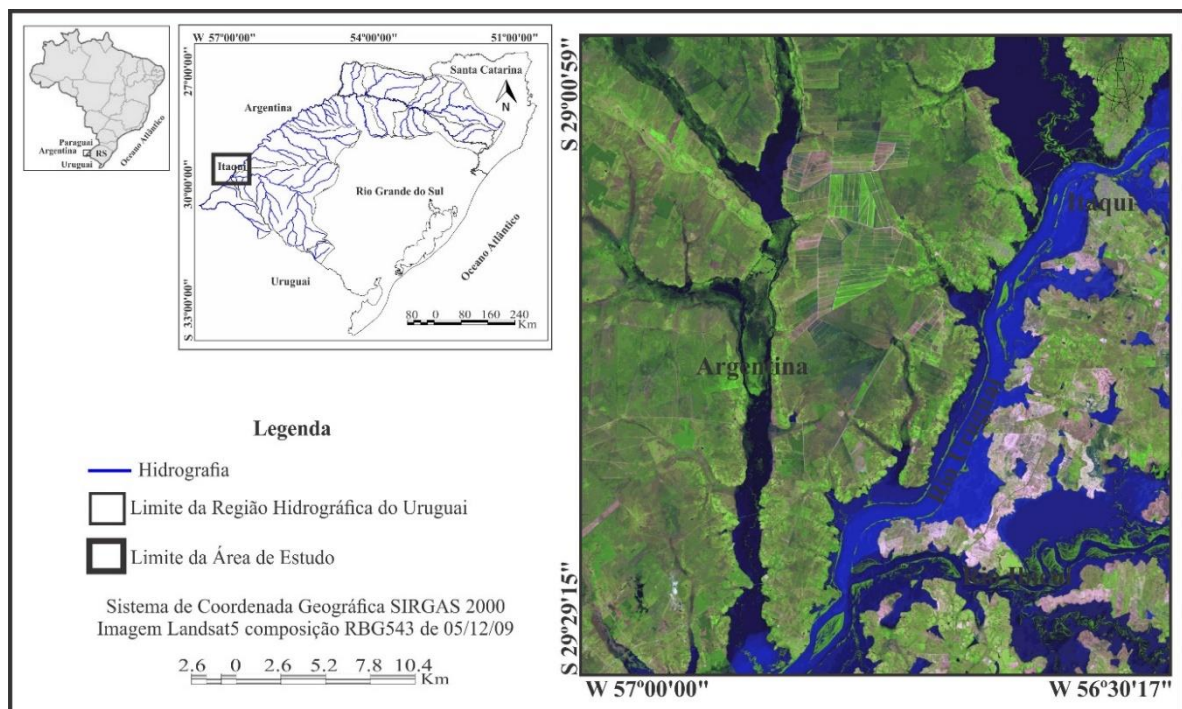


Figura 1 - Localização da área de estudo: trecho do rio Uruguai entre Itaqui ao norte e o rio Ibicuí ao sul, Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai – RS.

De acordo com Reckziegel (2007) no período entre 1980 e 2005, foram registradas 7.080 ocorrências de desastres naturais no RS. Foram homologados pela Defesa Civil 4035 Decretos de Situação de Emergência e 158 de Estado de Calamidade Pública. Desse total, 2196 estavam associados à dinâmica fluvial, sendo 1258 referentes às inundações e 925 à enxurradas.

Sausen e Reis (2013) organizaram uma base de dados dos municípios do RS que decretaram Situação de Emergência, em decorrência de inundações e enxurradas, entre 1980 e 2012, utilizando o banco de dados do GEODESASTRES - SUL. A partir dessa espacialização das ocorrências de inundações no Estado (Figura 2), é possível destacar que a área que compreende a bacia hidrográfica do Uruguai, sofre com intensas inundações. As estações de outono e inverno apresentaram maior registro de decretos de inundação, enquanto na primavera há mais registros para as enxurradas.

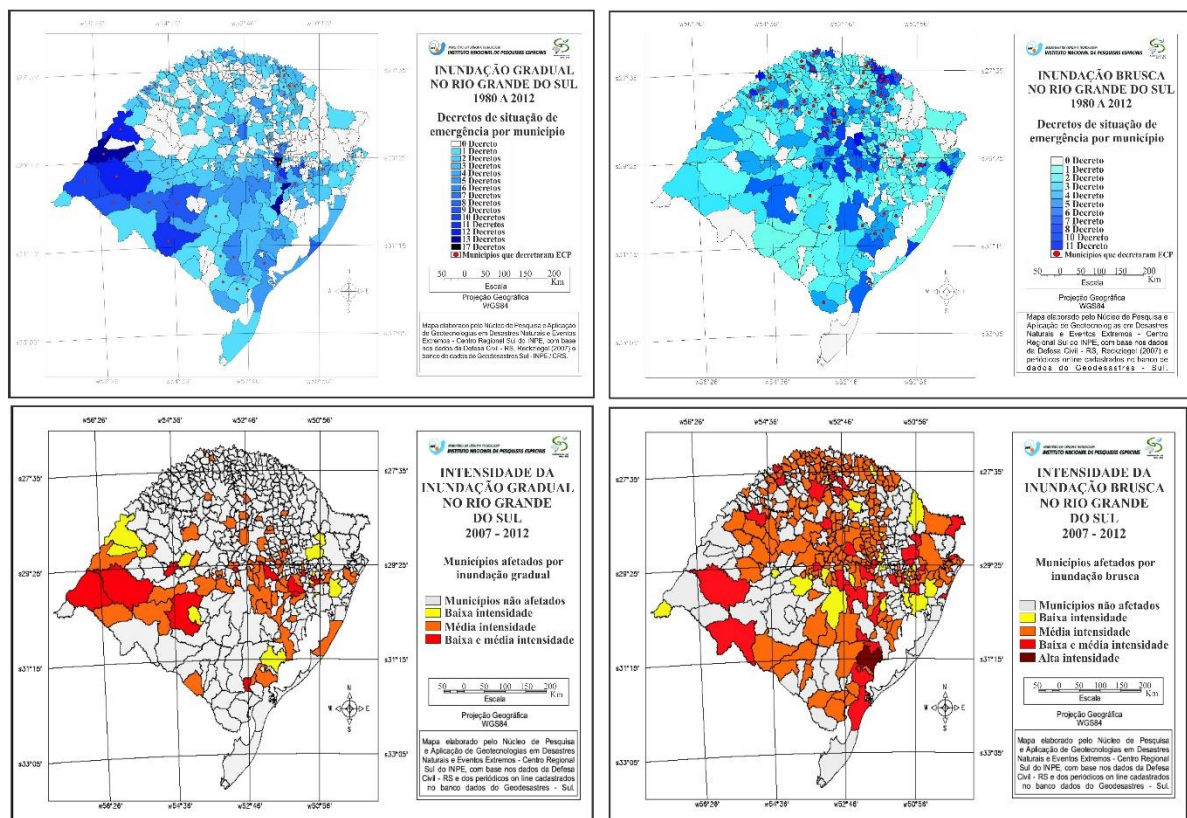


Figura 2 -Inundações e enxurradas no Rio Grande do Sul. Fonte: Adaptado de Sausen & Reis (2013).

A planície de inundação do rio Uruguai tem significativa diferença no médio curso. A jusante de Porto Lucena, a planície de inundação do rio se amplia, praticamente sem encaixamento, com feições que denotam expressiva acumulação fluvial que aumenta em área

em direção sul. Nos municípios de São Borja, Itaqui e Uruguaiana, a planície apresenta um acúmulo de água elevado relativo ao escoamento da bacia hidrográfica (RIGHI & ROBAINA, 2010).

A largura da planície de inundação pode chegar a 4 km em Itaqui e São Borja. A área ao norte da área urbana é inundada pela planície de inundação do rio Uruguai, e a sul do pelo rio Ibicuí, um dos mais importantes da bacia hidrográfica do rio Uruguai. O rio Ibicuí é importante no aumento da vazão do rio Uruguai deste ponto em direção a jusante (OGASSAWARA & GASS, 2018).

#### **1.4.1 Características geomorfológicas e altimétricas**

De um modo geral, a Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai é caracterizada por três domínios morfoesculturais: o Escudo Sul rio-grandense, formado por rochas cristalinas do Pré-cambriano; a Depressão central, formada de rochas sedimentares da Bacia do Paraná e o Planalto Meridional, formado de rochas vulcânicas da bacia. O Planalto Meridional é formado por uma litologia predominantemente basáltica da Formação Serra Geral, sendo na região sudoeste a geomorfologia caracteriza-se por apresentar relevo de aplanamento, associado a restos de derrames basálticos, com situações topográficas em rampas que descem em direção aos terraços fluviais do rio Uruguai. A região onde se localiza o município de Itaqui apresenta relevo predominante de coxilhas e planícies de inundação.

O mapa do modelo digital de elevação, Figura 3A, apresenta as altitudes na região hidrográfica do rio Uruguai que variam entre 31 e 1818 m, a área ao sul é representada pelas menores altitudes que variam entre 33 e 500 m e ao norte por altitudes entre 500 e 1818 m.

O mapa de solos (Figura 3B) foi reclassificado por RIGHI (2016) em um número menor de classes, levando em consideração os solos profundos, bem drenados, classificados como solos de baixo potencial de geração de escoamento superficial. Estes solos contribuem para a recarga de aquíferos e contribuem para o escoamento de base dos rios.

Solos arenosos como os latossolos têm uma quantidade maior de areia, são solos porosos e permeáveis, pois apresentam grandes espaços entre os grãos de areia. STRECK *et al.* (2008) destacam que a água passa com facilidade entre os grãos de areia e chega logo às camadas mais profundas. Os solos rasos tendem a ter um grande potencial de geração de escoamento superficial e uma baixa capacidade de armazenamento de água.

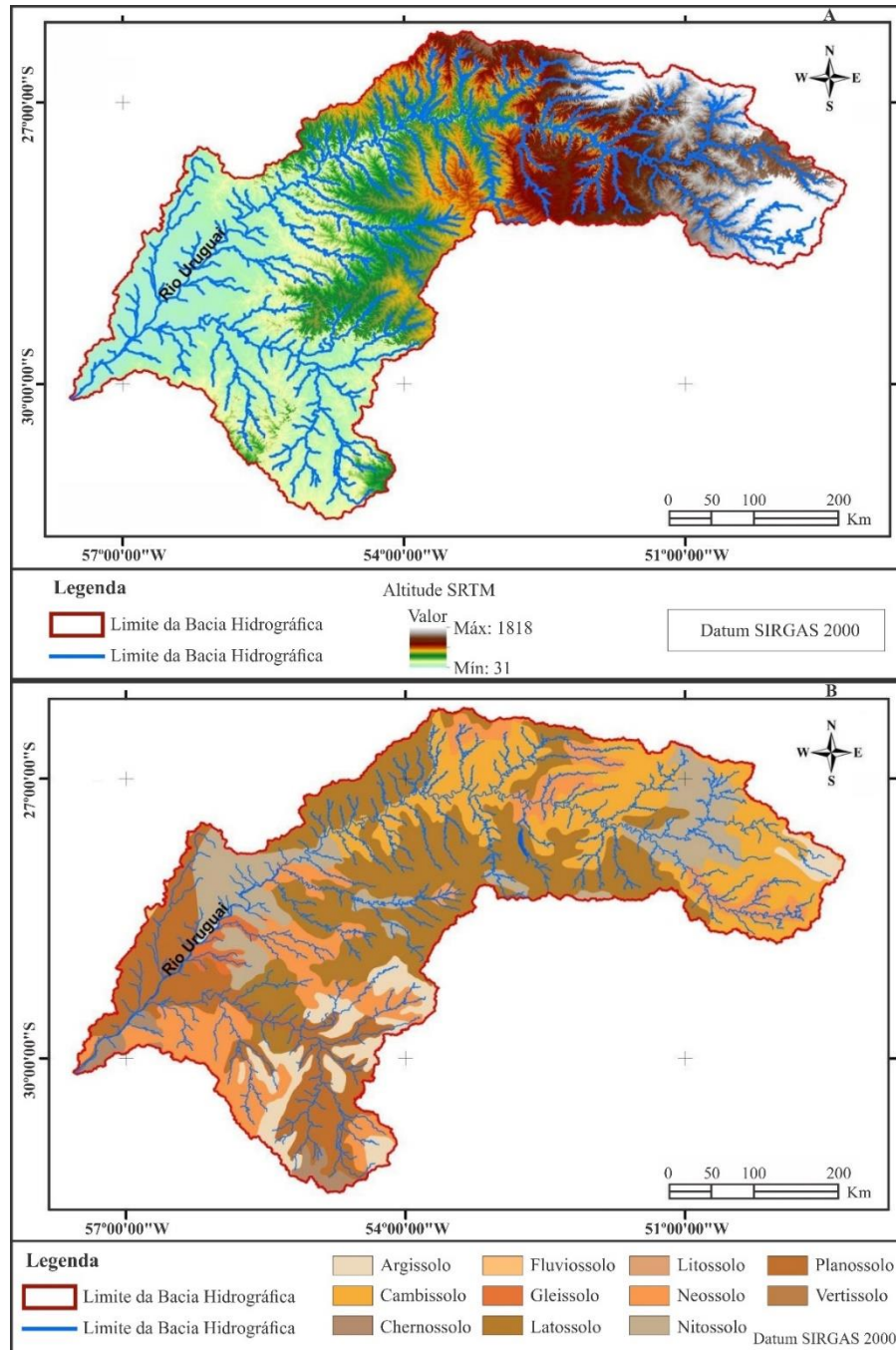


Figura 3- Mapa do modelo digital de elevação e Mapa de solos, Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai. Fonte: Adaptado de Righi (2016).

#### 1.4.2 Características climáticas

De acordo com o Caderno da Região Hidrográfica do Uruguai (2006), o clima da região segue a classificação climática de Köppen, de Clima Temperado, com chuvas distribuídas em todas as estações, mas com concentração média maior no inverno (maio a setembro). Segundo dados do Inmet, a precipitação média anual na bacia hidrográfica é de 1623 mm.

Sartori (2003) destaca que o Rio Grande do Sul, está localizado em zona climatológica de transição e, por isso, as principais características climáticas do RS remetem à participação tanto dos Sistemas Atmosféricos Extratropicais (massas e frentes polares) quanto dos Intertropicais (massas tropicais e Correntes Perturbadas), embora os primeiros exerçam o controle dos tipos de tempo. A posição subtropical faz com que a região seja área de confronto periódico entre forças opostas, proporcionando a distribuição das chuvas durante todo o ano, em razão das sucessivas passagens de sistemas frontais. No entanto, destaca que existe variabilidade espaço-temporal das precipitações, ocasionando episódios de longas estiagens ou de inundações, que podem acontecer em qualquer época do ano e que remetem a alterações na habitualidade da circulação atmosférica nas escalas regional e zonal, em parte provocadas pelo conhecido fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS).

Rossato (2011) destaca que a distribuição média do total anual de precipitação pluviométrica oscila no sentido norte (mais chuvoso) – sul (menos chuvoso), indicando a influência conjugada dos sistemas atmosféricos, com as formas do relevo, com a altitude e com as correntes marítimas. Sendo assim, a altitude constitui um fator que associado aos sistemas atmosféricos incrementa o volume de precipitação no norte gaúcho, uma vez que o Planalto Basáltico favorece a subida do ar, a formação de nuvens e a precipitação. Além disso, destaca ainda que o posicionamento do vale do rio Uruguai no norte do RS ocasiona a ascensão do ar tanto na direção norte (SC), quanto no sul (RS), também incrementando a precipitação.

Conforme o Mapa (Figura 4) dos tipos climáticos do Rio Grande do Sul de Rossato (2011) a região hidrográfica do Uruguai sofre influência de, praticamente, todos os tipos climáticos, sendo que o município de Itaqui encontra-se na região com clima Subtropical III úmido com variação longitudinal das temperaturas médias, com expectativa de chuva entre 1700-1800 mm ao ano e temperatura média anual variando entre 17 – 20°C.



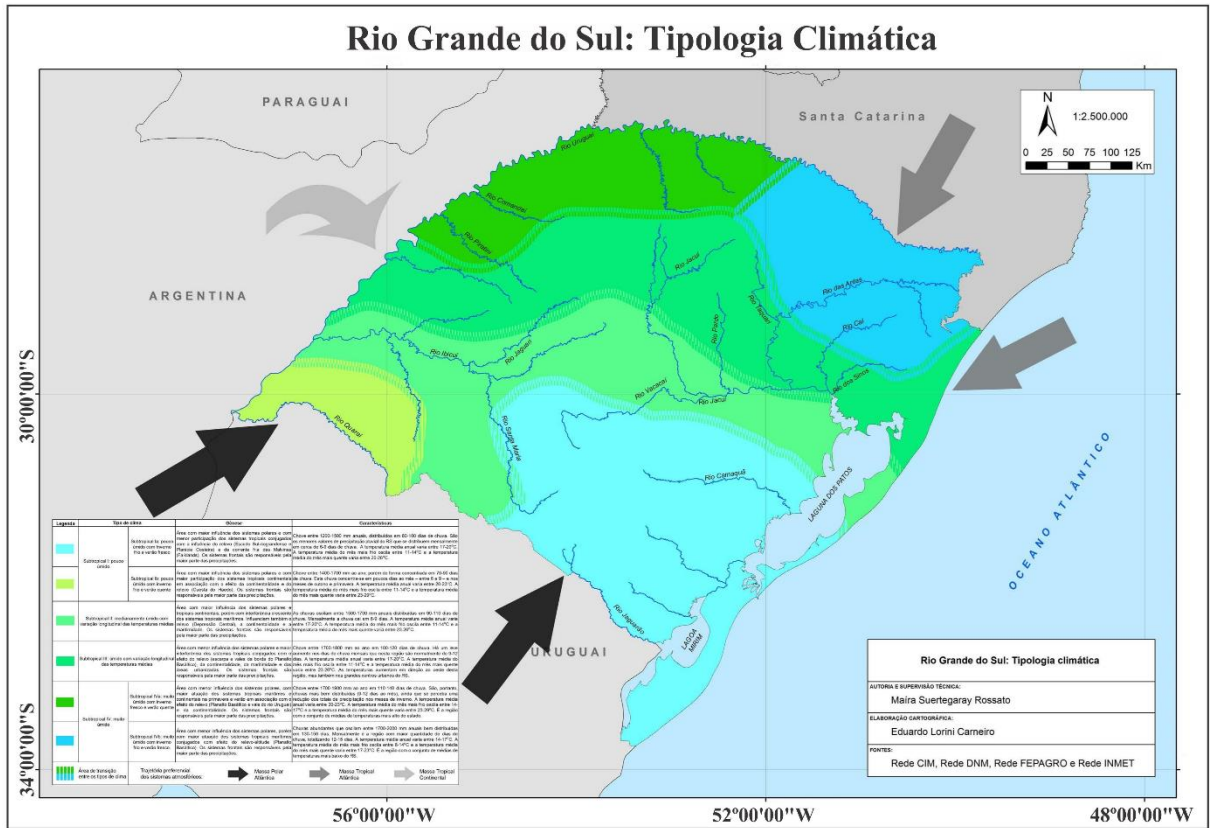


Figura 4 - Tipos de clima e sua distribuição no RS. Fonte: Adaptado de Rossato (2011).

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica está organizada da seguinte maneira: uma abordagem sobre Eventos Adversos e a sua relação com a Climatologia; Sensoriamento Remoto aplicado a inundações e estudos realizados na Bacia Hidrográfica do rio Uruguai.

### 2.1 Eventos adversos e sua relação com a climatologia

De acordo com CEPED/RS-UFRGS (2016) eventos são fenômenos da natureza ou causados pela ação antrópica que ocorrem sem causar danos ou prejuízos significativos, não levando à decretação de Situação de Emergência (SE) ou Estado de Calamidade Pública (ECP). Portanto, muitos eventos acabam não sendo contabilizados nos registros de ocorrência, e, com isto, não são indicados nos levantamentos preliminares (inventários), o que se constitui em uma fonte potencial de erros nos mapeamentos. Assim, podemos citar como exemplos de eventos os deslizamentos e inundações que ocorrem em áreas não ocupadas, com consequências mínimas ao homem e suas atividades.

No entanto, os eventos adversos, por outro lado, tratam da ocorrência desfavorável, prejudicial, imprópria de eventos, pois trazem danos e prejuízos à população ou ao ambiente. Desta forma determinados eventos, como uma chuva forte sobre uma cidade ou um período prolongado sem chuvas em uma área agrícola, são denominados de eventos adversos. Os efeitos desses eventos adversos podem ou não ocasionar acidentes ou desastres, dependendo de suas consequências (CEPED/RS-UFRGS, 2016).

O Glossário da Defesa Civil (2016) denomina evento adverso como sendo: correspondente a uma ocorrência desfavorável, prejudicial ou imprópria; ou como fenômeno causador de um desastre e o inventário é denominado como sendo o levantamento e compilação dos registros dos eventos e desastres ocorridos. Entre os desastres naturais, as inundações estão entre os tipos de eventos mais frequentes e que causam maior destruição em todo o mundo (SANYAL & LU, 2004).

As inundações ocorrem a partir do extravasamento das águas do leito menor de um rio (ENOMOTO, 2004). A inundação, popularmente tratada como enchente, é o aumento do nível dos rios além da sua vazão normal, ocorrendo o transbordamento de suas águas sobre as áreas próximas a ele. Estas áreas planas próximas aos rios sobre as quais as águas extravasam são denominadas de planícies de inundação. Quando não ocorre o transbordamento, apesar do rio ficar praticamente cheio, tem-se uma enchente e não uma inundação (KOBİYANA *et al.*, 2006).

Os desastres relacionados a enxurradas e inundações são os que acarretam maiores prejuízos econômicos ao país. As enxurradas são desencadeadas por chuvas intensas e concentradas, e consistem na elevação súbita dos rios acompanhada de um escoamento de alta velocidade e energia. As inundações consistem no aumento lento e previsível dos níveis de água em cursos e corpos hídricos, gerando transbordamento que se mantém em situação de cheia durante algum tempo e, a seguir, escoam gradualmente. Esse tipo de desastre é ocasionado, geralmente, por chuvas prolongadas em áreas de planície (CEPED/UFSC, 2013; CEPED/RS-UFRGS, 2016).

A morfologia das planícies está relacionada com o desenvolvimento do canal principal que lhe deu origem e com processos de deposição e erosão, ocorridos na sua gênese. De modo geral, grandes planícies de inundação são largas e com seção transversal convexa. A forma convexa ocorre porque a carga sedimentar transportada pelo rio se distribui lateralmente desde o canal, formando diques marginais ao longo do seu fluxo. Em planícies pequenas a médias, a seção transversal pode ser plana ou ligeiramente côncava. A forma côncava ocorre em áreas propensas a aumento da descarga e alargamento de canais (HUGGETT, 2007; CHARLTON, 2008).

A magnitude e a frequência das inundações decorrem da intensidade, duração e distribuição da precipitação, da taxa de infiltração da água no solo, da capacidade de retenção de água devido ao uso e cobertura do solo, do grau de saturação do solo e das características morfométricas e morfológicas da bacia de drenagem. Assim, como algumas destas condicionantes podem variar em função da estação do ano, padrões atmosféricos sazonais, além da influência das mudanças climáticas globais (BOTELHO, 2004; TOMINAGA *et al.*, 2009; SOUZA *et al.*, 2017).

A vazão é influenciada pelas formas do relevo, padrão de drenagem e a capacidade de infiltração da superfície, possibilitando deste modo, a ocorrência de eventos de inundações. Existem fatores fundamentais para a análise da dinâmica hídrica nestes eventos, são eles os índices de precipitação e de vazão. Quando as características ou repetitividade não estão bem claras, trabalha-se com estatísticas de eventos conhecidos para a projeção da possibilidade de ocorrência futura. Embora haja uma relação entre ambos, são dados distintos, pois as variáveis que podem incidir sobre a precipitação, faz com que esta resulte em um risco diferente da vazão resultante (TUCCI, 2003).

A variabilidade interanual das precipitações na região sul do Brasil está diretamente relacionada a fenômenos de circulação atmosférica, tanto em escala regional quanto global. O Rio Grande do Sul situa-se em uma região favorável à atuação de fenômenos meteorológicos

que afetam o tempo e o clima (Cera e Ferraz, 2015). A diversidade de fenômenos que atuam na precipitação do RS, também influencia na intensidade, distribuição e frequência da ocorrência de eventos adversos (CAMPOS e SILVA, 2010; CAMPOS e EICHHOLZ, 2011).

As inundações são fenômenos naturais e apresentam certo intervalo de recorrência que varia conforme as características climáticas de cada região (TUCCI, 2003; CUNHA, 2007). O Rio Grande do Sul está situado em zona climática de transição, isso se deve ao fato das principais características climáticas refletirem a participação de Sistemas Extratropicais (massas e frentes polares) e Sistemas Intertropicais (massas tropicais e correntes perturbadas delas decorrentes). Sua posição subtropical faz com que seja área de confronto entre forças opostas, provocada pelo avanço dos sistemas atmosféricos de origem polar em direção a Massa Polar Velha ou aos sistemas de origem tropical (Tropical Atlântico e Tropical Continental), proporcionando distribuição de chuvas durante todo o ano, decorrente das sucessivas passagens frontais, sem ocorrência de estação seca (SARTORI, 2003; ROSSATO, 2011).

A Massa Tropical Atlântica corta a região através de correntes de leste e nordeste, geralmente trazendo estabilidade atmosférica. No entanto, no verão, com o aquecimento basal e o efeito orográfico causado pelo contato com a superfície continental, torna-se uma massa instável. No inverno, o resfriamento da base aumenta a estabilidade superior colaborando para que ocorra tempo bom. Com grande poder de penetração no continente que atua durante todo o ano (MONTEIRO, 1968). ROSSATO (2011) destaca que as ondas de leste-nordeste dependem muito da disposição que a massa apresenta em relação ao continente, mas, frequentemente, a região sul está mais integrada em uma grande dorsal prolongada do anticiclone oceânico.

As massas de ar continentais atravessam a região de planícies interiores na forma de correntes de noroeste, ou, também, correntes perturbadas de oeste (NIMER, 1989). A sua origem está ligada às ondulações que se verificam na Frente Polar Atlântica ao entrar em contato com o ar quente da região tropical. A Massa Equatorial Continental tem influência sobre o sul do Brasil no verão meridional, quando é atraída pelos sistemas depressionários do interior do continente e avança do noroeste, para sudeste ou para leste-sudeste, de acordo com a Frente Polar Atlântica (MONTEIRO, 1968).

Rossato (2011) destaca que a Massa Equatorial Continental, responsável pelo aquecimento da região, durante o verão, é seguida da penetração da Massa Tropical Continental, que, além do calor, também é responsável pelo aumento da umidade e das precipitações. Pela sua configuração o vale dos rios Paraná e Uruguai, está mais comumente suscetível ao incurso destas correntes, embora no verão elas atinjam toda a região.

A participação da Massa Tropical Continental é complementar, pois está restrita ao período do verão. Assim, forma-se sobre o ar quente e seco em superfície na Depressão do Chaco uma célula de ar frio em altitude. De tal modo que esta célula de baixa pressão da planície central do continente, dotada de subsidência superior pela entrada de ar frio, torna-se dotada de movimento divergente (ROSSATO, 2011).

A Massa Polar Atlântica é de ar frio e úmido e sua fonte está sobre o Atlântico em altas latitudes. Em decorrência do relevo na face oriental dos Andes, tornam a Polar Atlântica muito influente sobre a porção meridional da América do Sul, especialmente no sul do Brasil, pois mantém uma interferência importante durante todo o ano. Nas outras regiões brasileiras sua atuação é maior no inverno (ROSSATO, 2011).

As correntes de sul, originadas na Polar Atlântica, constituem a descontinuidade mais expressiva que atravessa a região sul. Depois da passagem das perturbações da descontinuidade frontal, ocorrem quedas na temperatura, que algumas vezes geram ondas de frio. Em relação à circulação superior, a chegada de ar frio no inverno provoca forte instabilidade, uma vez que os contrastes térmicos são acentuados pelos aquecimentos prévios das correntes perturbadas de oeste (MONTEIRO, 1968; NIMER, 1989; ROSSATO, 2011). Desta forma, as correntes de sul, no inverno, colaboram para uma forte turbulência atmosférica, com muitas trovoadas, que é atenuada no período de verão.

A Frente Polar, no Continente Sul Americano, da mesma maneira que as massas polares, compreende duas seções: Atlântico e Pacífico. A Frente Polar Atlântica que encontra facilidade pelas condições geográficas da vertente atlântica da América do Sul é particularmente móvel. A sua potencialidade de avanço na zona intertropical é decorrente das condições de Frontogênese as quais estão, também relacionadas à Frente Polar Pacífica (MONTEIRO, 1968; SARTOTI, 1993; ROSSATO, 2011).

A Frontogênese da Frente Polar Pacífica é acentuada, em decorrência da oposição que a Massa Polar Pacífica encontra no seu avanço para o norte, decorrente da maior proximidade da fonte da Massa Tropical Pacífica. O desenvolvimento ciclogênico que transcorre disto contribui para reforçar o acúmulo de ar frio na vertente atlântica, pois possui sucessivos extravasamentos de ar polar sobre os Andes meridionais para a Patagônia (ROSSATO, 2011). Sendo assim, este reforço acentua as condições de Frontogênese na Frente Polar Atlântica, que próxima aos 20°S, a Frente Polar não tem energia suficiente para manter-se avançando, estabelecendo-se então, o equilíbrio dinâmico entre a Alta Subtropical do Atlântico Sul e a Anticiclone Polar Móvel (NIMER, 1989).

No inverno quando as condições de Frontogênese são mais frequentes, os avanços da Frente Polar Atlântica são mais fortes. Na primavera seu avanço atinge o Trópico de Capricórnio, podendo chegar aos 10°S. No verão esta enfraquece, dificilmente chegando ao trópico, mas atingindo o RS. No outono, as condições de avanço da Frente Polar são fracas ainda, contudo esta é favorecida pelo forte gradiente existente, o que a fez desenvolver acentuada ciclogênese, na qual os sistemas intertropicais, bastante ativos, fazem-na regredir. Em seu trajeto, condicionada pelo contraste térmico e pelo relevo, a Frente Polar Atlântica divide-se em duas vertentes que seguem caminhos distintos: o continental pela Depressão do Chaco e o marítimo pelo Oceano Atlântico. (MONTEIRO, 1968, SARTORI, 1993a, 1993b; ROSSATO, 2011).

## **2.2 Sensoriamento Remoto aplicado no mapeamento de corpos d'água**

As imagens de sensoriamento remoto têm fundamental importância para a análise e acompanhamento de áreas atingidas por desastres, pois possibilitam o levantamento de dados com alta resolução espacial e temporal. A delimitação e mapeamento de planícies de inundação contribuem nas pesquisas ecológicas e sobre as componentes do meio físico de todo o sistema fluvial; na avaliação da exposição da população a inundações; na criação de políticas públicas que visem sua proteção e manejo. Algumas metodologias que utilizam dados de sensoriamento remoto e de sistemas de informação geográfica (SIG) apresentam resultados promissores neste tipo de estudos em escalas local, nacional e global (COBBY *et al.*, 2001; SHIMABUKURO; NOVO, 2002; STRYKER; JONES, 2009; COUTO *et al.*, 2010; SHAN *et al.*, 2010; RENÓ *et al.*, 2011; RUDOFF *et al.*, 2012; WESTERHOFF *et al.*, 2012).

Alguns trabalhos com aplicação de dados de sensoriamento remoto incluem o mapeamento de planícies a partir de elementos da superfície, como, por exemplo, a vegetação ripária. Neste caso, o mapeamento de áreas de preservação permanente é obtido pelo processamento de imagens de sensores óticos. Este tipo de mapeamento é indicado para áreas naturais ou rurais, mas restrito em áreas urbanizadas e ou impermeabilizadas, pois nestas últimas a vegetação, indicadora de planícies, pode ter sido removida. Outro enfoque que utiliza esta técnica é o mapeamento de áreas inundadas ou alagadas a partir de dados de radar. Este é um recurso valioso de apoio a atividades de atenção a emergências em locais carentes de mapeamentos prévios (MARINHO *et al.*, 2012).

Em muitas bacias hidrográficas do Brasil, a disponibilidade de dados hidrológicos é insuficiente para a elaboração de estudos e pesquisas que subsidiem medidas preventivas. Em

contrapartida dados obtidos por sensoriamento remoto e os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) tem se mostrado muito úteis para estudos relacionados a inundações. Uma vez que dados de sensores remotos vem sendo utilizados para a espacialização de áreas inundáveis, bem como fotografias aéreas para elaboração dos modelos digitais do terreno (OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Oliveira (2010) espacializou e analisou as inundações na bacia hidrográfica do rio Caí/RS, a partir de dados obtidos por sensoriamento remoto, dados fluviométricos e da aplicação de técnicas de geoprocessamento. Para calcular do tempo de retorno (TR) das inundações foram utilizadas séries históricas de cota de três estações fluviométricas o que possibilitou o entendimento da distribuição sazonal das inundações na bacia.

Islam & Sado (2000) fizeram a “Estimativa de ameaça de inundação utilizando imagens NOAA AVHRR em Bangladesh”, utilizando imagens de períodos de inundação x área normalmente coberta por água. As imagens de satélite aliadas a modelos digitais de elevação mostraram-se bastante apropriadas uma vez que as inundações nas bacias dos rios Ganges, Brahmaputra e Megh caracterizam-se pela grande magnitude, alta frequência, longa duração e extensiva devastação.

O Instituto de Aplicações de Sensoriamento Remoto (IRSA) da Academia Chinesa de Ciências (CAS) e o Centro de Informação do Estado desenvolveram um Sistema de Avaliação de Danos de Inundação utilizando sensoriamento remoto e SIG. Ele consegue fazer a avaliação de danos rapidamente e desempenha um importante papel no controle de inundações e na mitigação de desastres (SHI-RONG *et al.*, 2003).

Desta forma, o monitoramento de variações nas inundações por meio de técnicas *in situ* é limitado devido a problemas de logística e acesso a estes ambientes remotos e, em muitos casos, à grande dimensão das áreas inundadas. Sendo assim, conforme verificado nos trabalhos que utilizam o sensoriamento remoto como ferramenta para o monitoramento, esta é considerada a forma mais rápida e econômica deste tipo de análise, os quais permitem mapear a dinâmica de inundação nas áreas inundáveis.

O mapeamento de áreas inundadas a partir de dados de sensoriamento remoto tem sido amplamente utilizado (SERPICO *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2002), e pode ser abordado pela classificação das áreas efetivamente inundadas logo após um evento hidrometeorológico ou por delimitação da topografia da planície, ou seja, da área inundável. Muñoz (2014) desenvolveu uma metodologia para delimitar a planície de inundação a partir da topografia, utilizando dados de elevação da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resultados satisfatórios para a bacia do rio Itajaí, em Santa Catarina.

Entre os dados mais utilizados para o mapeamento das áreas inundadas, destacam-se produtos obtidos por técnicas de processamento digital de imagens de sensores ópticos como, por exemplo, do satélite Landsat (XU, 2006), ou por processamento de dados de radar na região espectral de micro-ondas, como imagens do satélite RADARSAT (MARINHO *et al.*, 2012).

Técnicas de processamento digital de imagens obtidas por sensores ópticos para mapeamento de áreas inundadas são baseadas em algoritmos de classificação que visam analisar o comportamento espectral da água, seja pela análise de uma ou mais bandas. Análises multi bandas têm sido indicadas para a identificação de corpos d'água devido a sua eficiência na separação das classes temáticas, através de índices espectrais (LI *et al.*, 2013).

Segundo JI *et al.* (2009), a compreensão de um índice espectral de água foi baseada no fato de que a água absorve energia em comprimentos de onda do infravermelho próximo (NIR) e ondas curtas de infravermelho (SWIR). A operação aritmética realizada para a obtenção dos índices espectrais não apenas melhora os sinais espectrais, contrastando a reflectância entre diferentes comprimentos de onda, mas ainda invalida uma grande parcela dos componentes de ruído, que são comuns em diferentes comprimentos de onda, sendo estes: a calibração de sensores e a alteração das condições de radiação causadas por solo, pela iluminação, topografia e condições atmosféricas, entre outros.

Desse modo, as técnicas de sensoriamento remoto têm oferecido importantes recursos para o mapeamento de recursos hídricos e do monitoramento das dinâmicas de água de superfície (JI *et al.*, 2009). Entre as diferentes técnicas que vem sendo utilizadas para a delimitação de áreas úmidas e lâminas de água, estão os índices de umidade como o NDWI (*Normalized Difference Water Index*) desenvolvido por MCFEETERS (1996), e o MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*) desenvolvido por XU (2006) para o mapeamento de águas superficiais, realçando a presença das mesmas em imagem obtidas por sensoriamento remoto. A utilização desses índices permite uma melhor visualização das áreas com alto teor de umidade e corpos de água, conforme trabalhos de CARDOSO *et al.* (2009) e FOERSTNOW & MENEZES (2011).

Ressalta-se, entretanto, que existem algumas limitações na utilização de índices espectrais de umidade. Principalmente em imagens de satélite de baixa resolução temporal, onde o tempo de revisita do satélite para a mesma cena é mais espaçado. Isto implica na dificuldade de se obter imagens do momento exato do pico da inundação, o que pode implicar em perda de informações entre o pico da inundação e o instante de captura da imagem.



### 2.3 Estudos na Bacia Hidrográfica do rio Uruguai

A região sul do Brasil, depois da região sudeste, é a mais afetada por desastres naturais. O Rio Grande do Sul enfrenta com frequência dois tipos de desastres que são antagônicos, inundação e estiagem, mas que causam grandes prejuízos à economia, ao meio ambiente e transtornos à população. Uma parcela considerável de municípios do Rio Grande do Sul, que margeiam o Rio Uruguai, sofre com os efeitos diretos e indiretos das inundações que atingem este rio em decorrência da falta de políticas de restrições de uso do solo urbano e ocupação de áreas de risco à inundação (SAUSEN & REIS, 2013).

No “Levantamento dos desastres naturais desencadeados por eventos naturais adversos no Estado do Rio Grande do Sul no período de 1980 a 2005”, RECKZIEGEL (2007), apresentou o registro de 1258 ocorrências de desastres desencadeados por inundações. Os municípios mais atingidos por inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai foram Marcelino Ramos, Iraí, Porto Lucena, Porto Xavier, Alegrete, São Borja, Itaqui e Uruguaiana (CADERNO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO URUGUAI, 2006).

De acordo com RECKZIEGEL (2007) algumas das grandes inundações registradas, no período entre 1980 e 2005, estão associadas à ocorrência do fenômeno El Niño, que ocasiona aumento do volume de precipitação no Estado. Em particular essa influência foi verificada nas inundações dos anos de 1983, 1993 (67 ocorrências), 1997 (91 ocorrências) e 2002 (78 ocorrências). Em 1983, ocorreu um dos eventos de El Niño mais intensos já registrados, coincidindo com uma das maiores inundações já ocorridas no RS e que atingiu o maior número de municípios e com consequências catastróficas para a população.

No trabalho intitulado “Zoneamento de risco à inundação da área urbana de Porto Xavier/RS”, Galvão (2014) destaca que no município de Porto Xavier no período entre 1980 e 2010 foram registrados 18 ocorrências de eventos adversos de inundações, as quais causaram danos e prejuízos para a população. O ano de 1983 foi o que apresentou maior número de ocorrências, concentradas especialmente nos meses de maio e julho. Com a precipitação elevada em um curto espaço de tempo nas cabeceiras de drenagem do rio Uruguai, observou-se que, nesta data, o nível das águas aumentava 20 cm por hora. A inundação de 1983 foi considerada a de maior magnitude e intensidade, pois ocasionou muitos danos e prejuízos a população de Porto Xavier, quando o rio atingiu 17 m acima do seu nível normal.

No “Zoneamento das áreas de risco a inundação da área urbana de Itaqui – RS”, SAUERESSIG (2012) destaca que a inundação de 1983 atingiu a cota fluviométrica de 14,52 m acima do leito normal do rio Uruguai. Entre os anos de 1980 e 2010, esse evento foi o que

atingiu maior extensão territorial e que causou maiores transtornos a cidade. Neste sentido, a autora considerou a inundação de 1983, como o evento delimitador máximo para a inundação, considerando-se que para os últimos 30 anos está cota fluviométrica foi atingida uma única vez. Também é importante destacar que no zoneamento realizado, a área de risco considerada muito alto, ocupou uma área de 1,20 Km<sup>2</sup>, equivalendo a 11,87% da área urbana, se caracterizando pelo elevado grau de perigo e vulnerabilidade. Essas áreas correspondem as áreas ribeirinhas, as quais começam a ser afetadas pelas águas quando o rio atinge cota fluviométrica entre 10 e 11 m.

Righi (2011) realizou o zoneamento de risco a inundação nos municípios de Porto Lucena e São Borja, concluindo que a estação do ano com maior número de registros foi outono, sendo que oito dos dezanove anos que registraram inundações ocorreram em anos cujo fenômeno El Niño estava com intensidade forte (42,1%). Também destaca que as chuvas que causaram inundações foram da classe 2 e 3 (10,1 – 50 mm e 50 – 100 mm respectivamente), ocorrendo por mais de um dia, e em algumas vezes os eventos mais intensos registraram classe 4 (mais de 100 mm).

Mengue et al. (2016) aplicaram o modelo HAND para mapeamento de áreas mais suscetíveis à inundação em uma área próximo à cidade de Itaqui, utilizando como base um evento de inundação ocorrido em 26/10/1997. As simulações pelo modelo HAND e o mapa de referência classificado pela imagem Landsat 5 foram comparadas pela similaridade *fuzzy*, o índice de concordância *Kappa* e exatidão global. O valor de cota de 11,45 m, foi fundamental para ajustar e avaliar a simulação de inundação gerada pelo modelo. Tal valor de cota não foi suficiente para inundar a área urbana do município de Itaqui. As simulações de inundação de 15 m, 19 m e 23 m geradas com o modelo HAND apontaram que as áreas oeste, norte e sul da cidade de Itaqui são mais suscetíveis à inundação.

### 3. METODOLOGIA

Para a execução dos objetivos propostos nesta Tese foi definida a metodologia explicitada no seguinte fluxograma (Figura 5).

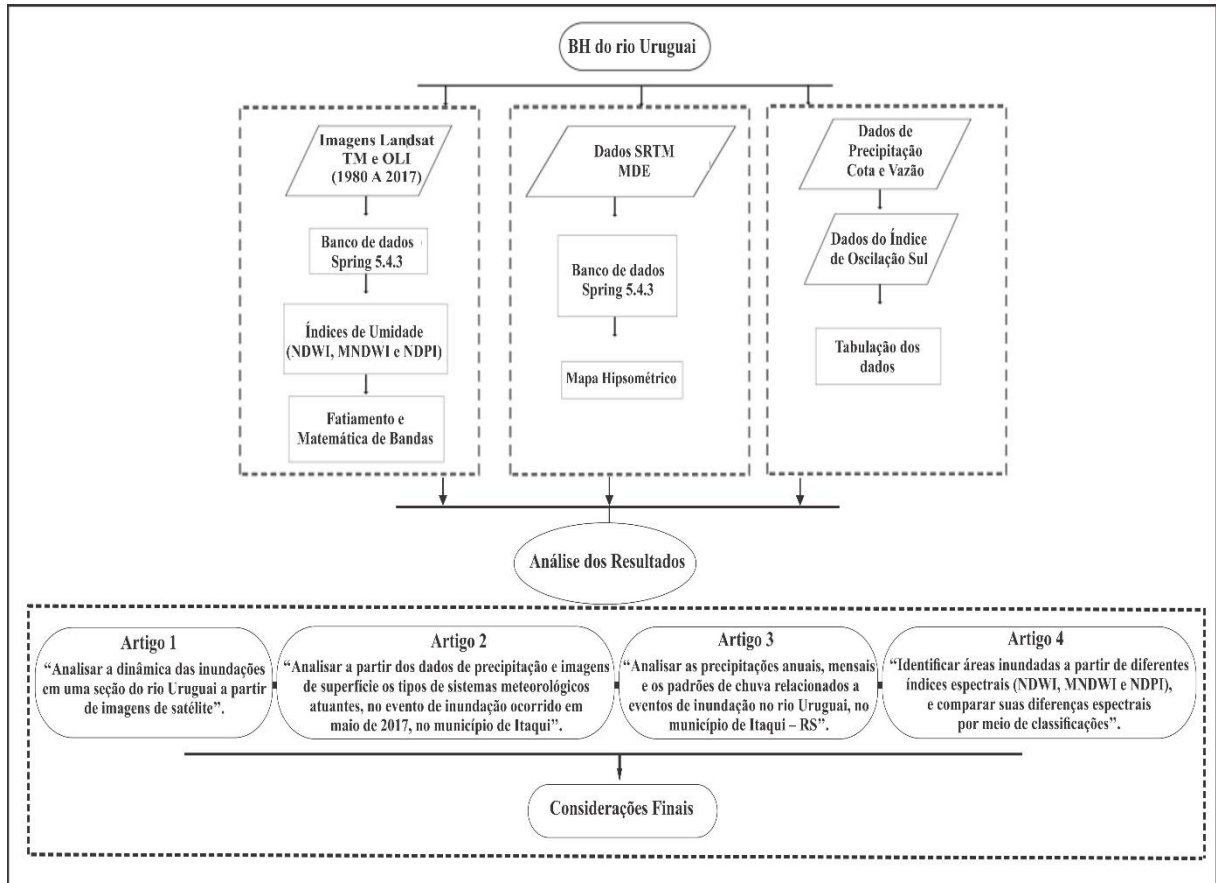


Figura 5 – Fluxograma Metodológico.

#### 3.1 Materiais Utilizados

- Base de dados da Defesa Civil referente aos Decretos de Situação de Emergência e Estado de Calamidade Pública dos municípios que margeiam o rio Uruguai e sofrem com inundações;
- Inventário de inundações com dados coletados da Defesa Civil, dissertações e teses;
- Série temporal do período de 1980 a 2017, de imagens dos satélites Landsat 5/TM, Landsat 7/ETM+ e Landsat 8/OLI, nas órbitas ponto 224/80 e 225/80, disponibilizadas pelo Serviço Geológico Norte Americano (USGS);

- d) Dados de precipitação, cota e vazão entre 1940 e 2018. (Estação pluviométrica e fluviométrica) disponibilizados pela Agência Nacional das Águas – ANA –Hidro Web;
- e) Dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução espacial de 30 m, disponibilizados pela NASA a partir de 2014 para toda a América Latina;
- f) Dados do Índice de Oscilação Sul – ENOS (fase quente), no período de 1980 e 2012, disponibilizado pelo Serviço Meteorológico Nacional - Centro de Previsão do Clima (*National Weather Service – Climate Prediction Center*);
- g) Imagens de superfície do satélite GOES no período compreendido entre 28 e 31 de maio de 2017, disponibilizadas pelo CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

#### 4. REFERÊNCIAS

- ANA - AGENCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. HIDROWEB. Séries Históricas de Estações. Disponível em: <[http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes\\_historicas\\_abas.jsf](http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf)>. Acesso em: 07 nov. 2017.
- BOTELHO, R. G. M. Bacias Hidrográficas Urbanas. In: GUERRA, A. J. T. (Org.). **Geomorfologia Urbana**. Rio de Janeiro: Ed. Bertrand, p 71-115, 2004.
- CADERNO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO URUGUAI. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília – Distrito Federal, 128p, 2006.
- CAMPOS, C.R.J.D.; SILVA, M.V.D. Impacto de sistemas meteorológicos no regime hídrico do Rio Grande do Sul em 2006. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, n. 1, p. 121-136, 2010.
- CAMPOS, C.R.J.D.; EICHHOLZ, C.W. Características físicas dos Sistemas Convectivos de Mesoescala que afetaram o Rio Grande do Sul no período de 2004 a 2008. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 2, p. 331-345, 2011.
- CARDOSO, F. S.; PEREIRA, G.; SILVA, G. B. S; SILVA; F.B.; SHIMABUKURO, Y. E.; MORAES, E. C. Discriminação de áreas alagadas no Pantanal sul-matogrossense a partir de imagens orbitais. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 2, 2009, Corumbá. **Anais...** Embrapa Informática Agropecuária, INPE, v. 1, p. 99-106.
- CEPED/RS-UFRGS. Capacitação em gestão de riscos [recurso eletrônico] / Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. – 2. ed. – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016. 270. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/grid>>. Acesso em: 10 out. 2016.
- CEPED/UFSC – Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012. Volume Rio Grande do Sul. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Florianópolis, 2013.
- CHARLTON, R. **Fundamentals of fluvial geomorphology**. New York: Ed. Routledge, 2008. 234p. ISBN 0-203-37108-9 Master e-book ISBN

CERA, J.C.; FERRAZ, S.E.T. Variações climáticas na precipitação no sul do Brasil no clima presente e futuro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, p. 81–88, 2015.

CRED – Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. Annual Disaster Statistical Review 2015: the numbers and trends. Disponível em: <<http://www.cred.be/publications>>. Acesso em: 25 set. 2016.

CUNHA, S. B. Canais fluviais e a questão ambiental. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Orgs.). **A questão ambiental: diferentes abordagens**. Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Brasil, 2007. p. 219-238

DEFESA CIVIL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Disponível em: <<http://www.defesacivil.rs.gov.br/>>. Acesso em: 20 jul. 2016.

EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database Université Catholique de Louvain, Brussels (Belgium); Disponível em: <[www.emdat.be](http://www.emdat.be)>. Acesso em: 10 nov. 2016.

ENOMOTO, C. F. **Método para elaboração de mapas de inundação: estudo de caso na bacia do rio Palmital, Paraná**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

FOERSTNOW, L. P.; MENEZES, J. D. Aplicabilidade de imagens de satélite utilizando NDWI na determinação da batimetria da Lagoa da Conceição, Florianópolis, SC. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba. **Anais...**São José dos Campos, INPE, v. 1, p. 4397-4404.

GALVÃO, M. I. da SILVA. **Zoneamento de risco à inundação da área urbana de Porto Xavier/RS**. 107f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

HUGGETT, R.J. **Fundamentals of geomorphology**. London: Routledge, Taylor and Francis Group. 2007. 483p. ISBN 0-203-94711-8 Master e-book ISBN.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Banco de dados de imagens. Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais – DAS. Disponível em: <<http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>>. Acesso em: 01 dez. 2018.

INSTITUTO GEOLÓGICO. Secretaria de Infraestrutura e meio Ambiente do Estado de São Paulo. Disponível em: <<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutogeologico/#>>. Acesso em: 15 out. 2016.

ISLAM, M. M.; SADO, K. (2000b). **“Flood Hazard Assessment for the Construction of Flood Hazard Map and Land Development Priority Map Using NOAA/AVHRR Data and GIS - A Case Study in Bangladesh**. GISDEVELOPMENT. Disponível em: <[http://www.gisdevelopment.net/application/natural\\_hazards/floods/floods002.ht](http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/floods/floods002.ht)>. Acesso em: 04 set. 2016.

JI, L.; ZHANG, L.; WYLIE, B. Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.75, n.11, p.1307-1317, 2009.

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.; RUDORFF, F. de M. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba, PR: Ed. Organic Trading, 109 p, 2006.

LI, W.; DU, Z.; LING, F.; ZHOU, D.; WANG, H.; GUI, Y.; SUN, B.; ZHANG, X. A comparison of land surface water mapping using the Normalized Difference Water Index from TM, ETM plus and ALI. **Remote Sensing**, v. 5, n. 11. p. 5530-5549, 2013.

MARINHO, R. R.; PARADELLA, W. R.; RENNÓ, C. D.; OLIVEIRA, C. G. Aplicação de imagens SAR orbitais em desastres naturais: mapeamento das inundações de 2008 no Vale do Itajaí, SC. **Revista Brasileira de Cartografia**. n. 64, n. 3. p. 317-330, 2012.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.

MENGUE, V.P.; SCOTTÁ, F.C.; SILVA, T.S.; FARINA, F. Utilização do Modelo HAND para mapeamento das áreas mais suscetíveis à inundação no Rio Uruguai. **Pesquisas em Geociências**, v. 43, n. 1, p. 41-53, 2016.

MONTEIRO, C. A. F. **A frente polar atlântica e as chuvas de inverno na fachada sul – oriental do Brasil**. São Paulo: IGEO-USP. 68p, 1968.

MUÑOZ, V. A. **Mapeamento de planícies de inundação a partir de dados SRTM: contribuição para análise da exposição a inundação na bacia do rio Itajaí**. 112 p. Tese de Doutorado - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2014.

NAMIKAWA, L. M. Imagens Landsat 8 para o monitoramento de volume de água em reservatórios: estudo de caso nas barragens Jaguari e Jacareí dos sistema Cantareira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17, 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos, INPE, v.1, p. 4828-4835.

NATIONAL WEATHER SERVICE – Climate Prediction Center. Historical El Niño/La Niña. Disponível em: <[http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)>. Acesso em: 30 set. 2016.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 421p, 1989.

OGASSAWARA, J. F.; GASS, S. L. B. Análise morfométrica dos afluentes principais da bacia hidrográfica do rio Uruguai e sua influência nas inundações na cidade de Itaquí, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Geomática**. v. 6, n. 3, p. 222-240, 2018.

OLIVEIRA, G. G.; SALDANHA, D. L.; GUASSELLI, L. A. Espacialização e análise das inundações na bacia hidrográfica do rio Caí/RS. **Geociências**. UNESP, São Paulo, v. 29, n. 3, p. 413-427, 2010.

PISTRIKA, A.; TSAKIRIS, G. **Flood Risk Assessment: A Methodological Framework**. Water Resources Management: New Approaches and Technologies. European Water Resources Association, Chania, Crete-Greece. p. 14–16, 2007.

RECKZIEGEL, B. W. **Levantamento dos Desastres desencadeados por Eventos Naturais Adversos no Estado do Rio Grande do Sul no Período de 1980 a 2005**. 261f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

RIGHI, E.; ROBAINA, L. E. S. Enchentes do Rio Uruguai no Rio Grande do Sul entre 1980 e 2005: uma análise geográfica. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 22, n. 1, p. 35-54, abr. 2010.

RIGHI, E. **Risco à inundação em médio curso do rio Uruguai: um estudo de caso nos municípios de Porto Lucena e São Borja**. 222f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RIGHI, E. Inundações ao longo do rio Uruguai: o caso dos municípios de Porto Lucena e São Borja. In: **Desastres Naturais do Rio Grande do Sul**. 1 ed. Santa Maria: editora UFSM, p. 253-280, 2013.

RIGHI, E. **Metodologia para zoneamento de risco a inundações graduais**. 196f. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ROSSATO, M.S. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia**. 253f. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SANYAL, J. & LU, X.X. Application of remote sensing in flood management with special reference to monsoon Asia: A Review. **Natural Hazards**, v. 33, p. 283-301, 2004.

SARTORI, M. da G.B. As variações pluviométricas e o regime das chuvas na região central do Rio Grande do Sul, Brasil. **Boletim de Geografia Teorética**, Rio Claro, v. 23, n. 45-46, p. 70-84, 1993a.

SARTORI, M. da G. B. A circulação Atmosférica regional e os principais tipos de sucessão do tempo no inverno do Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 15, p. 69-93, 1993b.

SARTORI, M. da G. B. A. A dinâmica do Clima do Rio Grande do Sul: Indução empírica e conhecimento científico. **Terra Livre**, São Paulo, v. 1, n. 20, p. 27-49, 2003.

SAUERESSIG, S.R. **Zoneamento das áreas de risco a inundação da área urbana de Itaqui – RS**. 2012, 101f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

SAUSEN, T.M.; REIS, J.T. Levantamento e avaliação das inundações ocorridas no Rio Grande do Sul. In: GUASSELLI, L. A., OLIVEIRA, G. G.; ALVES, R. C. M. (Orgs.). Eventos extremos no Rio Grande do Sul: inundações e movimentos de massa. Porto Alegre: Ed. Evangraf, p. 25-44, 2013.

SERPICO, S. B. ; DELLEPIANE, S. ; BONI, G. ; MOSER, G.; ANGIATI, E.; RUDARI, R. Information extraction from remote sensing images for flood monitoring and damage evaluation. **Proc. IEEE**, v. 100, n. 10, p. 2946–2970, 2012.

SHI-RONG, C.; SHI-XIN, W.; QIN, Z.; CHUN, C. Flood Loss Evaluation System Using Remote Sensing and GIS. Institute of Remote Sensing Applications, CAS, 0-7803-7929-2 (C). IEEE p. 2512-2513, 2013.

SOUZA, D. O de; LINO, J. F. de L; BERNARDES, T; SATO, E. N; FIRMINO, M. B. M. Padrões meteorológicos e morfológicos associados à eventos de inundação do rio Uruguai: estudo de caso para o município de Uruguaiana-RS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 4, p. 621-633, 2017.

STRECK, E. V.; et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2.ed. rev. e ampl. Porto Alegre: Emater/RS, 2008.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. do (Org). **Desastres Naturais: Conhecer para prevenir**. Instituto Geológico, São Paulo. 2009. Disponível em: <<http://igeologico.sp.gov.br/downloads/livros/DesastresNaturais.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2016.

TOWNSEND, P. A.; WALSH, S. J. Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing. **Geomorphology**, v. 21, p. 295-312, 1998.

TUCCI, C. E.; LOPES, M. O. S. Zoneamento de áreas de inundação: Rio Uruguai. **Revista Brasileira de Engenharia, ABRH**, v. 3, n. 1, p. 19 – 44, 1985.

TUCCI, C. E. M. Inundações e drenagem urbana. In: TUCCI, C. E. M.; BERTONI, C. (Orgs.). **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, p. 45-129, 2003.

TUCCI, C. E. M. **Gestão das inundações urbanas**. Ministério das Cidades – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, 201 p, 2005.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Landsat Project Description. Disponível em: <[http://landsat.usgs.gov/about\\_project\\_descriptions.php](http://landsat.usgs.gov/about_project_descriptions.php)> Acesso em jul. 2014.

XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Remote Sensing**. v. 27, n 14, 2006.

WANG, Y.; COLBY, J. D.; MULCAHY, K. A. An efficient method for mapping flood extent in a coastal floodplain using Landsat TM and DEM data. **International Journal of Remote Sensing**. v. 23, n. 18, p. 3681-3696, 2002



**ARTIGO 1: MAPEAMENTO DAS INUNDAÇÕES A PARTIR DE NDWI NO MUNICÍPIO DE ITAQUI, RIO URUGUAI – RS**

Autores do artigo ID 13679 MAPEAMENTO DAS INUNDAÇÕES A PARTIR DE NDWI NO MUNICÍPIO DE ITAQUI, RIO URUGUAI – RS, submetido à Revista Geociências.

O artigo acima indicado está em edição, programado para compor parte do número 2 do Volume 38.

Atenciosamente,

Norberto Morales  
Revista Geociências  
Editor

## MAPEAMENTO DAS INUNDAÇÕES A PARTIR DE NDWI NO MUNICÍPIO DE ITAQUI, RIO URUGUAI – RS

### FLOOD MAPPING IN ITAQUI CITY (URUGUAY RIVER, RIO GRANDE DO SUL) BASED ON THE NORMALIZED DIFFERENCE WATER INDEX (NDWI)

- Introdução
- Área de estudo
- Materiais e Métodos
  - Definição do evento de inundação e aquisição dos dados
  - Processamento das imagens
- Resultados e Discussões
  - Relação entre a precipitação e as manchas de inundações
  - Espacialização a partir do Índice de diferença normalizada da água - NDWI
- Considerações Finais
- Referências

**Resumo:** No Rio Grande do Sul são recorrentes eventos de inundação. Na bacia do rio Uruguai vários municípios decretaram Situação de Emergência. Esse trabalho objetiva mapear as inundações numa seção do rio Uruguai, próxima ao rio Ibicuí, a partir de imagens de satélite. Foram utilizados dados de: precipitação; cota do rio; imagens Landsat: 03/08/1987, 18/11/1997, 12/10/2001 e 22/01/10. No mapeamento utilizou-se o infravermelho médio e o Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI). A análise dos eventos mostra que o nível do rio Uruguai extrapola a planície de inundação, mas em níveis diferentes. O evento mais expressivo, foi novembro de 1997 sob influência do El Niño nos totais pluviométricos. Em chuvas concentradas em setores da bacia, a elevação do nível do rio é gradativa. As chuvas que elevam o nível do rio, na seção analisada, são regionais, oriundas do norte do Estado e sul de Santa Catarina. A banda do infravermelho próximo e o NDWI, foram eficientes ao identificar áreas inundadas. A partir dos dados de precipitação e cota observou-se que quando o nível do rio está em 10,7m a inundação atinge 27,33% da área, o nível normal é 6,59m e atinge 8,91% da área.

**Palavras-chave:** NDWI, planície de inundação, pluviometria, El Niño.

**Abstract:** In Rio Grande do Sul, flood events are recurrent. In Uruguay River basin, several cities decreed Emergency Situation. The present work aims to map floods in Uruguay River section near Ibicuí River, from satellite images. Data on: rainfalls; river quota and Landsat images (1987/08/03, 1997/11/18, 2001/10/12 and 2010/01/22) were used. The Medium Wavelength Infrared (MWI) and the Normalized Difference Water Index (NDWI) were also used in the mapping. The analysis of the event shows that Uruguay River's level extrapolates floodplain, but in different degrees. The most significant event was in November 1997, by the influence of El Niño on the rainfall totals. In rainfalls that are concentrated on basin sections, the rise of the river's level is gradual. The rains which raise the river's level, in the analyzed section, are regional, originating from the North of the state and the South of Santa Catarina. The Near Infrared band and the NDWI were efficient to identify flooding areas. From the rainfall and quota data it was observed that when the river is in 10,7m, the flood reaches 27,33% of the area, and the normal level is 6,59m, reaching 8,91% of the area.

**Key-words:** NDWI, floodplain, pluviometry, El Niño.

## 1 Introdução

De acordo com o *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* (CRED), desde 1995, as inundações foram responsáveis por 47% de todos os desastres naturais, afetando 2,3 bilhões de pessoas. O número de inundações por ano subiu para uma média de 171, no período de 2005-2014, diferente do que ocorria na década anterior com uma média anual de 127. Na América do Sul, o CRED ressalta que entre 1995 e 2004, em média 560 mil pessoas foram afetadas pelas inundações a cada ano, e entre 2005-2014 esse número aumentou para 2,2 milhões de pessoas.

As inundações não acarretam somente perdas de vidas humanas, mas também danos materiais nas áreas urbanas e na área rural o setor agrícola acaba sendo prejudicado (Braz *et al.*, 2017). As inundações podem prejudicar solos férteis para a agricultura na área rural decorrente da erosão dos solos e pela deposição de sedimentos (ALSDORF *et al.*, 2007; MENGUE *et al.*, 2016).

A ocorrência de eventos de inundação tem aumentado em diversas partes do Mundo e do Brasil, em decorrência de impactos antrópicos, pela ação da própria natureza ou de mudanças climáticas, e assim afetando a intensidade das chuvas e seus escoamentos (GRIMM, 2011; MIN *et al.*, 2011).

De acordo com os dados do Atlas de Desastres Naturais (CEPED, 2012), nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, no período de 1991 a 2010, os eventos de inundações e enxurradas apresentaram elevado número de ocorrências, sendo superados apenas pela estiagem e a seca (CEPED, 2012). As inundações constituem-se em fenômenos naturais recorrentes, e por consequência conhecidos pela população, em especial, àquelas que residem próximas as planícies de inundação (RIGHI, 2011)

Um dos condicionantes naturais às inundações é o regime de precipitação, que controla a quantidade de água que entra no sistema fluvial; o tipo de solo, que determina a capacidade de retenção e transporte da água, a disponibilidade de nutrientes assim como o tipo e a distribuição da vegetação; a geologia, que controla a configuração da rede de drenagem, a sedimentação e o desenvolvimento e distribuição do solo; e o relevo, que reflete o tipo e distribuição espacial de quase todas as outras condicionantes, exceto a precipitação (TOMINAGA *et al.*, 2009).

Os rios drenam em suas cabeceiras áreas com grande declividade e por consequência elevada velocidade em seu escoamento, e em alguns casos as variações de nível aumentam em poucas horas. As áreas mais propícias à ocupação são as planas, exatamente as que apresentam

alta suscetibilidade à inundação. Sendo assim, a planície de inundação de um rio cresce significativamente nos seus cursos médio e baixo, justamente onde a declividade reduz e aumenta a incidência de áreas planas (TUCCI *et al.*, 2013).

As inundações consistem no aumento lento e previsível dos níveis de água em cursos hídricos, gerando um transbordamento que se mantém em situação de cheia durante algum tempo, e a seguir escoar gradualmente. Esse tipo de evento natural é ocasionado, geralmente, por chuvas prolongadas em áreas de planície (CEPED, 2012) e pode gerar desastres se essas áreas estiverem ocupadas.

Em decorrência do grande número de eventos que acometem o Estado e causam transtornos à população, muitas pesquisas vêm sendo realizadas sobre o tema, em destaque podemos citar os movimentos de massa e as inundações. Em meio aos principais estudos científicos de levantamento de inundações nas bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul, destacam-se os trabalhos realizados por RECKZIEGEL (2007), WOLLMANN (2013), RIGHI (2011, 2016), OLIVEIRA *et al.* (2013), MENEZES & SCCOTI (2013), SAUSEN & REIS (2013), e MENGUE *et al.* (2016).

A variabilidade interanual da precipitação na região sul do país está diretamente relacionada a fenômenos de circulação atmosférica, tanto em escala regional quanto global. O Rio Grande do Sul situa-se em uma região latitudinal favorável à atuação de diversos fenômenos meteorológicos que afetam o tempo e o clima do estado como, por exemplo, as frentes frias e o fenômeno El Niño (CERA & FERRAZ, 2015). A diversidade de fenômenos que atuam na variação da precipitação do RS, também influencia na intensidade, na distribuição e frequência da ocorrência de eventos adversos (CAMPOS & SILVA, 2010; CAMPOS & EICHHOLZ, 2011).

Entre as técnicas utilizadas para mapear a planície de inundação está o Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI – *Normalized Difference Water Index*), desenvolvido por McFeeters (1996), utilizado para a delimitação de áreas inundáveis. Este índice permite uma melhor visualização das áreas com alto teor de umidade, e é utilizado para delinear feições de umidade a partir de imagens de satélite (FOERSTNOW & MENEZES, 2011). Segundo Gao (1996), o NDWI varia quase linearmente com a espessura da lâmina da água. Esse índice tem se destacado no monitoramento do comportamento hídrico, Brubacher & Guasselli (2013) mapearam áreas inundáveis em bairros que são afetados por inundações utilizando o NDWI e encontraram resultados coerentes.

Desta forma, no contexto das recentes ocorrências de inundações no Estado do Rio Grande do Sul e na carência de trabalhos visando o mapeamento e a análise destas, o objetivo

deste trabalho é analisar a dinâmica das inundações em uma seção do rio Uruguai a partir de imagens de satélite.

### 1.1 Área de estudo

O rio Uruguai tem sua denominação no início da confluência dos rios Pelotas e Canoas. Nesse trecho, o rio assume a direção Leste-Oeste, dividindo os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. A área total drenada pelo rio, que se configura na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai (conforme Resolução CNRH n.º 30/2003), é de cerca de 385.000 km<sup>2</sup>, destes, 45% estão situados em território brasileiro, sendo que 73% estão no Rio Grande do Sul e 27% em Santa Catarina. Seus principais tributários estão situados no setor leste da bacia. Apesar de sua pequena expressão territorial, as atividades agroindustriais e o potencial hidrelétrico, à colocam em lugar de destaque no cenário nacional (CADERNO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO URUGUAI, 2006).

A área de estudo corresponde a uma seção do rio Uruguai e afluentes (com destaque para o rio Ibicuí), Figura 6. Essa seção está situada na fronteira entre a Argentina e o Brasil, com a cidade de Itaqui ao norte, localizada no território brasileiro, na margem esquerda do rio Uruguai no Estado do Rio Grande do Sul. Este trecho do rio foi escolhido por ser considerado de alta suscetibilidade de inundação em frequência e impacto (ANA, 2016).

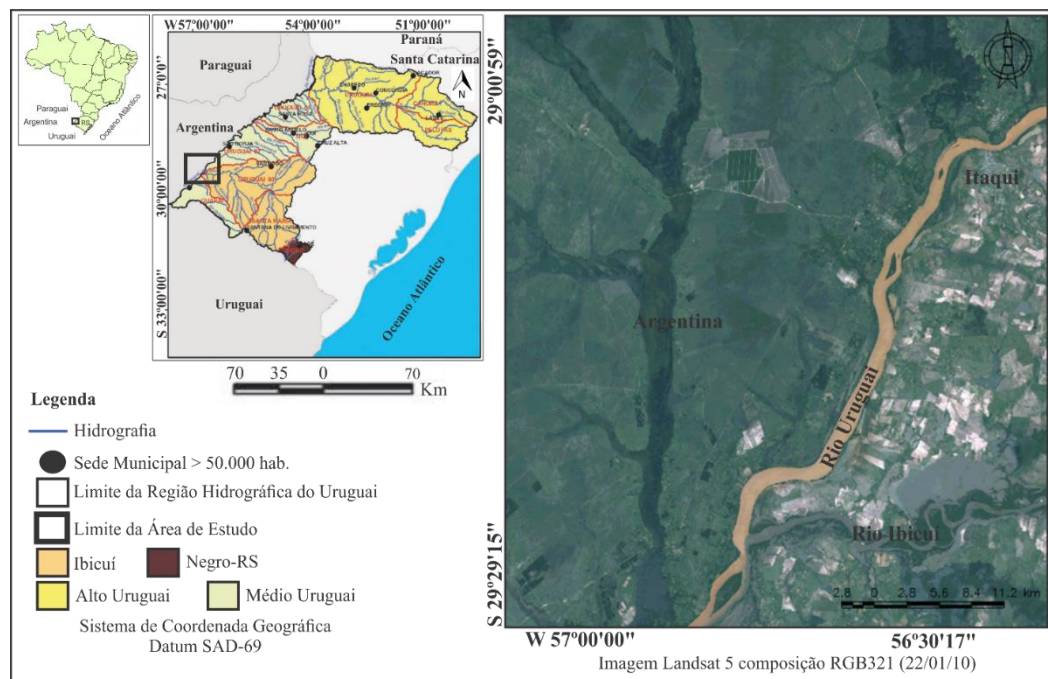


Figura 6 - Mapa de localização da área de estudo. Fonte: Adaptado de Righi (2011).

Estudos sobre desastres relacionados à inundações e enxurradas no rio Uruguai indicam mais de 38 ocorrências registradas por município, entre 1980 e 2005. Além disso muitas dessas cidades ribeirinhas registraram perdas de centenas de moradias, e destruição de lavouras, estradas e pontes (RECKZIEGEL, 2007; RIGHI, 2011; SOUZA *et al.*, 2017).

No setor sul as altitudes na bacia hidrográfica do rio Uruguai variam entre 33 e 500m e no setor norte entre 500 e 1350m (RIGHI, 2011). No trecho alto do rio Uruguai, a montante o relevo compreende declividades altas, com cotas que variam de 160 a 1600m (CADERNO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO URUGUAI, 2006). A montante, o rio Uruguai tem alto potencial hidrelétrico, devido ao seu intenso gradiente de relevo.

No trecho médio e inferior, as inundações estão associadas às precipitações de longa duração e grande abrangência espacial. As áreas rurais sofrem impacto maior no trecho a jusante da bacia, onde a topografia é mais suave e a planície de inundação é mais extensa, principalmente na fronteira oeste agrícola (CADERNO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO URUGUAI, 2006).

Sausen & Reis (2013) mapearam os municípios do Rio Grande do Sul que decretaram Situação de Emergência, em decorrência de inundações e enxurradas, no período de 1980 a 2012. Verificaram que a maioria dos municípios localizados próximos ao rio Uruguai, apresentam pelo menos um Decreto de Situação de Emergência. E que nos meses de inverno e outono apresenta maior registro de decretos de inundação, enquanto na primavera há mais registros para as enxurradas.

A seção do rio Uruguai analisada está inserida na sub-bacia hidrográfica do rio Ibicuí, que possui uma área de 35.495,38 km<sup>2</sup> e população estimada em 394.030 habitantes (SEMA, 2016). De acordo com a classificação de IBGE (1986), a área localiza-se na unidade geomorfológica do Planalto de Campanha, que apresenta relevo ondulado, com a altitude decaindo de forma gradativa em direção à calha do rio Uruguai (ROBAINA *et al.*, 2010).

Conforme a tipologia climática descrita por Rossato (2011) está inserida no clima Subtropical II e Subtropical III. O primeiro com maior influência dos sistemas polares e tropicais continentais, com influência do relevo (Depressão Central), a continentalidade e a maritimidade, sendo que os sistemas frontais são responsáveis pela maior parte das precipitações que variam entre 1500 e 1700 mm anuais. O segundo com menor influência dos sistemas polares e maior atuação dos sistemas tropicais marítimos e continentais, na primavera e verão, em associação com o efeito do relevo (Planalto Basáltico e vale do rio Uruguai) e da continentalidade e precipitações que variam entre 1700 e 1800 mm anuais (ROSSATO, 2011).

## 2 Materiais e Métodos

### 2.1 Definição dos eventos de inundação e aquisição dos dados

A escolha das datas dos eventos de inundação foi baseada no registro de ocorrência de inundações nos municípios ao longo do rio Uruguai no período entre 1980 e 2010 de Reckziegel (2007) e Menezes & Scooti (2013). Com base nos registros para a cidade de Itaquí, buscou-se imagens de satélite correspondentes aos períodos dos eventos de inundações. Os inventários de ocorrência de inundações foram obtidos dos registros da Defesa Civil do Rio Grande do Sul. Os dados legais dizem respeito aos Decretos de Situação de Emergência e de estado de Calamidade Pública, obtidos nas publicações do Diário Oficial do Estado.

Para averiguar se os eventos de inundação têm relação com o fenômeno atmosférico El Niño, foram obtidos dados do Índice de Oscilação Sul, disponibilizados no site do Serviço Meteorológico Nacional - Centro de Previsão do Clima (National Weather Service – Climate Prediction Center). Após o levantamento dos eventos de inundações e dos anos de influência do fenômeno El Niño, foram selecionadas as imagens com registro de inundações na planície do rio Uruguai.

Para comparar os eventos de inundação foram selecionadas três datas, uma considerando inundação com ocorrência de El Niño, uma com inundação local e outra considerada como um ano neutro, conforme a série histórica das anomalias.

Os dados de precipitação foram obtidos com onze dias antecedentes a data da passagem das imagens selecionadas. A Figura 7 apresenta a distribuição espacial das 10 estações pluviométricas selecionadas para abranger a dinâmica das chuvas que causam as inundações no trecho selecionado, e uma estação pluviométrica, localizada no município de Itaquí. Os dados são disponibilizados na página virtual da ANA, no site do Sistema de Informações Hidrológicas - Hidro Web, com acesso as séries históricas das estações pluviométricas. Assim, como também são disponibilizados *shapefiles* com dados de bacias hidrográficas contendo dados das estações pluviométricas, pluviométricas, hidrografia, entre outros. A partir do *shapefile* da bacia hidrográfica do Uruguai foi possível organizar espacialmente as estações selecionadas.

Em decorrência da rede de monitoramento meteorológico não cobrir completamente o Rio Grande do Sul, considerou-se 5 estações do Estado de Santa Catarina e 5 do Rio Grande do Sul. Servindo de apoio para validar os dados referentes as precipitações que geram as inundações no Rio Grande do Sul.

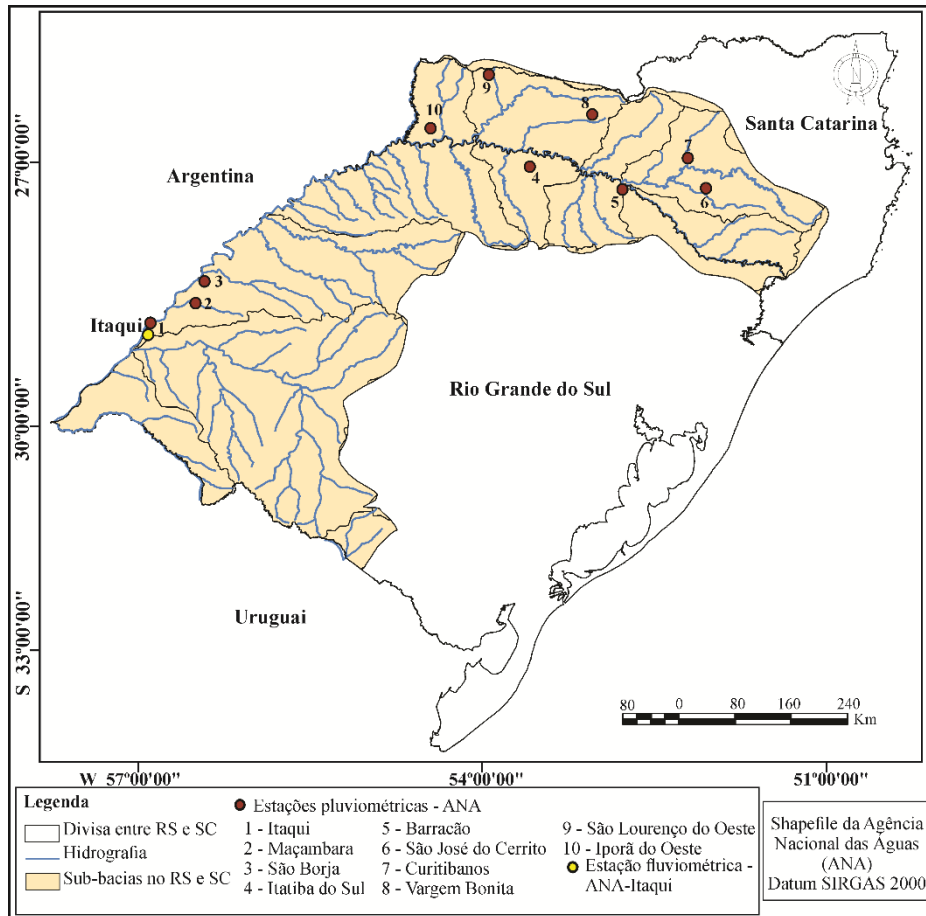


Figura 7 - Distribuição espacial das estações pluviométricas e fluviométrica.

## 2.2 Processamento das imagens

As imagens foram obtidas no catálogo de imagens do *EarthExplorer* no site do Serviço Geológico Norte Americano (U.S. Geological Survey - USGS), do satélite Landsat 5 TM, órbita/ponto 225/80 nas datas: 08/06/1990, 18/11/1997, 12/10/2001 e 22/01/2010. A data de janeiro de 2010 foi selecionada para mostrar as diferenças na planície de inundação em uma situação de normalidade e quando ocorrem as inundações, evidenciando assim, a sua área de inundação.

Foi criado um banco de dados geográfico no software Spring 5.4.3, no qual as imagens foram georreferenciadas a partir de uma imagem Landsat OLI 8 da mesma órbita ponto, pois as imagens do OLI 8 são disponibilizadas já georreferenciadas, servindo como base para o georreferenciamento. Optou-se por trabalhar com a banda 5, infravermelho médio. As imagens adquiridas foram processadas sob demanda no site da ESPA-USGS (<https://espa.cr.usgs.gov/login/?next=/>), com correção atmosférica e convertidas para reflectância de superfície (produto *Landsat Surface Reflectance*).



Para a espacialização das áreas inundadas foram utilizadas as bandas 2, 4 e 5. A banda 5 foi utilizada para mapear as áreas de inundação, e as bandas 2 e 4 para gerar o índice NDWI para delinear feições na água presentes no ambiente e realçar a presença das mesmas na imagem digital obtida por sensoriamento remoto. Essa razão realça as feições mais úmidas enquanto elimina a influência do solo e da vegetação terrestre. O NDWI é obtido pela razão entre a banda do infravermelho próximo e do verde, a Equação 01 descreve a relação.

$$NDWI = \frac{(\rho_{green} - \rho_{IVP})}{\rho_{green} + \rho_{IVP}} \quad (01)$$

Em que: o  $\rho_{green}$  é a reflectância na banda do verde; o  $\rho_{IVP}$  é a reflectância na banda do infravermelho próximo.

Esse índice é calculado pixel à pixel gerando valores de alta intensidade para regiões úmidas e menos intensos para as outras regiões. Essa razão realça as regiões mais úmidas pois maximiza a reflectância dessas feições na banda do verde visível, minimiza a baixa reflectância da água na banda do infravermelho próximo enquanto utiliza-se das altas reflectâncias da vegetação e solo, nessa mesma banda (FOERSTNOW & MENEZES, 2011). A partir das imagens de NDWI foi realizada uma classificação por fatiamento para quantificar as áreas úmidas em cada data analisada.

### 3 Resultados e Discussões

#### 3.1 Relação entre a precipitação e as manchas de inundações

Os dados de precipitação referentes a inundação de 03/08/1987, Tabela 1, mostram que os maiores acumulados de chuva ocorreram nas estações localizadas no Rio Grande do Sul (1 a 5), enquanto nas estações do Estado Catarinense o volume acumulado nos dias antecedentes a data da imagem não chega a 50mm. Destaca-se, a partir do volume acumulado, que as chuvas que contribuíram para esse evento estão situadas no setor oeste e norte do Rio Grande do Sul com participação das chuvas da Argentina.

Tabela 1 - Precipitação antecedente à inundação da imagem de 03/08/1987.

Estações/Município/UF	Julho									Agosto			Média (mm)
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	
1. Itaqui	0,0	13,0	0,0	20,8	0,0	89,4	111,2	27,0	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>23,85</b>
2. Maçambará	0,0	33,1	0,0	15,5	0,0	145,9	68,7	9,3	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>24,77</b>
3. São Borja	0,0	11,9	0,0	12,5	1,3	47,4	122,8	29,4	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>20,5</b>
4. Itatiba do Sul	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	28,3	1,8	0,0	0,0	0,0	<b>3,04</b>
5. Barracão	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,5	10,2	4,8	0,0	0,0	0,0	<b>2,14</b>
6. São José do Cerrito	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	13,6	1,8	7,4	3,2	0,0	0,0	0,0	<b>2,47</b>
7. Curitibaanos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,6	1,9	7,2	0,0	0,0	0,0	<b>1,60</b>
8. Vargem Bonita	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	18,2	13,0	0,0	0,0	0,0	<b>3,05</b>
9. São Lourenço do Oeste	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	25,0	7,0	0,0	0,0	0,0	<b>3,09</b>
10. Iporã do Oeste	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	11,8	8,6	13,8	7,6	0,0	0,0	0,0	<b>4,11</b>

Fonte: ANA (2017).

Na inundação de agosto de 1987, Figura 8 A, observa-se que a inundação ultrapassou o leito normal do rio ocupando parte da planície de inundação do rio Uruguai. O município de Itaqui localizado no setor nordeste da Figura 8 A, foi atingido por esta inundação. A área urbana ocupa as margens inundáveis do rio, na sua planície de inundação, deixando vulnerável a população urbana a esses eventos.

Segundo Saueressig (2012) a ocorrência de inundações no município de Itaqui é expressiva entre os meses de abril e julho e, muito significativa, entre os meses de outubro e novembro. Neste caso, a inundação de 1987 pode ser considerada expressiva de acordo com a autora, pois conforme os dados da Tabela 1, os maiores valores acumulados de chuva são em julho, 11 dias antecedentes a imagem de 03 de agosto. Desta forma, embora a data da imagem seja de início de agosto a chuva que configurou a inundação foi decorrente do mês de julho, demonstrando que a ocorrência de inundações é expressiva entre abril e julho.

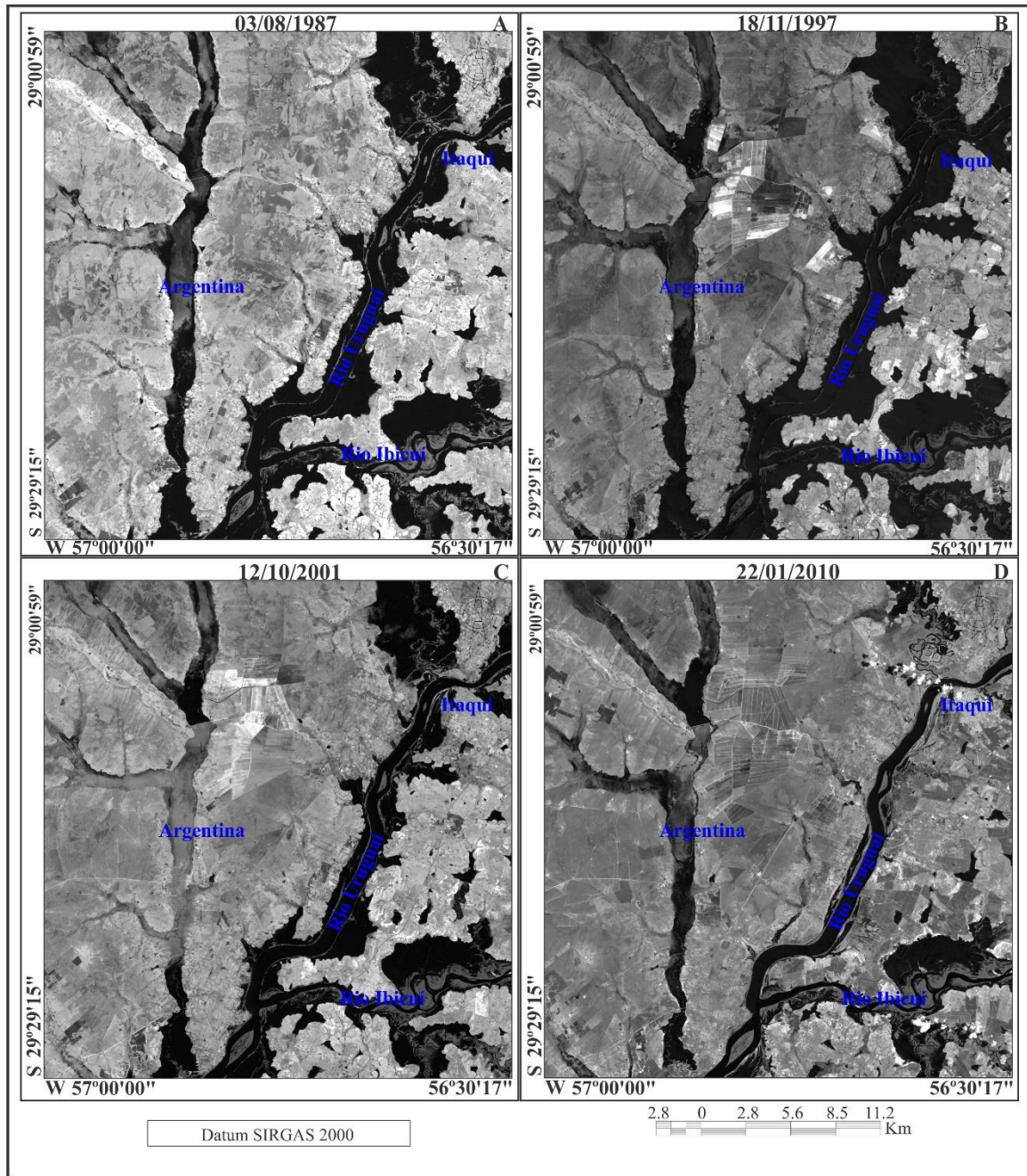


Figura 8 - Imagens Landsat 5 TM, banda 5, com eventos de inundação: 03/08/87(A), 18/11/97 (B), 12/10/01(C) e sem eventos de inundação 22/01/10 (D).

Nas datas analisadas, Figura 8, observa-se que no setor leste da bacia hidrográfica, especialmente no trecho que ocorre o encontro do rio Uruguai com o rio Ibicuí ocorre represamento das águas do rio nesse setor, que é um dos seus afluentes. Neste trecho situado ao sul-sudeste, existe alguns açudes próximos ao rio Ibicuí, o que facilita para que a água represe neste setor.

As chuvas que ocasionaram a inundação de 1987 estão concentradas principalmente no RS, pois os maiores volumes acumulados encontrados são de estações localizados no Estado.

As áreas localizadas no setor oeste da planície de inundação (Argentina) apresentam áreas com umidade, indicando que ocorreram chuvas no País vizinho, que podem ter contribuído para o extravasamento da planície de inundação. O volume acumulado de chuva foi de grande impacto na elevação do nível do rio Uruguai, que em vários trechos invadiu consideravelmente a planície de inundação.

Os dados referentes a inundação de novembro de 1997 (Tabela 2), revelam que os acumulados da distribuição das chuvas foram mais concentrados nos municípios que fazem fronteira com Santa Catarina. De acordo com Nery *et al.* (2006) a média do número de dias de precipitação em seus valores anuais sofreu alterações positivas durante o evento El Niño 1997/1998, especialmente à montante da bacia.

Tabela 2 - Precipitação antecedente a inundação da imagem de 18/11/1997.

Estações/Município/UF	Novembro												Média (mm)
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1. Itaqui	0,0	0,0	18,3	27,8	48,3	22,0	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>9,84</b>
2. Maçambara	0,0	0,0	0,0	6,4	26,6	53,0	15,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>8,45</b>
3. São Borja	0,0	0,0	8,0	34,0	51,0	15,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>9,03</b>
4. Itatiba do Sul	5,8	0,0	0,0	1,8	3,1	10,4	40,7	11,1	0,0	0,0	0,0	0,2	<b>6,09</b>
5. Barracão	0,0	0,0	0,0	0,6	5,0	22,1	45,5	15,8	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>7,41</b>
6. São José do Cerrito	0,0	0,0	0,0	0,4	52,3	12,3	18,2	18,6	0,0	0,0	2,6	0,0	<b>8,70</b>
7. Curitibaanos	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,6	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>8,13</b>
8. Vargem Bonita	2,3	0,0	0,0	2,3	18,0	28,1	51,6	16,0	0,0	0,0	0,5	1,1	<b>10,00</b>
9. São Lourenço do Oeste	0,3	0,0	0,0	1,7	5,2	0,0	72,0	3,0	0,0	0,0	7,0	0,0	<b>7,43</b>
10. Iporã do Oeste	33,4	0,0	0,0	4,2	3,8	0,0	94,4	6,8	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>11,88</b>

Fonte: ANA (2017).

De um modo geral os volumes acumulados de chuva são elevados nas 10 estações analisadas, ou seja, foi um período em que a chuva ocorreu de forma distribuída na bacia como um todo, fazendo com que o nível do rio se elevasse de forma gradativa. No setor oeste da imagem, na Argentina (Figura 8 B), se observa que alguns cursos d'água apresentam maior área inundada. Pode-se inferir que a precipitação na Argentina no mesmo período pode ter colaborado juntamente com a chuva regional na bacia para esse evento de inundação. Importante destacar que os resultados obtidos por Mengue *et al.* (2016) ao mapear a inundação de 1997 a partir do modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) foram similares aos de Saueressig (2012) na definição das áreas mais suscetíveis à inundação.

Os dados de precipitação antecedentes a inundação de outubro de 2001 (Tabela 3), mostram que os principais acumulados de precipitação ocorreram nos municípios do norte do

RS e em Santa Catarina, ou seja, os principais acumulados de chuva procedem do alto curso do rio Uruguai. Na Figura 8 C referente ao ano de 2001, a mancha de inundação é menor que a de 1997, mas os dados referentes ao volume de precipitação total acumulado de 2001 são maiores. O índice de umidade permitiu observar essas diferenças entre volume acumulado e a mancha de inundação em si, pois embora a inundação de 2001 apresente maiores volumes acumulados que 1997, através do NDWI foi possível identificar e quantificar as áreas inundadas, mesmo que o nível da água tenha diminuído devido ao excesso de umidade do solo.

Tabela 3 - Precipitação antecedente a inundação da imagem de 12/10/2001.

Estações/Município/UF	Outubro												Média (mm)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. Itaqui	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	6,7	37,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>3,82</b>
2. Maçambará	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	38,8	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>3,62</b>
3. São Borja	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	31,6	35,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	<b>5,96</b>
4. Itatiba do Sul	23,0	0,0	12,7	0,4	0,0	0,0	28,4	67,2	23,1	0,0	0,0	0,0	<b>12,90</b>
5. Barracão	144,3	6,3	1,3	1,0	0,0	0,0	0,0	47,9	1,8	0,0	0,0	0,0	<b>16,96</b>
6. São José do Cerrito	138,3	21,7	3,2	0,5	0,0	0,0	0,0	24,7	6,5	0,0	0,0	0,0	<b>16,24</b>
7. Curitibanos	91,6	21,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	43,6	10,2	0,0	0,0	0,0	<b>13,90</b>
8. Vargem Bonita	45,8	57,5	3,7	0,0	0,0	0,0	15,8	71,7	37,5	0,0	0,0	0,0	<b>19,33</b>
9. São Lourenço do Oeste	73,2	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	33,2	93,0	32,3	0,0	0,0	0,0	<b>19,37</b>
10. Iporã do Oeste	26,5	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	49,5	72,5	3,6	0,0	0,0	0,0	<b>12,80</b>

Fonte: ANA (2017).

As inundações de 1997 e 2001, respectivamente, ocorreram nos meses de novembro e outubro. Conforme estudos de Saueressig (2012) são consideradas muito significativas, pois nestes meses os totais pluviométricos tendem a ser mais elevados ocasionando, assim, as inundações. Isto é observado nas Tabelas 3 e 4, as quais apresentam os dados de precipitação mais elevados do que foi verificado na Tabela 2 referente a 1987. Rossato (2011) abordou a importância das passagens frontais na gênese das chuvas no RS, mas também de fenômenos como o ENOS. O ano de 1997 está entre os anos identificados como mais chuvosos no período entre 1970 e 2007, ano com forte influência de El Niño.

### 3.2 Espacialização a partir do Índice de Diferença Normalizada da Água- NDWI

As áreas de inundação, Figura 9, nos três eventos de inundação são realçadas nas imagens a partir do NDWI, bem como as áreas úmidas, representada na Figura 9 D, por ser uma imagem de data de situação de normalidade do leito do rio. Uma das características do NDWI

é destacar como água o limiar acima de zero, o que quer dizer que somente áreas com lâminas da água ou vegetação com alto teor de umidade, serão salientadas. Considerando as quatro imagens é evidente que a inundação de 2001 (9 C) foi menos expressiva, pois as manchas de água são bem menores em relação às outras.

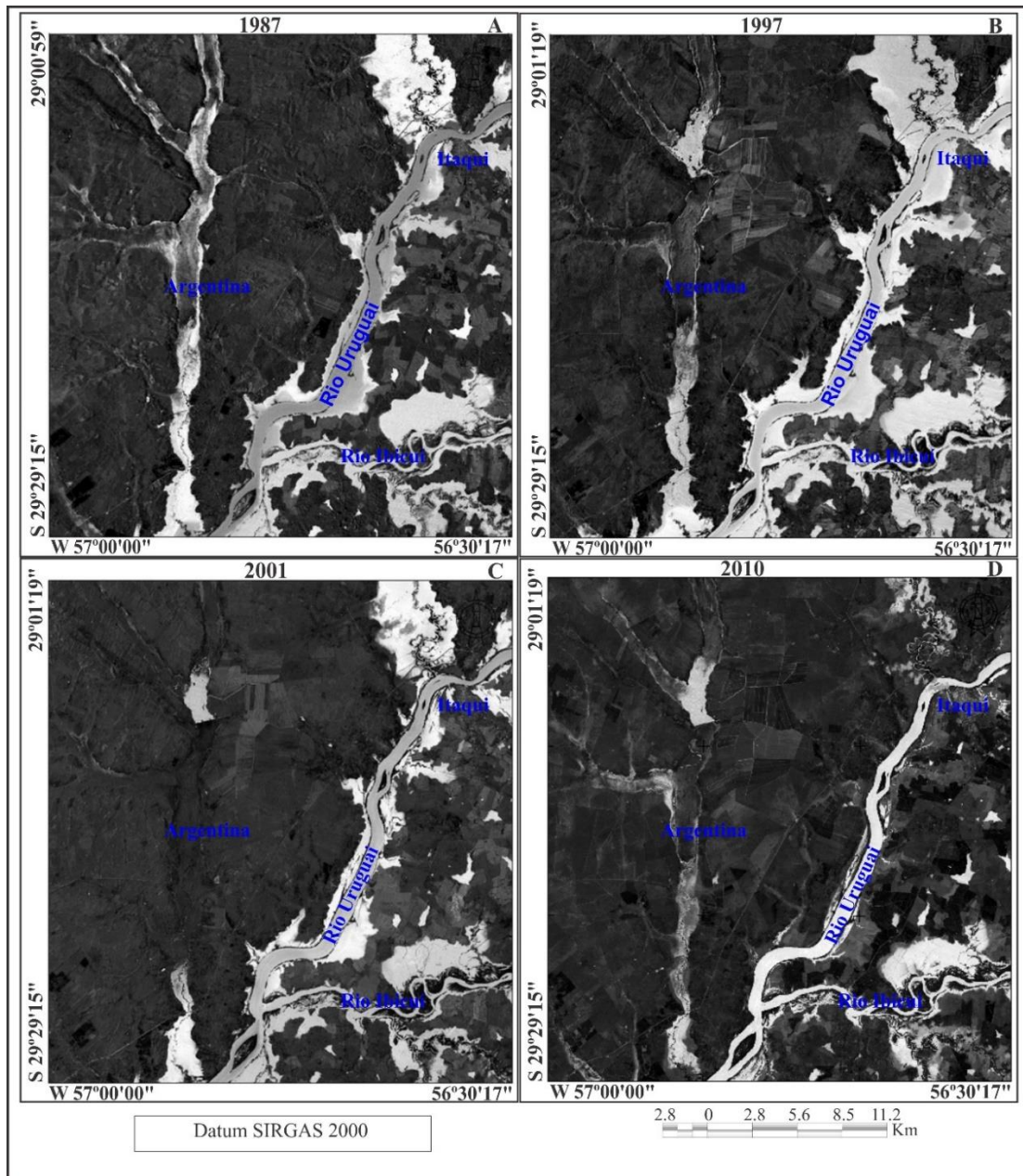


Figura 9 - Imagem de NDWI de 03/08/87(A), 18/11/97 (B), 12/10/01(C) e 22/01/10 (D).

A Figura 9 B de NDWI apresenta maior área de inundação, devido aos índices pluviométricos elevados. Também por ser ano de ocorrência de El Niño. Ao comparar a inundação de 1997 com as outras datas analisadas destaca-se que a mancha de inundação é mais

expressiva. Isso fica evidente ao se comparar os dados dos totais pluviométricos nas tabelas de 1987, 1997 e 2001, pois os valores da tabela de 1997 são bem mais significativos que as demais.

A eficiência do mapeamento de inundações a partir de imagens de satélite e geotecnologias é destacada em: Oliveira *et al.* (2013) que espacializaram as áreas inundáveis a partir de dados de precipitação, cota e imagens de satélite; Brubacher & Guasselli (2013) que espacializaram as áreas inundáveis com base no índice NDWI obtiveram resultados satisfatórios, pois os bairros inundados foram bem identificados no mapeamento.

Foi realizada uma classificação (Figura 10) e quantificação (Tabela 4) das áreas úmidas para todas as datas a partir do índice NDWI considerando a classe áreas úmidas. O fatiamento permitiu observar maior riqueza de detalhes das diferenças entre cada data analisada, evidenciando os contrastes na planície de inundação em decorrência da magnitude dos eventos

O evento de maior magnitude dentre as 4 datas é o de 1997, considerando que as áreas úmidas representam 27,33% da área total, seguido do evento de 1987 com 19,18% e em 2001 com 15,21% e 2010 data de uma situação de normalidade na planície do rio Uruguai com 8,91%.

Tabela 4 - Classes fatiamento de NDWI.

Classes	1987		1997		2001		2010	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Áreas úmidas	48.279,06	19,18	68.782,05	27,33	38.269,35	15,21	22.426,38	8,91
Não classificada	203.377,14	80,82	182.874,15	72,67	213.386,85	84,79	229.229,82	91,09
Total	251.656,20	100,0	251.656,20	100,0	251.656,20	100,0	251.656,20	100,0
Cota (m)	9,34		10,7		9,04		6,59	

Em relação a inundação de 1997 pode-se inferir o quanto ela foi expressiva em comparação com as outras datas analisadas. Embora a inundação de 1987 também tenha ocorrido em ano com atuação do El Niño, esta não foi tão significativa pois a área inundada da planície de inundação é menor ao comparar as Figura 10 (A, B, C, D). A inundação de 2001 ocorreu em ano considerado neutro sem a influência do fenômeno El Niño (Tabela 5). Entretanto, nem todas as inundações consideradas de grande magnitude conforme os dados históricos ocorreram em anos de atuação do El Niño.

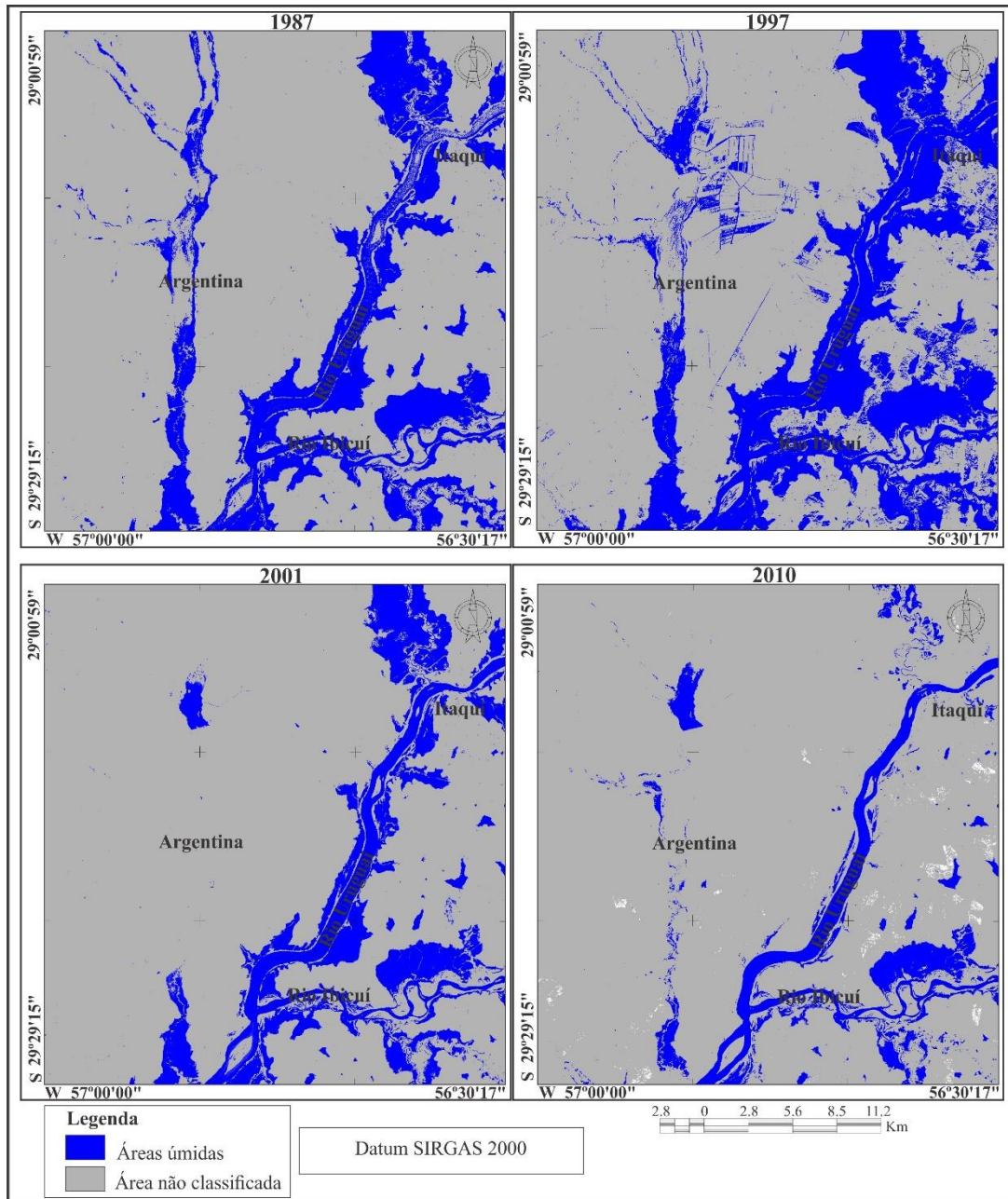


Figura 10 - Fatiamento NDWI de 03/08/87(A), 18/11/97 (B), 12/10/01(C) e 22/01/10 (D).

Nery *et al.* (2006) analisaram a precipitação pluvial anual média na bacia do rio Uruguai no período de 1972 a 2001 e observaram uma oscilação entre 1400mm (a jusante) e 1700 mm (a montante), com maiores valores (1900 mm) na parte central da bacia. Essa distribuição também foi encontrada em estudos publicados no Caderno da Região Hidrográfica do Uruguai (2006) e em Rossato (2011) ao analisar a distribuição espacial da precipitação pluviométrica na bacia do Uruguai. Nery *et al.* (2006) calcularam a dispersão da precipitação pluvial anual a partir do desvio padrão, o resultado apresentou significativa variabilidade na parte central da bacia hidrográfica do Uruguai.



O Caderno da Região Hidrográfica do Uruguai (2006) destaca que no trecho médio e inferior do rio Uruguai, as inundações são devidas a precipitações de longa duração e grande abrangência espacial. O que se confirma, conforme os dados apresentados, considerando os 11 dias antecedentes à data da imagem selecionada, as chuvas que ocasionam inundações decorrem de dias de chuva de longa duração.

A precipitação pluvial na bacia do rio Uruguai é bem distribuída ao longo dos anos, não apresenta diferenças entre o período úmido e seco. Os eventos El Niño e La Niña (Tabela 5) influenciam na precipitação do rio Uruguai, com chuvas bem acima do normal em anos de El Niño (NERY *et al.*, 2006), como verificado na inundação de 1997, nos dados da Tabela 2.

Tabela 5 - Tabela do período do fenômeno El Niño.

<b>Período El Niño</b>	<b>Duração (meses)</b>	<b>Período La Niña</b>	<b>Duração (meses)</b>
01/1980 a 02/1980	2	10/1984 a 06/1985	9
04/1982 a 06/1983	15	05/1988 a 05/1989	13
09/1986 a 02/1988	18	08/1995 a 03/1996	8
06/1991 a 07/1992	14	07/1998 a 02/2001	32
10/1994 a 03/1995	6	08/2007 a 06/2008	11
05/1997 a 05/1998	13	07/2010 a 04/2011	10
06/2002 a 02/2003	9	08/2011 a 02/2012	7
07/2004 a 04/2005	10		
09/2006 a 01/2007	5		
07/2009 a 04/2010	10		
11/2014 a 05/2016	19		

Fonte: National Weather Service, 2016.

Apesar de a influência ocorrer durante todo o período de atuação, existem duas épocas do ano que são mais afetadas pelas fases do ENOS. Na primavera e começo do verão, entre os meses de outubro a dezembro, ao ano inicial do evento, e final de outono e começo de inverno, de abril a junho, ao ano seguinte do início do evento (CUNHA, 2003). Assim, nessas épocas, a possibilidade de chuvas acima do normal são maiores, em ano de El Niño, como nos eventos de 1987 e 1997 (BRITTO *et al.*, 2008). Os autores destacam que o ano de 1997 apresentou uma variabilidade interanual bem marcada, com fortes chuvas principalmente no noroeste e oeste do RS, as quais ocasionaram inundações em vários municípios no Estado.

Sanches (2013) ao comparar os totais anuais de precipitação no município de Alegrete no período de 1928-2009, identificou os anos mais chuvosos (volume superior a 1850mm) e os menos chuvosos (volume inferior a 1170mm) com base nos limites superior e inferior do desvio padrão da série histórica. Os anos de 1987 e 1997 respectivamente com 1909,5mm e 1957,8mm

cada um, estão entre os anos considerados mais chuvosos para o município, e classificado como muito úmido o ano de 1997 de acordo com o Índice de Anomalia de Chuva - IAC. O rio Ibirapuitã no município de Alegrete é um dos afluentes do rio Ibicuí, que por sua vez deságua no rio Uruguai, como é observado no setor leste da Figura 6.

Saueressig (2012) analisou as maiores cotas fluviométricas registradas em Itaqui para o período de 1980 a 2010. Em 1997 o rio Uruguai na estação fluviométrica de Itaqui, registrou sua segunda maior cota fluviométrica, chegando a 13,30m acima do leito normal, a maior cota atingida foi no ano de 1983 com 14,52m acima do leito normal. Sendo assim na inundação de 1997 foi registrada a terceira maior cota, evidenciando que a mancha de inundação de 1997 é maior que as demais datas analisadas, comprovado com os dados das cotas fluviométricas (Tabela 6).

Tabela 6 – Dados de cota para os dias antecedentes a imagem de satélite.

Ano	1987												
	Julho										Agosto		
Dia	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4 (pico)
Cota (m)	4,78	4,59	4,38	4,24	4,24	4,50	6,00	7,53	8,38	8,84	9,18	9,34	9,38
Ano	1997												
	Novembro												
Dia	7	8	9	10 (pico)	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Cota (m)	12,10	12,40	12,78	12,96	12,65	12,14	11,53	11,07	11,02	11,25	11,24	10,70	9,76
Ano	2001												
	Outubro												
Dia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 (pico)
Cota (m)	4,52	5,80	6,24	6,74	7,66	8,15	8,35	8,33	8,28	8,32	8,68	9,04	9,19
Ano	2010												
	Janeiro												
Dia	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25 (pico)
Cota (m)	5,96	6,03	6,12	6,28	6,19	5,98	5,81	6,01	6,29	6,59	6,97	7,31	7,44

Fonte: ANA (2017)

A Tabela 6 apresenta as cotas antecedentes ao pico da inundação. Para a imagem de 1987 o pico ocorreu um dia após a passagem do satélite. Para a data de novembro de 1997, já vinha ocorrendo a elevação do nível do rio desde de outubro, quando ocorreu o pico máximo de 13,30 m no dia 21/10/97, voltando a baixar e elevar-se novamente em novembro quando aconteceu o pico máximo em novembro de 12,96 m, 8 dias antes da passagem do satélite na ocasião. Em 2001 o pico máximo para o evento foi um dia após a passagem do satélite, apresentando a elevação de 9,38 m acima do normal.

Destaca-se também que quando a precipitação ocorre onde estão localizadas as estações pluviométricas do norte do RS e divisa com Santa Catarina não são necessários altos volumes para que se observe a elevação do rio e conseqüente inundação no setor mais a jusante da bacia, como no município de Itaqui, pois quando a precipitação está concentrada em relevo acidentado como o setor a montante da bacia do rio Uruguai, são suficientes baixos volumes de precipitação em um curto intervalo de tempo para deflagrar eventos de inundação, conforme o observado por Souza et al. (2017), para o município de Uruguaiana.

Mengue *et al.* (2016) ao mapear inundações no rio Uruguai com imagens de satélite compararam a área inundada do rio Uruguai e a área inundada estimada pelo modelo M-HAND. A partir dessa comparação, determinaram o limiar mais adequado para o modelo se ajustar à área inundada real.

A influência do El Niño ocorre sobre os totais pluviométricos do RS, intensificando-os em função do fortalecimento do Anticiclone do Atlântico, que barra o deslocamento de frentes polares, permanecendo estes sistemas atmosféricos estacionados sobre o Estado por alguns dias, favorecendo a formação inundações (WOLLMANN, 2013).

Um quadro comparativo entre os meses com registro de inundação no rio Uruguai e a ocorrência do El Niño, realizado por Righi (2011) demonstrou uma relação entre o fenômeno e as inundações. Dos 38 registros entre 1980 e 2009, 20 deles ocorreram em meses com a atuação do fenômeno. De tal modo que verificou uma relação significativa desses eventos com o índice de oscilação sul, que se relaciona ao evento ENOS. Em casos de inundações com o fenômeno apresentando-se fraco e anos neutros, observou que as inundações em sua maioria estão relacionadas com a dinâmica atmosférica regional em consonância com as características topográficas do RS do que ligadas a circulação geral da atmosfera e suas alterações provocadas pelo fenômeno El Niño (RIGHI, 2011).

De uma maneira geral, os dois fatores geográficos ligados a origem das inundações no RS são o clima, com suas sucessivas e quase semanais passagens frontais, e o relevo, cujas altitudes são capazes de provocar certo efeito orográfico, intensificando a precipitação (WOLLMANN, 2013).

#### **4 Considerações Finais**

O uso de imagens de satélite para espacializar inundações demonstrou ser eficiente, na comparação de três eventos e assim caracterizar cada inundação. Ao comparar imagens em anos considerados neutros e com ocorrência de El Niño, observou-se que as águas do rio Uruguai

extravasam para a planície de inundação em todas as situações analisadas, mas em níveis diferentes. O evento mais expressivo na seção analisada foi novembro de 1997, sob influência do fenômeno El Niño, corroborando que este exerce influência nos totais pluviométricos, que por sua vez ocasionam inundações no Rio Grande do Sul. Também destaca-se que quando as chuvas são concentradas em setores da bacia, a elevação do nível do rio decorre gradativamente, enquanto que chuvas espacializadas como um todo na bacia, ocasionam uma elevação mais rápida do nível do rio, em decorrência da declividade da bacia do rio Uruguai.

De maneira geral, as chuvas que colaboram para elevação do nível do rio são regionais, oriundas do norte do Estado e sul de Santa Catarina. Também foi constatado que as chuvas locais exercem participação em algumas situações, como as chuvas decorrentes da Argentina. Fato observado tanto nas imagens da banda 5, quanto de NDWI, acompanhada de dados de precipitação das estações analisadas. Ao utilizar a banda 5 do infravermelho próximo e o NDWI, foi possível identificar áreas inundadas, mesmo que o nível da água tenha diminuído devido ao excesso de umidade do solo.

A partir dos dados de precipitação e cota pode-se observar o tempo que decorre para elevação do nível das águas, a ponto de extrapolar para a planície de inundação. Desta forma técnicas de processamento de imagens são eficazes para mapear inundações, pois juntamente com dados de precipitação e cota observou-se que quando o nível do rio está em 10,7m a inundação atinge 27,33% da área (1997), quando o nível é considerado normal em 6,59m, atinge 8,91% da área (2010).

## 5 Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## 6 Referências

ALSDORF, D.E.; RODRIGUEZ, E.; LETTENMAIER, D.P. Measuring surface water from space. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, p. 1-24, 2007.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/.htm>>. Acesso em: 07 nov. 2016.

BRAZ, D.F.; PINTO, L.B.; CAMPOS, C.R.J DE. Ocorrência de eventos severos em regiões agrícolas do Rio Grande do Sul. **Geociências**, v. 36, n. 1, p. 89-99, 2017.

BRITTO, F.P.; BARLETTA, R.; MENDONÇA, M. Variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial no Rio Grande do Sul: influência do fenômeno El Niño Oscilação Sul. *Revista Brasileira de Climatologia*. V. 3 & 4. 2008. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/25408/17040>>. Acesso em: 19 abr. 2018.

BRUBACHER, J.P. & GUASSELLI, L.A. Mapeamento da área inundável da planície do rio dos Sinos a partir do índice NDWI, São Leopoldo – RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16, 2013, Foz do Iguaçu. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. São José dos Campos, 2013, p. 4540-4547.

CADERNO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO URUGUAI. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília – Distrito Federal, 128p. 2006.

CAMPOS, C.R.J.D. & SILVA, M.V.D. Impacto de sistemas meteorológicos no regime hídrico do Rio Grande do Sul em 2006. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 121-136, 2010.

CAMPOS, C.R.J.D. & EICHHOLZ, C.W. Características físicas dos Sistemas Convectivos de Mesoescala que afetaram o Rio Grande do Sul no período de 2004 a 2008. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 29, n. 2, p. 331-345, 2011.

CEPED/RS-UFRGS. Capacitação em gestão de riscos [recurso eletrônico] / Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. – 2. ed. – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016. 270. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/grid>>. Acesso em: 10 out. 2016.

CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS – CRED. Publications. Disponível em: <https://www.cred.be/publications>. Acesso em: 10 out2016.

CERA, J. C & FERRAZ, S. E. T. Variações climáticas na precipitação no sul do Brasil no clima presente e futuro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 30, n. 1, p. 81–88, 2015.

CUNHA, G. R. La Niña e a agricultura no sul do Brasil. 2003.

Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/agromet.htm>. Acessado em: 20 abr2018.

DEFESA CIVIL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Disponível em: <<http://www.defesacivil.rs.gov.br/>>. Acesso em: 20 jul. 2016.

FOERSTNOW, L.P.; & MENEZES, J.D. Aplicabilidade de imagens de satélite utilizando NDWI na determinação da batimetria da Lagoa da Conceição, Florianópolis, SC. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2011, p. 4397-4404.

GAO, B.C. NDWI – A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, v. 58, n. 3, p. 257-266, 1996.

GRIMM, A.M. Interannual climate variability in South America: Impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. *Stoch Environ Research Risk Assess*, v.25, n. 4, p.537–554, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Geociências**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/informacoes-ambientais/geomorfologia/10870-geomorfologia.html?=&t=publicacoes>>. Acesso em: 22 jul. 2016.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.

NATIONAL WEATHER SERVICE – Climate Prediction Center. **Historical El Niño/La Niña episodes**. Disponível em: <[http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)>. Acesso em: 30 set. 2016.

MENEZES, D.J. & SCCOTI, A.A.V. Inventário de registro de inundações no estado do Rio Grande do Sul entre 1980 e 2010. In: ROBAINA, L.E. DE S., TRENTIN, R. (Organizadores). **Desastres Naturais no Rio Grande do Sul**. Santa Maria:Ed. UFSM, p. 163-179, 2013.

MENGUE, V.P.; SCOTTÁ, F.C.; SILVA, T.S.; FARINA, F. Utilização do Modelo HAND para mapeamento das áreas mais suscetíveis à inundação no Rio Uruguai. **Pesquisas em Geociências**, v. 43, n. 1, p. 41-53, 2016.

MIN, S.; ZHANG, X.; ZWIERS, F.W.; HEGER, G.C. Human contribution to more-intense precipitation extremes. **Nature Letter**, v. 470, p. 370-381, 2011.

NERY, J.T.; DENIG, E.A.; AZEVEDO, L.C DE.; MARTINS, M L.O. Estudo da variabilidade interanual da precipitação na bacia do rio Uruguai. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 2, p. 149-159, 2006.

OLIVEIRA, G.G.; GUASSELLI, L.A.; SALDANHA, D.L. Espacialização das áreas inundáveis em Montenegro, RS. In: GUASSELLI, L.A.; OLIVEIRA, G.G.; ALVES, R.C.M. (Editores), **Eventos extremos no Rio Grande do Sul: inundações e movimentos de massa**. Porto Alegre: Ed. Evangraf, p. 63-99, 2013.

RECKZIEGEL, B.W. **Levantamento dos desastres desencadeados por eventos naturais adversos no estado do Rio Grande do Sul, no período de 1980 a 2005**. 261 p. Dissertação de Mestrado em Geografia – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

RIGHI, E. Risco à inundação em médio curso do rio Uruguai: um estudo de caso nos municípios de Porto Lucena e São Borja. Porto Alegre, 2011. 222 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

RIGHI, E. **Metodologia para zoneamento de risco a inundações graduais**. 196 p. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ROBAINA, L.; TRENTIN, R.; BAZZAN, T.; RECKZIEGEL, E.; VERDUM, R.; NARDIN, D. Compartimentação geomorfológica da bacia hidrográfica do Ibicuí, Rio Grande do Sul, Brasil: proposta de classificação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 11, n. 2, p. 11-23, 2010

ROSSATO, M.S. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia.** 253 p. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SANCHES, F. DA O. Os areas do sudeste do Rio Grande do Sul: estudo sobre as chuvas no século XX e um possível cenário para o século XXI. 188 p. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SAUERESSIG, S.R. **Zoneamento das áreas de risco a inundação da área urbana de Itaquí – RS.** 101 p. Dissertação de Mestrado em Geografia - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012

SAUSEN, T.M. & REIS, J.T. Levantamento e avaliação das inundações ocorridas no Rio Grande do Sul. In: GUASSELLI, L. A.; OLIVEIRA, G.G.; ALVES, R.C.M. (Editores), **Eventos extremos no Rio Grande do Sul: inundações e movimentos de massa.** Porto Alegre: Ed. Evangraf, p. 25-44, 2013.

SECRETARIA DO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - SEMA. **Bacias hidrográficas.** Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br/bacias-hidrograficas>. Acesso em: 24 jul. 2016.

SOUZA, D.O. DE.; LINO, J.F. DE L.; BERNARDES, T.; SATO, E.N.; FIRMINO, M.B.M. Padrões meteorológicos e morfológicos associados à eventos de inundação na bacia do rio Uruguai: estudo de caso para o município de Uruguaiana – RS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 4, p. 621-633, 2017.

WOLLMANN, C.A. Gênese e tipologias climáticas das enchentes no Rio Grande do Sul. In: ROBAINA, L.E. DE S. & TRENTIN, R. (Editores). **Desastres Naturais no Rio Grande do Sul. Santa Maria:** Ed. UFSM, p. 149-162, 2013.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (Org). Desastres Naturais: Conhecer para prevenir. Instituto Geológico, São Paulo. 2009. Disponível em: <<http://igeologico.sp.gov.br/downloads/livros/DesastresNaturais.pdf>>. Acesso em: 10 set 2016.

TUCCI, C. E. M.; DA SILVEIRA, A. L. L.; BERTONI, J. C.; LANNA, A. E.; CAICEDO, N. L.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L.; CHEVALLIER, P.; CLARKE, R. T.; PORTO, R. L.; ZAHED FILHO, K.; BENETTI, A.; BIDONE, F.; PESSOA, M. L.; BORDAS, M. P.; SEMMELMAN, F. R. Hidrologia: Ciência e Aplicação. 4ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 943 p, 2013.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. **Landsat Project Description.** Disponível em: <[http://landsat.usgs.gov/about\\_project\\_descriptions.php](http://landsat.usgs.gov/about_project_descriptions.php)>. Acesso em: 20 jul. 2016.

**ARTIGO 2 - ANÁLISE DE EVENTO DE INUNDAÇÃO A PARTIR DE IMAGENS LANDSAT, IMAGENS DE SUPERFÍCIE E DADOS HIDROLÓGICOS, ITAQUI-RS.**

Submetido a Revista Brasileira de Meteorologia

18-Aug-2019

Dear Srta. Silveira:

Your manuscript entitled "ANÁLISE DE EVENTO DE INUNDAÇÃO A PARTIR DE IMAGENS LANDSAT, IMAGENS DE SUPERFÍCIE E DADOS HIDROLÓGICOS, ITAQUI-RS." has been successfully submitted online and is presently being given full consideration for publication in the Revista Brasileira de Meteorologia.

Your manuscript ID is RBMET-2019-0122.

Please mention the above manuscript ID in all future correspondence or when calling the office for questions. If there are any changes in your street address or e-mail address, please log in to ScholarOne Manuscripts at <https://mc04.manuscriptcentral.com/rbmet-scielo> and edit your user information as appropriate.

You can also view the status of your manuscript at any time by checking your Author Center after logging in to <https://mc04.manuscriptcentral.com/rbmet-scielo>.

Thank you for submitting your manuscript to the Revista Brasileira de Meteorologia.

Sincerely,  
Revista Brasileira de Meteorologia Editorial Office



## **ANÁLISE DE EVENTO DE INUNDAÇÃO A PARTIR DE IMAGENS LANDSAT, CARTAS SINÓTICAS DE SUPERFÍCIE E DADOS HIDROLÓGICOS, ITAQUI-RS.**

**Greice Vieira SILVEIRA<sup>1</sup>, Laurindo Antonio GUASSELLI<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto / Universidade Federal do Rio Grande do Sul. - Campus do Vale. Porto Alegre - RS – Brasil. Emails: greice.v.silveira@gmail.com; laurindo.guasselli@ufrgs.br

### **Resumo:**

Eventos extremos de precipitação no Rio Grande do Sul e sul de Santa Catarina resultaram em inundações na planície a jusante do rio Uruguai. O objetivo deste trabalho é analisar a partir de cartas sinóticas de superfície e dados de precipitação, o evento de inundação de maio de 2017, na bacia hidrográfica do rio Uruguai, no município de Itaqui/RS. Foram analisados dados de 12 estações pluviométricas (maio e junho) e da estação fluviométrica de Itaqui. Mapas de precipitação total e anomalias de precipitação, imagem Landsat 8 e imagens de superfície entre 28 e 31 de maio de 2017. Abril e maio, apresentaram a maior anomalia positiva, sendo o mês de maio considerado extremamente chuvoso (95%) no norte e nordeste do Rio Grande do Sul. No dia 12 /06 ocorreu o pico máximo registrado para este evento, quando o rio alcançou a cota de 13,21 m. Os sucessivos dias de chuva, volume acumulado e a geomorfologia da bacia hidrográfica influenciaram na velocidade do nível de elevação das águas. De um modo geral as precipitações observadas, são tanto de origem regional, quanto local e são resultantes de sucessivas passagens de sistemas frontais sob o Estado.

**Palavras-chave:** Precipitações, Nível do Rio, Sistemas Frontais.

**Abstract:** Extreme precipitation events in Rio Grande do Sul and southern Santa Catarina resulted in flooding in the plain downstream of the Uruguay River. The objective of this work is to analyze, from surface synoptic charts and precipitation data, the flood event of May 2017, in the Uruguay river basin, in Itaqui / RS. Data from 12 rainfall stations (May and June) and from the Itaqui river station were analyzed. Total precipitation maps and precipitation anomalies, Landsat 8 image and surface images between May 28 and 31, 2017. April and May showed the largest positive anomaly, with May being considered extremely rainy (95%) in the north and northeast of Rio Grande do Sul. On the 12/06 occurred the maximum peak recorded for this event, when the river reached the elevation of 13.21 m. The successive days of rain, accumulated volume and the geomorphology of the watershed influenced the velocity of the elevation level of the waters. In general, the observed precipitation is of both regional and local origin and is the result of successive passages of frontal systems under the state.

**Keywords:** Precipitation, River Level, Frontal Systems

## 1 Introdução

A ocorrência de eventos de inundação tem aumentado no Mundo e no Brasil, em decorrência da ação da própria natureza e dos impactos antrópicos. As mudanças climáticas afetam a intensidade e a distribuição das chuvas (GRIMM, 2011; MIN *et al.*, 2011), aumentando a vulnerabilidade das populações que ocupam as áreas suscetíveis.

Entre os condicionantes naturais às inundações estão o regime de precipitação, que controla a quantidade de água que entra no sistema fluvial; a geologia, que controla a configuração da rede de drenagem e a sedimentação; o relevo, que reflete o tipo e distribuição espacial de quase todas as outras condicionantes, exceto a precipitação; o tipo de solo, que determina a capacidade de retenção e transporte da água; e o tipo e a distribuição da vegetação (TOMINAGA *et al.*, 2009).

As inundações podem ser consideradas uma das consequências da atuação e dinâmica de sistemas naturais sobre a superfície terrestre. Essa dinâmica não se limita apenas ao aumento da vazão, que ocasiona as inundações, mas também aos movimentos atmosféricos e a geomorfologia (WOLLMANN, 2014).

Os fenômenos de escala sinótica, como as frentes frias que passam regularmente, favorecem a distribuição espacial e temporal das precipitações (CERA & FERRAZ, 2007). A passagem de sistemas frontais, e a ocorrência de ciclogênese e frontogênese também têm influência nos totais pluviométricos. O comportamento climatológico das chuvas, espacial e temporalmente, depende dos fenômenos meteorológicos que atuam diretamente na região, além do relevo do Estado (PIETRO, 2016).

Segundo Fernandes & Satyamurty (1994), no Rio Grande do Sul os cavados invertidos se deslocam na direção noroeste-sudeste, e causam tempo severo sobre as regiões afetadas. A ocorrência de fenômenos climáticos de escala global como o *El Niño*, responsável pelos altos índices de chuva que causam inundações, e *La Niña*, diminui os volumes de chuva na região sul causando períodos de seca (GRIMM, 2009; FIRPO, 2012).

De acordo com Rafael *et al.* (2014) imagens de superfície são eficazes no estudo de cartas sinóticas e imagens GOES 12 para analisar eventos climáticos que causam inundações, e podem auxiliar na explicação do deslocamento dos sistemas atuantes a partir das imagens. Saldanha *et al.* (2010) ao analisar a situação sinótica e os parâmetros meteorológicos associados a frentes frias no leste do RS, observaram sua relação com fenômenos adversos, utilizando imagens GOES e cartas sinóticas. Segundo Sousa (2016) a integração entre imagens orbitais,

cartas sinóticas e dados meteorológicos, coletados em superfície, pode identificar fenômenos meteorológicos, sob uma perspectiva da climatologia.

O volume de precipitações ocorrido em maio de 2017 no oeste e norte do RS, causou transtornos para a população em decorrência da elevação do nível dos rios, ocorrendo inundações. Para entender a dinâmicas desse evento adverso, este trabalho tem como objetivo analisar a partir das imagens de superfície e dados de precipitação, o evento de inundação ocorrido em maio de 2017 na bacia hidrográfica do rio Uruguai, no município de Itaqui/RS.

### **1. 1 Área de estudo**

O rio Uruguai tem sua denominação no início da confluência dos rios Pelotas e Canoas, divide os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina e faz limite com a Argentina. A área total drenada pela Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai (conforme Resolução CNRH n.º 30/2003), é de cerca de 385.000 km<sup>2</sup>. Seus principais tributários estão situados no setor leste da bacia. A vazão média anual é de 3600m<sup>3</sup>/s e seu volume médio anual é de 114 km<sup>3</sup> (CADERNO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO URUGUAI, 2006).

Sausen & Reis (2013) organizaram uma base de dados dos municípios do Rio Grande do Sul que decretaram Situação de Emergência, em decorrência de inundações e enxurradas, entre 1980 e 2012. A maioria dos municípios próximos ao rio Uruguai, apresentaram pelo menos um Decreto de Situação de Emergência. As estações de outono e inverno apresentaram maior registro de decretos de inundação, enquanto na primavera há mais registros para as enxurradas.

O estudo de caso corresponde a uma seção do rio Uruguai e afluentes, com destaque para o rio Ibicuí, Figura 11, situada na fronteira entre a Argentina e o Brasil, na margem esquerda do rio Uruguai no Estado do Rio Grande do Sul. Este trecho do rio apresenta alta suscetibilidade a inundações em frequência e impactos (ANA, 2016).

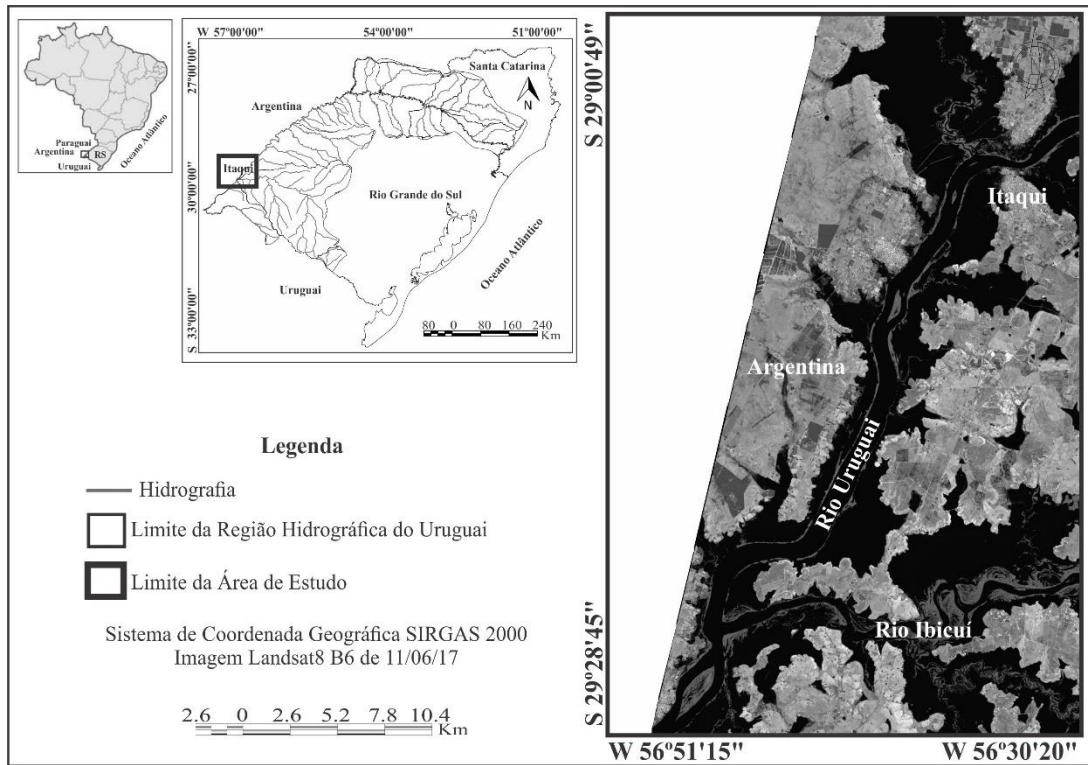


Figura 11 - Mapa de localização e imagem Landsat 8 da área de estudo.

A variabilidade interanual da precipitação na região sul do Brasil está diretamente relacionada a fenômenos de circulação atmosférica, tanto em escala regional quanto global. O Rio Grande do Sul situa-se em uma região favorável à atuação de fenômenos meteorológicos que afetam o tempo e o clima (CERA & FERRAZ, 2015). A diversidade de fenômenos que atuam na precipitação do RS, também influencia na intensidade, na distribuição e frequência da ocorrência de eventos adversos (CAMPOS & SILVA, 2010; CAMPOS & EICHHOLZ, 2011).

## 2 Material e Métodos

### 2.1 Dados hidrológicos

Para caracterizar o evento de inundação foram utilizados os seguintes dados: (a) cota da estação fluviométrica (75900000) localizada no município de Itaipu, e tabelados os meses de maio e junho; (b) 12 estações pluviométricas (Figura 12) dos meses de maio e junho de 2017, obtidos no site virtual da Agência Nacional das Águas (ANA), no Sistema de Informações Hidrológicas - HydroWeb, com acesso as séries históricas; (c) mapas de precipitação total e

anomalias de precipitação, obtidos no site do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). Elaborado pelo método de Krigagem e para a anomalia a diferença ponto a ponto entre a variável registrada no mês e ano selecionados e a climatologia (Normais Climatológicas do INMET que correspondem a média histórica do período de 1961 a 1990); (d) mapas de precipitação, obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a partir da classificação de quantis em que, a precipitação acumulada escolhida pelo usuário é classificada em percentis de 5%, 15%, 33%, 66%, 85% e 95%.

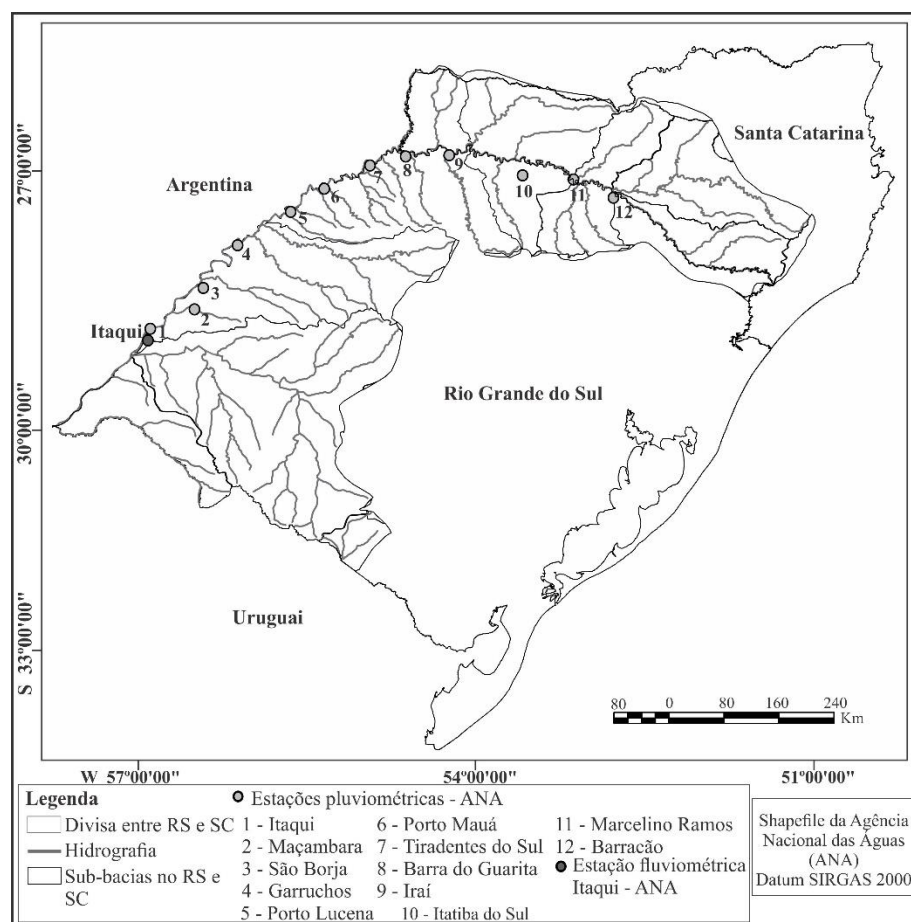


Figura 12 - Estações meteorológicas no curso do rio Uruguai - RS.

## 2.2 Aquisição e processamento das imagens

Foi obtida uma imagem do satélite Landsat 8, órbita/ponto 224/80, de 11/06/2017, com ausência de nuvens, disponível no site do Serviço Geológico Norte Americano (*U.S. Geological Survey - USGS*), no catálogo de imagens do *EarthExplorer*. As imagens disponíveis do OLI 8

são georreferenciadas, e processadas sob demanda no site da ESPA-USGS, com correção atmosférica e convertida para reflectância de superfície (produto *Landsat Surface Reflectance*).

Foram utilizadas imagens de superfície nas seguintes datas: 28/05, 29/05, 30/05 e 31/05, disponibilizadas no acervo do boletim técnico diário, com análise sinótica na página do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). Foi criado um banco de dados geográfico no software Spring 5.4.3.

### **3 Resultados e Discussão**

#### **3.1 Análise das precipitações**

Nunes & Da Silva (2013) encontraram maior número de eventos extremos ocorridos no verão e outono, ao analisar as chuvas persistentes no leste e norte de Santa Catarina, mas os resultados obtidos por Pietro (2016) para o Rio Grande do Sul indicam que os maiores números ocorreram no inverno e verão, com acumulados de chuva menores nestas estações, principalmente no verão. No período entre 2004 e 2013 os casos de chuvas persistentes extremas foram mais persistentes e intensas nas estações de transição outono e primavera, com casos de até 10 dias, e os maiores acumulados, próximo dos 200 mm, como o que ocorreu em maio de 2017, no outono.

Eventos extremos de precipitação no Rio Grande do Sul e sul de Santa Catarina em maio de 2017 resultaram em inundações na planície a jusante do rio Uruguai. Foram registrados entre 200 mm e 400 mm de acumulados de chuva, registrados nos últimos 15 dias de maio (INMET, 2018). Os solos saturados perderam a capacidade de infiltração, ocorrendo aumento do escoamento superficial. A Tabela 7 destaca os totais pluviométricos dos meses de maio e junho de estações no rio Uruguai, atingidas pelo volume acumulado de chuva.

No dia 13/05 Itaqui registrou 146,5 mm de precipitação, o mesmo ocorreu em outros municípios do norte e oeste do RS, com valores expressivos de precipitação, acima de 75 mm durante o mês de maio. Vila (2004) define episódios como este, como eventos extremos de precipitação em que, determinada estação meteorológica de superfície, registra precipitação pluvial diária acumulada igual ou superior a 75 mm.

Eichholz *et al.* (2015) analisaram precipitação extrema registrada no norte do RS em julho de 2007 e concluíram que decorreu da atuação de um sistema frontal. A interação de sistemas frontais com a convecção pode favorecer a ocorrência de eventos extremos de

precipitação (GARREAUD, 1999; VERA & VIGLIAROLO, 2000). Estudos indicam que eventos extremos no RS são registrados preferencialmente na metade norte do Estado, e um dos fatores que contribui para isso é a topografia (EICHHOLZ & CAMPOS, 2011; RASERA & CAMPOS, 2013)

Tabela 7 - Precipitação para os meses de maio e junho de 2017.

Estações rio Uruguai	Maio	Junho
	Total (mm)	
1 - Itaqui	467,8	74,3
2 - Maçambará	428,3	132,1
3 - São Borja	457,5	189,7
4 - Garruchos	608,2	141,1
5 - Porto Lucena	530,2	212,2
6 - Porto Mauá	403,0	199,3
7 - Tiradentes do Sul	372,7	185,7
8 - Barra do Guarita	446,5	186,3
9 - Iraí	373,6	185,5
10 - Itatiba do Sul	440,7	202,5
11 - Marcelino Ramos	466,5	206,7
12 - Barracão	422,5	106,3

Fonte: ANA (2018).

O município de Itaqui decretou em 29 de maio de 2017, Situação de Emergência em decorrência da inundação do rio Uruguai. A elevação do nível das águas do rio atingiu a área urbana e rural de Itaqui (Prefeitura Municipal de Itaqui, 2018). No mapa de precipitação Total do Brasil (Figura 13 a), mês de maio de 2017, a região sul, com destaque para o norte do Rio Grande do Sul e sul Santa Catarina, apresentou volumes entre 350 mm e 500 mm de precipitação. No trecho do rio Uruguai, próximo de Itaqui, foram registrados valores entre 300 e 350 mm de precipitação.

No mapa de Anomalia de Precipitação, (Figura 13 B), destaque para anomalia positiva em algumas regiões do país. A região da bacia do rio Uruguai está dentro de uma anomalia positiva. O norte do Rio Grande do Sul apresentou valores positivos para a anomalia de precipitação para o mês de maio, com valores a partir de 200 mm, podendo chegar acima de 300 mm. Barros *et al.* (2008) relatam que no final do século XX, a bacia hidrográfica do Uruguai teve uma tendência positiva na precipitação e no fluxo (PASQUINI & DEPETRIS 2007). A partir de modelagem hidrológica, Saurral *et al.* (2008) atribuíram a tendência de fluxo

no período de 1960-2000, especialmente ao aumento da precipitação, ao invés da mudança no uso e cobertura do solo.

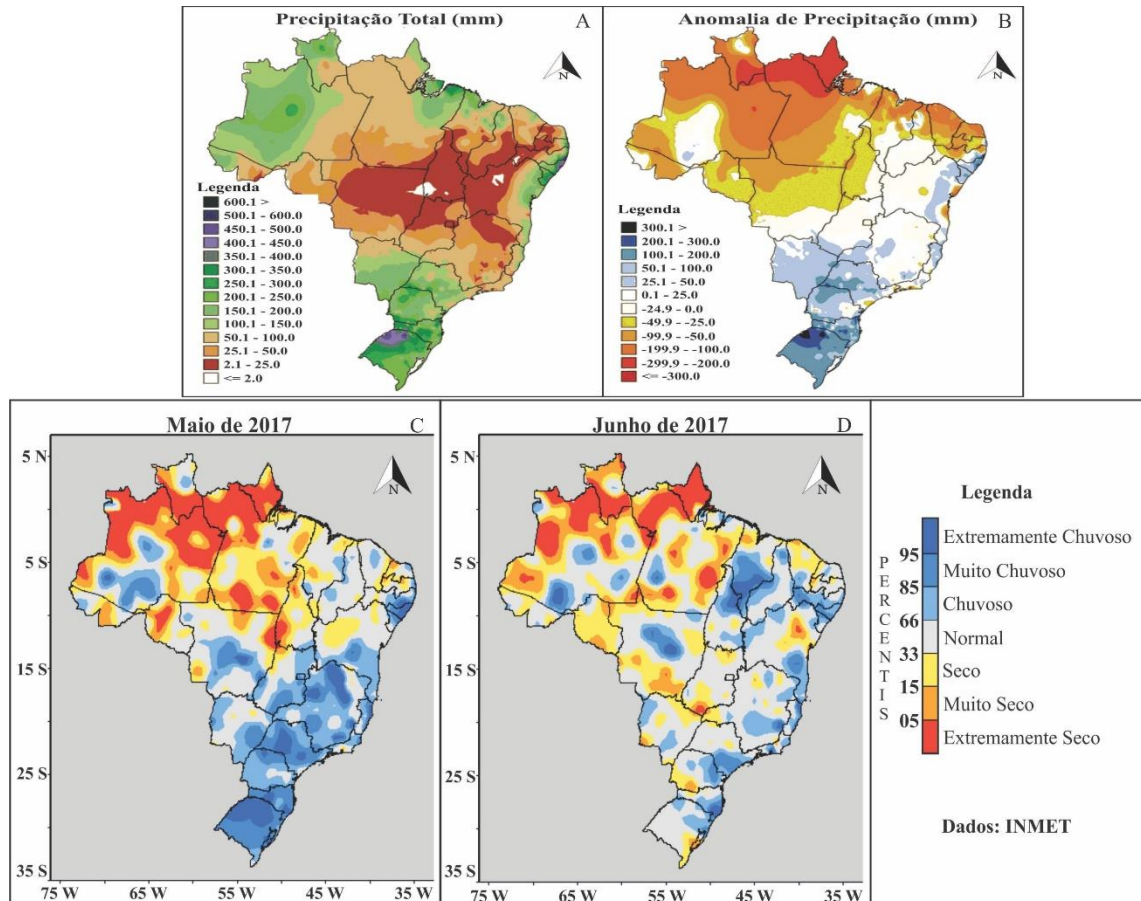


Figura 13 - Mapas de precipitação Total (a); Anomalia de Precipitação (b); Precipitação por Classificação de Quantis maio (c); junho (d) de 2017. Fonte: Adaptado de CPTEC/INPE e INMET 2018.

A região do rio Uruguai é caracterizada por precipitação mensal distribuída ao longo do ano, e é suscetível a inundações durante o ano todo. Porém, entre abril e maio de 2017, a precipitação foi a maior anomalia positiva, e a oitava anomalia mais alta por um período consecutivo de dois meses desde 1979 (De ABREU *et al.*, 2019). Nos mapas de Precipitação pelo método de Classificação por Quantis (Figuras 13C e 13D). Para os meses de maio e junho, o mês de maio foi extremamente chuvoso (95%) no norte e nordeste do Rio Grande do Sul, e a região oeste foi classificada como muito chuvosa (85%). O mapa do mês de junho mostra que praticamente toda a região do rio Uruguai foi classificada como normal, e apenas o norte como chuvosa. A precipitação do mês de junho foi utilizada para comparar com o volume de chuvas



ocorridas em maio, para mostrar que as precipitações que ocasionaram a elevação das águas do rio foram concentradas em maio.

Os dados da estação fluviométrica (Figura 14) no município de Itaqui, mostram a elevação das águas do rio Uruguai. Com consecutivos dias de chuva no Rio Grande do Sul, o nível do rio subiu lentamente. Em 20 de maio a cota era de 7,45 m acima do nível normal, no dia 31 subiu para 10,06 m e no início de junho chegou no seu pico máximo no dia 12, com de 13,21 m acima do normal.

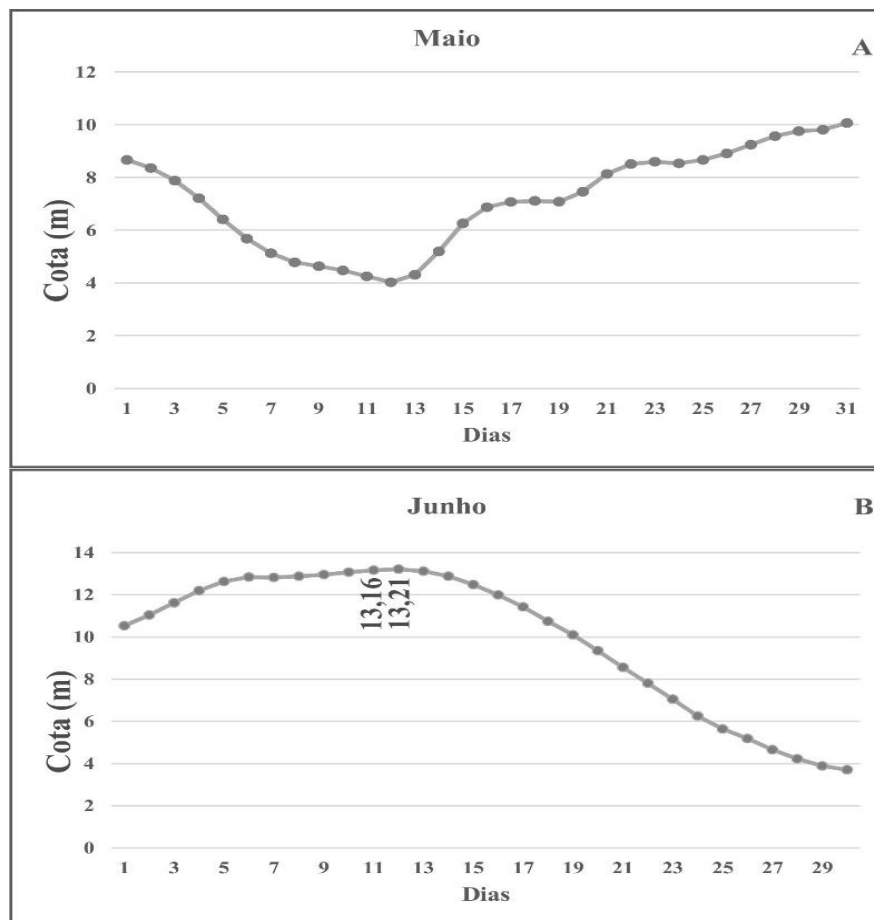


Figura 14 – Gráfico da Cota da estação fluviométrica de Itaqui, de maio e junho, no rio Uruguai. Fonte: ANA (2018).

A passagem do satélite Landsat 8, ocorreu um dia antes do pico máximo do evento, no dia 11 atingiu a cota de 13,16 m. A espacialização da distribuição das chuvas e das anomalias permitiu compreender como decorreu o evento de inundação em maio de 2017, em conjunto com os dados de cota do município de Itaqui. A elevação do nível do rio iniciou em maio, com dias consecutivos de chuva em toda a área de abrangência da bacia. As precipitações nos setores a montante (área mais declivosa) no norte do Rio Grande do Sul contribuíram para que as águas

do rio se elevassem consecutivamente até o dia 12 de junho, quando ocorreu o pico máximo, chegando 13,21 m acima do leito normal.

De Abreu *et al.* (2019) destacam que em maio, chuvas intensas propiciaram as condições hidrológicas necessárias resultando em inundações na bacia do Uruguai, quando atingiu o pico no início de junho com TR de 40 anos. O excesso de chuvas tanto regional (oriunda das cabeceiras da bacia) quanto local contribuíram para a magnitude deste evento.

A imagem Landsat 8, banda 6, Figura 15, mostra a área inundada em tons mais escuros. No setor leste da bacia hidrográfica, no trecho que ocorre o encontro do rio Uruguai com o rio Ibicuí, ocorre o represamento das águas do Ibicuí. Neste trecho Ogassawara & Gass (2018) constataram que o represamento das águas tanto no rio Ibicuí, localizado a jusante da área urbana, quanto no próprio rio Uruguai, levando em consideração a declividade e a altitude da região são alguns dos fatores que contribuem para a ocorrência de inundações na cidade de Itaquí.

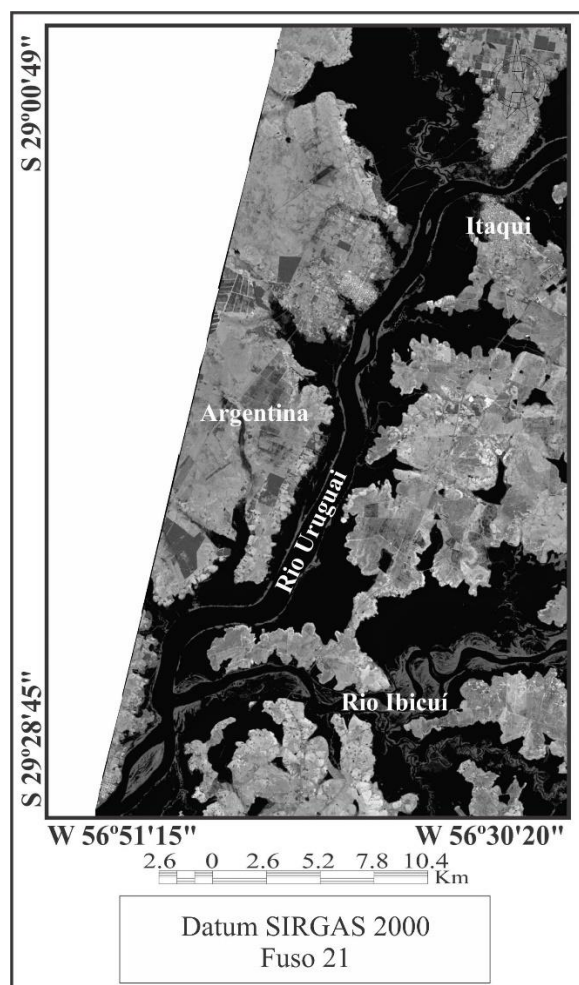


Figura 15 - Imagem Landsat 8, banda 6, do dia 11/06/2017

Represas hidrelétricas em cascata são utilizadas para operação de controle de inundação. Quando ocorrem sistemas de chuvas mais persistentes e intensivos sobre a bacia superior, a umidade do solo, a rápida resposta de escoamento de chuva e a capacidade de armazenamento limitada de reservatórios, sobrecarregam as operações de controle de inundações e resultam em inundações a jusante (De ABREU *et al.*, 2019).

### 3. 2 Análise das imagens de superfície

Na figura 16 referente as cartas sinóticas de superfície dos dias 28 a 31 de maio, observa-se a presença de Anticiclones pós-frontal, cavados atuando sobre o RS, geralmente associados a mudanças no tempo com formação de nebulosidade e precipitação, dependendo do nível de umidade e a temperatura da atmosfera. Os Sistemas Frontais formados pelo encontro de massas de ar com propriedades diferentes, que provocam chuva sendo seu sistema mais atuante, o ramo frio (ANDRADE, 2005). As Frentes Estacionárias, quando uma frente quente ou fria deixa de ser mover, estiveram presentes nesses dias analisados, exercendo influência sobre as precipitações que atingiram a região sul do Brasil, especialmente SC e o RS.

Os Sistemas Frontais desenvolvem linhas de instabilidade pré-frontais, com uma frequência média de 4 eventos por mês durante o inverno, exercendo grande influência nas chuvas. Estes Sistemas Frontais se deslocam do Oceano Pacífico, passam pela Argentina e seguem para o nordeste. A partir deles se organizam sistemas no sul do RS, com maior umidade associada à ciclogênese, sendo determinante sobre os acumulados de chuva principalmente no período de agosto a outubro (ANDRADE, 2005; EICHHOLZ & CAMPOS, 2011).

Nas estações de transição (outono e primavera) o Jato Subtropical de Altos Níveis está centrado sobre o sul do Brasil e nordeste da Argentina, influenciando na precipitação mais intensa na região em relação a sistemas de ciclo de vida curto, Sistemas Convectivos de Mesoescala (GRIMM, 2009). Estes Sistemas são aglomerados de nuvens convectivas que ocorrem durante todo o ano e são mais frequentes nas estações quentes, e se formam devido ao calor e umidade trazidos da região amazônica para a região subtropical pelos Jatos de Baixos Níveis (HOUBE, 1993; MARENGO *et al.*, 2004; VILA, 2004; SAKAMOTO, 2009).

As chuvas entre abril e maio de 2017, resultaram de uma sucessão de eventos intensos de escala sinótica para mesoescala (CPETEC, 2017). Entre os principais componentes que resultaram neste evento, destaca-se a interação dos sistemas meteorológicos de latitudes médias com o Jato de Baixo Nível a leste do Andes, que fornecia umidade adicional das regiões tropicais, aumentando a convecção associada (De ABREU *et al.*, 2019).

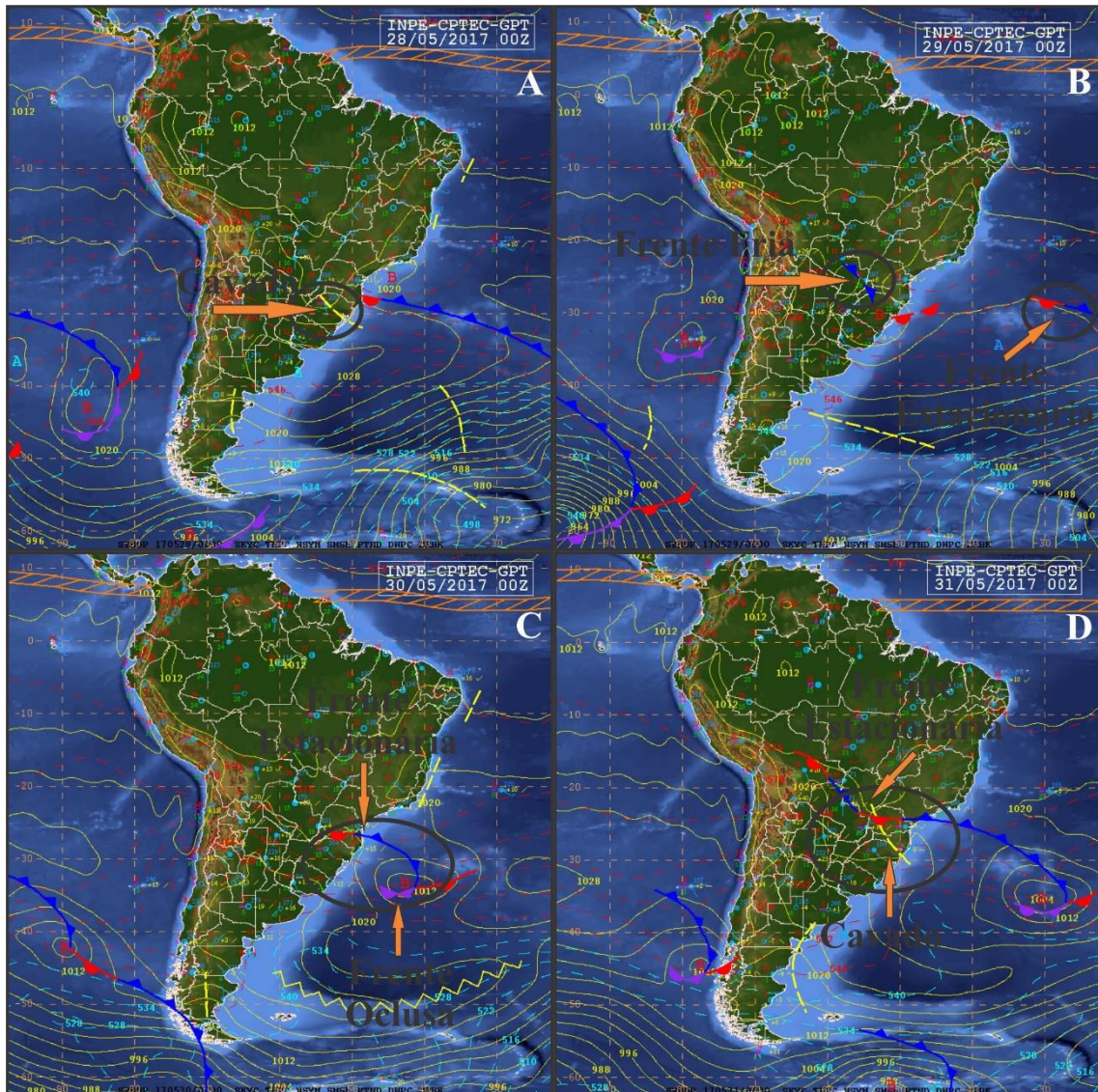


Figura 16 - Carta sinótica de superfície de 28/05 (A); 29/05 (B); 30/05 (C); 31/05 (D).

Fonte: INPE – CPTEC

Embora o evento tenha coincidido com uma fase neutra do *El Niño*, o verão austral de 2017 foi caracterizado por um aquecimento rápido incomum do extremo oriente do Pacífico, denominado por um *El Niño* costeiro (GARREAUD, 2018). De Abreu *et al.* (2019) e Silva *et al.* (2009), destacam que não se pode rejeitar a hipótese de que este *El Niño* aumentou a frequência do jato de baixa altitude, que é um componente importante na produção de precipitação na região. Também destacam condições meteorológicas semelhantes entre a inundação ocorrida em abril de 1986 e a de 2017, com fortes precipitações na cabeceira da bacia durante um período de dois meses, resultando no segundo maior mês de abril.

Gan & Rao (1991) evidenciam que a frequência de ciclogênese é maior sobre o Uruguai durante o inverno no hemisfério sul, com uma média de 60 casos durante o ano. Assim como

os Sistemas Convectivos de Mesoescala e os Cavados invertidos, que exercem participação sobre os valores totais de precipitação. Estes sistemas apresentam um deslocamento mais curto de oeste-leste durante o inverno, enquanto que no verão, o deslocamento é sudoeste-nordeste, percorrendo uma distância maior (GUEDES *et al.*, 1994).

A altitude constitui um fator que, associado aos sistemas atmosféricos, incrementa o volume de precipitação no norte do RS. O Planalto Basáltico favorece a subida do ar, a formação de nuvens e a precipitação. Além disso, o posicionamento do vale do rio Uruguai no norte do Estado ocasiona a ascensão do ar tanto na direção norte (SC), quanto sul (RS), também incrementando a precipitação (ROSSATO, 2011).

Para Wollmann (2014), os dois fatores geográficos ligados à origem das inundações no RS são: (a) clima, com sucessivas, e quase semanais, passagens frontais, cujas variações do eixo frontal apenas reclassificam-na em distintos sistemas atmosféricos; (b) relevo, cujas altitudes ocasionam um efeito orográfico, intensificando as precipitações. Ao analisar e identificar os sistemas atmosféricos, e os tipos de tempo responsáveis pela origem das inundações no RS, no período de 2000 a 2011, Wollmann (2014) conclui que na região hidrográfica do Uruguai, 80% dos episódios, ocorreram por influência da permanência de Frente Estacionária sobre a região.

#### **4 Conclusões**

Os dados de precipitação, anomalias, cota da régua e as imagens de satélite permitiram entender a dinâmica e a magnitude do evento de inundação na planície do rio Uruguai. Os dias consecutivos de chuva, o volume acumulado e a declividade da bacia hidrográfica influenciam na velocidade da elevação do nível das águas. De Abreu (2019) destaca que o percurso da onda de cheia da bacia, até o final do período, após fortes chuvas, alta umidade do solo e elevação no nível dos reservatórios que estão localizados no rio Uruguai, foi em torno de 5 a 6 dias.

As imagens de superfície podem ser utilizadas para acompanhar a evolução das condições do tempo que ocasionam inundações. Observa-se de um modo geral, que as precipitações são resultantes de sucessivas passagens de sistemas frontais. Rossato (2011) destaca que a origem das precipitações no RS está diretamente relacionada aos sistemas frontais, associados à queda de cerca de 58-77% mm de precipitação registrados durante o ano. Quando se somam os sistemas frontais e polares, que são sistemas associados, tem-se valores percentuais que oscilam entre 80-90%.

As imagens de satélite são importantes para espacializar a mancha de inundação e identificar as áreas atingidas. Mas também permite entender como cada evento de inundação se manifesta nos setores da bacia hidrográfica, juntamente com dados de precipitação e cota. No evento de 2017, as precipitações que culminaram em inundação no município de Itaqui, são tanto de origem regional, quanto local. Ao analisar a imagem do dia 11/06 é perceptível em diversos setores da bacia hidrográfica a presença de áreas úmidas, evidenciando assim, a relação das chuvas regionais e locais no evento de inundação.

## 5 Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## 6 Referências Bibliográficas

AGENCIA NACIONAL DAS ÁGUAS (ANA). HIDROWEB. **Séries Históricas de Estações**. Disponível em: <[http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes\\_historicas\\_abas.jsf](http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf)>. Acesso em: 07 nov. 2017.

BARROS, V. R., DOYLE, M. E.; CAMILLONI, I. A. Precipitation trends in southeastern South America: Relationship with ENSO phases and with low-level circulation. **Theor. Appl. Climatol.**, v. 93, p. 19–33, 2008.

CADERNO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO URUGUAI. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília – Distrito Federal 2006, 128p.

CAMPOS, C.R.J.D.; EICHHOLZ, C.W. Características físicas dos Sistemas Convectivos de Mesoescala que afetaram o Rio Grande do Sul no período de 2004 a 2008. **Rev. Bras. Geofís.**, v. 29, n. 2, p. 331-345, 2011.

CAMPOS, C.R.J.D.; SILVA, M.V.D. Impacto de sistemas meteorológicos no regime hídrico do Rio Grande do Sul em 2006. **Rev. Bras. Geofís.**, v. 28, n. 1, p. 121-136, 2010.

CERA, J.C.; FERRAZ, S.E.T. Caracterização da Precipitação no Estado do Rio Grande do Sul. In: **Anais do II Encontro Sul Brasileiro de Meteorologia**. Florianópolis - SC, 2007.

CERA, J.C.; FERRAZ, S.E.T. Variações climáticas na precipitação no sul do Brasil no clima presente e futuro. **Rev. Bras. Meteor.**, v. 30, n. 1, p. 81–88, 2015.

DE ABREU, R. C; CONNINGHAM, C; RUDORFF, C. M; RUDORFF, N; ABATAN, A. A; DONG, B; LOTT, F.C; TETT, S, F. B; SPARROW, S. N. Contribution of anthropogenic

climate change to april-may 2017 heavy precipitation over the Uruguay river basin. **American Meteor. Society**. v. 100, n. 1, p. 37-41, 2019.

EICHHOLZ, C.W. & CAMPOS, C. R. J. 2011. Distribuição de eventos extremos de precipitação no estado do Rio Grande do Sul. In: CONGRESO CUBANO DE METEOROLOGIA, 6, Habana-Cuba, 2011. *Anais*, Habana Sociedade Cubana de Meteorología.

EICHHOLZ, C.W; CAMPOS, C. R. J de. MARIA, D. M; PINTO, L. B. Evento extremo de precipitação observado no norte do Rio Grande do Sul. 2015. Anuário do Instituto de Geociências. V. 38. N. 1. p. 86-94.

FERNANDES, K.A.; SATYAMURTY, P. Cavados invertidos na região central da América do Sul. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 8., 1994. Belo Horizonte - MG. p. 93-94. 1994.

FIRPO, M.A. F. Influências remotas das TSM dos oceanos Pacífico e Atlântico e da Oscilação Antártica na variabilidade climática interanual no Rio Grande do Sul e suas inter-relações. **Tese de Doutorado em Meteorologia**, p. 186, 2012.

GAN, M. A.; RAO, V. B. Surface cyclogenesis over South America. **Mon. Wea. Rev.**, v. 119, n. 5, p. 1293-1302, 1991.

GARREAUD, R.D. 1999. Cold air incursions over subtropical and Tropical South America: A numerical case study. *Monthly Weather Review*, 127(12): 2823-2853.

GARREAUD, R. D. A plausible atmospheric trigger for the 2017 coastal El Niño. **Int. J. Climatol.**, v. 38, p. 1296–1302, 2008.

GRIMM, A.M.; ZILLI, M.T. Interannual variability and seasonal evolution of summer monsoon rainfall in South America. **Journal of Climate**, v. 22, n. 9, p. 2257-2275, 2009.

GRIMM, A.M. Interannual climate variability in South America: Impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change. **Stoch Environ Research Risk Assess**, v. 25, n. 4, p. 537–554, 2011.

GUEDES, R.L.; MACHADO, L.A.T.; SILVEIRA, J.M.B.; ALVES, M.A.S. E.; WALTZ, R.C. Trajetórias dos sistemas convectivos sobre o continente americano. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 8...1994. Belo Horizonte - MG. p. 77-80. 1994.

HOUZE, R.A. Mesoscale convective systems. In: HOUZE, R.A. (ed.). **Cloud dynamics**. Academic Press, Inc., v. 53, p. 334-404. 1993.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Clima - Monitoramento Climático**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/quantis2>>. Acesso em: 02 dez. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Banco de dados de imagens**. Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais – DAS. Disponível em: <<http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes.formulario.logic>>. Acesso em: 01 dez. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Clima**. Monitoramento Brasil. Disponível em: <<http://clima1.cptec.inpe.br/monitoramentobrasil/pt>>. Acesso em: 01 dez. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Tempo**. Boletim Técnico. Disponível em: <<http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt>>. Acesso em: 01 dez. 2018.

MARENGO, J.A.; SOARES W.R.; SAULO C. & NICOLINI M. Climatology of the Low-Level Jet East of the Andes as Derived from the NCEP-NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability. **Journal of Climate**, v. 17, n. 12, 2261-2280. 2004.

MIN, S.; ZHANG, X.; ZWIERS, F.W.; HEGER, G.C. Human contribution to more-intense precipitation extremes. **Nature Letter**, v. 470, p. 370-381, 2011.

NUNES, A. B.; DA SILVA, G. C. Climatology of extreme rainfall events in eastern and northern Santa Catarina state: presente and future climate. **Revista Brasileira de Geofísica**. v. 31, p. 1-13, 2013.

PASQUINI, A. I., and P. J. Depetris, 2007: Discharge trends and flow dynamics of South American rivers draining the southern Atlantic seaboard: An overview. **Journal of Hydrology**, v. 333, p. 385–399, 2007.

RAFAEL, L.M.; NETO, M.V.B.; GIRÃO, O.; NOBREGA, R.S. Análise da dinâmica climática associada zonas potenciais de inundação enquanto fatores condicionantes das cheias ocorridas em julho de 2011 na bacia do rio Goiana, Estado de Pernambuco. **Caminhos de Geografia**. Uberlândia. v. 16, n. 55, p. 47-60, 2015.

PIETRO, R. B. Estudos de eventos extremos de chuva persistente sobre o Rio Grande do Sul entre 2004 e 2013. **Dissertação de Mestrado**, p. 76. 2016.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAQUI. **Defesa Civil**. Disponível em: <<http://www.itaqui.rs.gov.br/>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

RASERA, G; CAMPOS, C. R. J D. Análise sazonal das regiões do Rio Grande do Sul atingidas por eventos severos gerados por SCM no período de 2004 a 2008. **Anuário do Instituto de Geociências**. v. 36, n. 2, p. 61-69, 2013.

ROSSATO, M.S. Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia. **Tese de Doutorado em Geografia**, p. 254. 2011.

SAKAMOTO, M.S. Sistemas Convectivos de Mesoescala observados na Região Subtropical da América do Sul durante o SALLJEX. **Tese de Doutorado em Meteorologia**, p. 243. 2009.

SALDANHA, C.B.; FEDOROVA, N.; CARVALHO. M.H de.; Estudo de um caso de frente fria secundária sobre o Sul do Brasil. **Rev. Bras. Meteor.** v. 25, n. 1, p. 32-45, 2010.

SAURRAL, R. I.; BARROS, V. R.; LETTENMAIER, D. P. Land use impact on the Uruguay River discharge. **Geophys. Res. Lett.** v. 35, n. 12, p. 1-6, 2008. L12401. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2008GL033707>>. Acesso em: 15 mai. 2019.



SAUSEN, T.M.; REIS, J.T. **Levantamento e avaliação das inundações ocorridas no Rio Grande do Sul**. In: GUASSELLI, L.A.; OLIVEIRA, G.G.; ALVES, R.C.M. (Editores), *Eventos extremos no Rio Grande do Sul: inundações e movimentos de massa*. Porto Alegre: Ed. Evangraf, p. 25-44, 2013.

SILVA, G. A. M.; AMBRIZI, T.; MARENGO, J. A. Observational evidences on the modulation of the South American low level jet east of the Andes according the ENSO variability. **Annalles. Geophysicae**. v. 27, n. 2, p. 645–657, 2009.

SOUSA, R.V.B. Integração entre imagens orbitais, cartas sinóticas e dados coletados em superfície para a identificação de fenômenos meteorológicos. **Caminhos de Geografia**. Uberlândia. v. 17, n. 57. p. 201-211, 2016.

TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (Org). **Desastres Naturais: Conhecer para prevenir**. Instituto Geológico, São Paulo. 2009. Disponível em: <<http://igeologico.sp.gov.br/downloads/livros/DesastresNaturais.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2016.

TUCCI, C. E. M., CLARKE, R. T.; COLLISCHONN, W.; DA SILVA DIAS, P. L.; DE OLIVEIRA, G. S. Long-term flow forecasts based on climate and hydrologic modeling: Uruguay River basin. **Water Resour. Res.** v. 39,n. 7.p. 1-11, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2003WR002074>>. Acesso em: 15 mai. 2019.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Download de imagens**. Disponível em: <<https://espa.cr.usgs.gov/>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

VERA, C.S. & VIGLIAROLO, P. K. 2000. A diagnostic study of cold-air outbreaks over South America. *Monthly Weather Review*, 128(1): 3-24.

VILA, D. A. Sistemas convectivos precipitantes de mesoescala sobre Sudamerica: Ciclos de vida y circulación en gran escala asociada (Rainy mesoscale convective systems over South America: Life cycle and the associated large scale environment). Tese de Doutorado em Ciências, p. 132. 2004.

WOLLMANN, C.A. Enchentes no Rio Grande do Sul do século XXI. **Mercator**. Fortaleza. v. 13, n. 1. p. 79-91, 2014.

**ARTIGO 3 - PADRÕES TEMPORAIS DE PRECIPITAÇÕES RELACIONADOS A INUNDAÇÕES, MUNICÍPIO DE ITAQUI – RS**

## **PADRÕES TEMPORAIS DE PRECIPITAÇÕES RELACIONADOS A INUNDAÇÕES, MUNICÍPIO DE ITAQUI – RS**

**Greice Vieira SILVEIRA<sup>1</sup>, Laurindo Antonio GUASSELLI<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto / Universidade Federal do Rio Grande do Sul. - Campus do Vale. Porto Alegre - RS – Brasil. Emails: greice.v.silveira@gmail.com; laurindo.guasselli@ufrgs.br

**Resumo:** O objetivo deste trabalho é analisar as precipitações anuais, mensais e os padrões de chuva relacionados a eventos de inundação no rio Uruguai, no município de Itaqui. Foram utilizadas séries históricas de estações pluviométricas (1971-2018), fluviométricas (1940-2017), analisados os dados de precipitação, cota e vazão e calculado o tempo de retorno (TR) para a estação fluviométrica de Itaqui. Os totais pluviométricos mais expressivos ocorreram em 1986 (2695,8 mm), 2002 (2658,6 mm) e 1972 (2113,9 mm). O ano de 2008 aparece com menor expressão nos totais pluviométricos (922 mm). Os meses mais chuvosos foram abril (177,27 mm), outubro (175,89 mm) e março (157,57 mm). A cota de inundação de 8,5 m foi atingida 22 vezes no mês de outubro. O padrão temporal de distribuição das chuvas na bacia do rio Uruguai é do tipo concentrado, para a maioria dos eventos analisados. As chuvas regionais são as que mais influenciam na dinâmica dos eventos de inundação. A distribuição espacial e temporal das precipitações está diretamente relacionada à magnitude de eventos extremos de precipitações que ocasionam inundações de longos períodos no rio Uruguai.

**Palavras-chave:** Precipitação, Vazão, Eventos de Inundação.

**Abstract:** The objective of this work is to analyze the annual, monthly precipitation and rains patterns related to flood events in the Uruguay River, in the municipality of Itaqui. It was used historical series of rainfall stations (1971-2018), fluviometric (1940-2018) were analyzed the precipitation, quota and flow data and calculated the return time (RT) for the Itaqui fluviometric station. The most significant rainfall totals occurred in 1986 (2695.8 mm), 2002 (2658.6 mm) and 1972 (2113.9 mm). The year 2008 appears with the lowest expression in the total rainfall (922 mm). The months with more water were April (177.27 mm), October (175.89 mm) and March (157.57 mm). The flood quota of 8.5m was reached 22 times in October. The temporal pattern of distribution of rainfall in the Uruguay River basin is of concentrated type for most of the analyzed events. Regional rainfall is the one that most influences the dynamics of flood events. The spatial and temporal distribution of precipitatiois is directly related to the magnitude of extreme precipitation events that cause long period flooding in the Uruguay River.

**Keywords:** Precipitation, Flow Rate, Flood Events.

## 1 Introdução

De acordo com o Atlas de Desastres Naturais (CEPED, 2012), no Rio Grande do Sul e Santa Catarina, no período de 1991 a 2010, os eventos de inundações e enxurradas apresentaram elevado número de ocorrências, superados apenas pela estiagem e seca.

A variabilidade interanual da precipitação na bacia do rio Uruguai, no período de 1972 a 2001, é bem distribuída ao longo dos anos e não apresenta diferenças marcantes entre o período úmido e seco (NERY, 2006). Os trimestres com maior frequência de chuva são janeiro/fevereiro/março, com 14 a 35 dias, e outubro/novembro/dezembro, com 16 a 28 dias. A média das precipitações anuais na bacia do rio Uruguai oscila entre 1400mm à jusante e 1700mm à montante, e 1900mm na área central da bacia (ROSSATO, 2011).

Segundo Ogassawara & Gass (2018) em Itaqui as inundações ocorrem em função do represamento das águas tanto no rio Ibicuí, localizado a jusante da área urbana, quanto no próprio rio Uruguai, levando em consideração a declividade e a altitude da região. A maior velocidade das águas no alto e médio curso do rio Uruguai, associada à grande área de contribuição da bacia, fazem com que o escoamento influencie no represamento das águas no rio Ibicuí e no próprio rio Uruguai, aumentando o nível das águas. Itaqui tem relevo mais plano e a velocidade de escoamento é menor. Os rios Uruguai e Ibicuí demoram a atingir o seu nível normal após episódios de inundação, demorando dias até que seu leito volte ao normal, intensificando o efeito das inundações.

Para a Defesa Civil (2019) a conjunção de chuvas regionais, em municípios como Itaqui, São Borja e Uruguaiana (médio curso) e no alto rio Uruguai, aliada ao grande volume de água associado às precipitações no oeste de Santa Catarina, os coloca em permanente estado alerta. O escoamento superficial em bacias de pequeno porte ocorre predominantemente sobre a superfície, mas com maior declividade, mas em bacias de grande porte, como a do rio Uruguai, o processo predominante é o deslocamento da onda de inundação por um canal definido de menor declividade, mas com perda de carga menor (TUCCI *et al.*, 2013).

As inundações consistem no aumento lento e previsível dos níveis de água em cursos hídricos, gerando um transbordamento que se mantém em situação de cheia durante algum tempo, e a seguir escoam gradualmente. Esses eventos adversos são ocasionados, geralmente, por chuvas prolongadas (CEPED, 2016) e podem gerar desastres se essas áreas estiverem ocupadas. São eventos naturais que ocorrem periodicamente frequentemente deflagrados por chuvas fortes e rápidas ou chuvas de longa duração (TOMINAGA *et al.*, 2009).

Souza *et al.* (2017) destacam que a magnitude e a frequência das inundações decorrem da intensidade, duração e distribuição da precipitação, da taxa de infiltração de água no solo, da capacidade de retenção de água devido ao uso e cobertura do solo, do grau de saturação do solo e das características morfométricas e morfológicas da bacia de drenagem. Essas condicionantes podem variar em função da estação do ano, padrões atmosféricos sazonais, além da influência das mudanças climáticas globais.

Assim, o objetivo é analisar as precipitações anuais, mensais e os padrões de chuva relacionados a eventos de inundação no rio Uruguai, no município de Itaqui - RS.

### **1.1 Área de estudo**

O rio Uruguai tem denominação no início da confluência dos rios Pelotas e Canoas. Nesse trecho, o rio assume a direção Leste-Oeste, dividindo os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. A área total drenada se configura na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai (BHRU), Resolução CNRH n.º 30/2003, é de cerca de 385.000 km<sup>2</sup>. Destes 45% estão situados em território brasileiro, 73% no Rio Grande do Sul e 27% em Santa Catarina. Seus principais tributários estão situados no setor leste da bacia. As atividades agroindustriais e o potencial hidrelétrico a colocam em lugar de destaque no cenário nacional (CADERNO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO URUGUAI, 2006).

A área de estudo corresponde a uma seção do rio Uruguai e afluentes, Figura 17, situada na fronteira entre a Argentina e o Brasil. A área urbana de Itaqui e o rio Ibicuí, afluente do rio Uruguai, se situam na margem esquerda do rio Uruguai no RS. Este trecho foi escolhido por ser considerado de alta suscetibilidade à inundação, em frequência e impactos (ANA, 2016).

A planície de inundação do rio Uruguai tem significativa diferença no médio curso. A jusante de Porto Lucena, a planície de inundação do rio se amplia, praticamente sem encaixamento, com feições que denotam expressiva acumulação fluvial que aumenta em área em direção sul. Nos municípios de São Borja, Itaqui e Uruguaiana, a planície apresenta um acúmulo de água elevado relativo ao escoamento da bacia hidrográfica (RIGHI & ROBAINA, 2010).

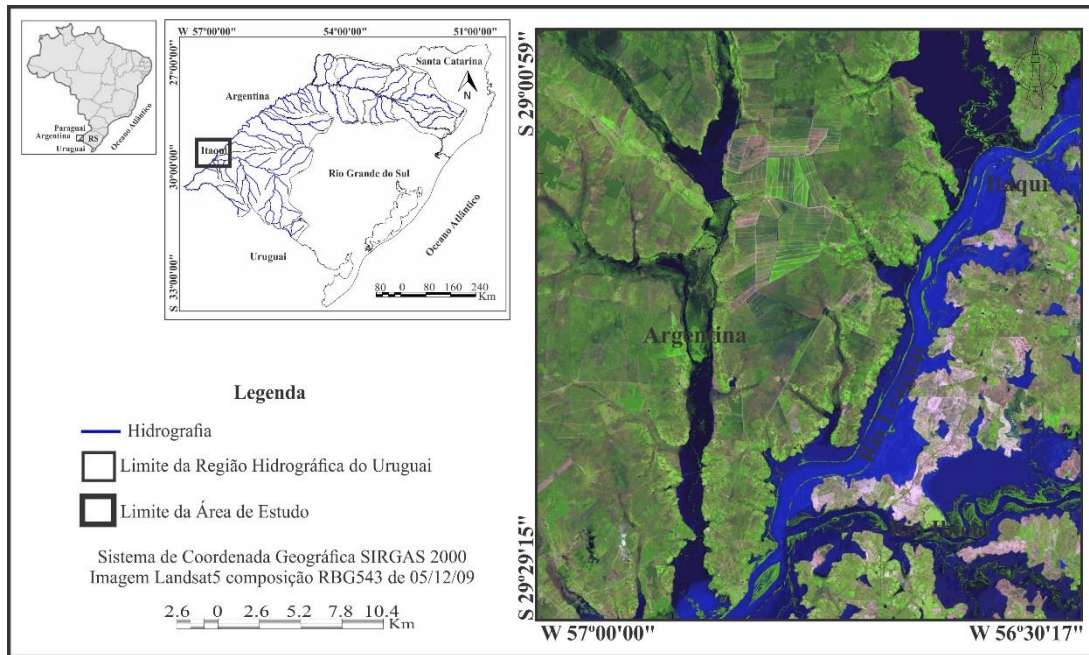


Figura 17 - Área de estudo, município de Itaqui/RS.

Righi e Robaina (2010) destacam que a largura da planície de inundação pode chegar a 4 km em Itaqui e São Borja. A parte norte da área urbana é inundada pela planície de inundação do rio Uruguai, e a sul do pelo rio Ibicuí, um dos mais importantes da bacia hidrográfica do rio Uruguai. O rio Ibicuí é importante no aumento da vazão do rio Uruguai deste ponto em direção a jusante.

## 2 Metodologia e Dados

A bacia hidrográfica do rio Uruguai é dividida em 8 sub-bacias (SOUZA et al., 2017). O município de Itaqui está inserido na sub-bacia 75, a partir da qual foram definidas as estações pluviométricas analisadas (Figura 18). Foram utilizadas séries históricas de estações pluviométricas e fluviométrica, disponíveis no portal HIDROWEB no site da Agência Nacional das Águas (ANA). Foram selecionadas 4 estações pluviométricas (Itaqui, Maçambará, São Borja e Garruchos), inseridas na sub-bacia 75 (rios Uruguai, Ijuí, Piratinin e outros), e 5 estações fluviométricas (Marcelino Ramos, Iraí, Porto Lucena, Garruchos e Itaqui) e analisados os dados de cota e vazão.

Foram gerados gráficos dos totais pluviométricos anuais e dos totais pluviométricos mensais, para o período de 1971-2018. Também foram tabelados os dados de cota e dos picos máximos registrados para cotas a partir de 8m até o máximo atingido, no período de 1940-2018.

Foram contabilizados os meses de maior frequência de eventos de inundação para as cotas de 8,5 m, 9 m, 10 m, 11 m, 12 m, 13 m e 14 m, o maior nível registrado.

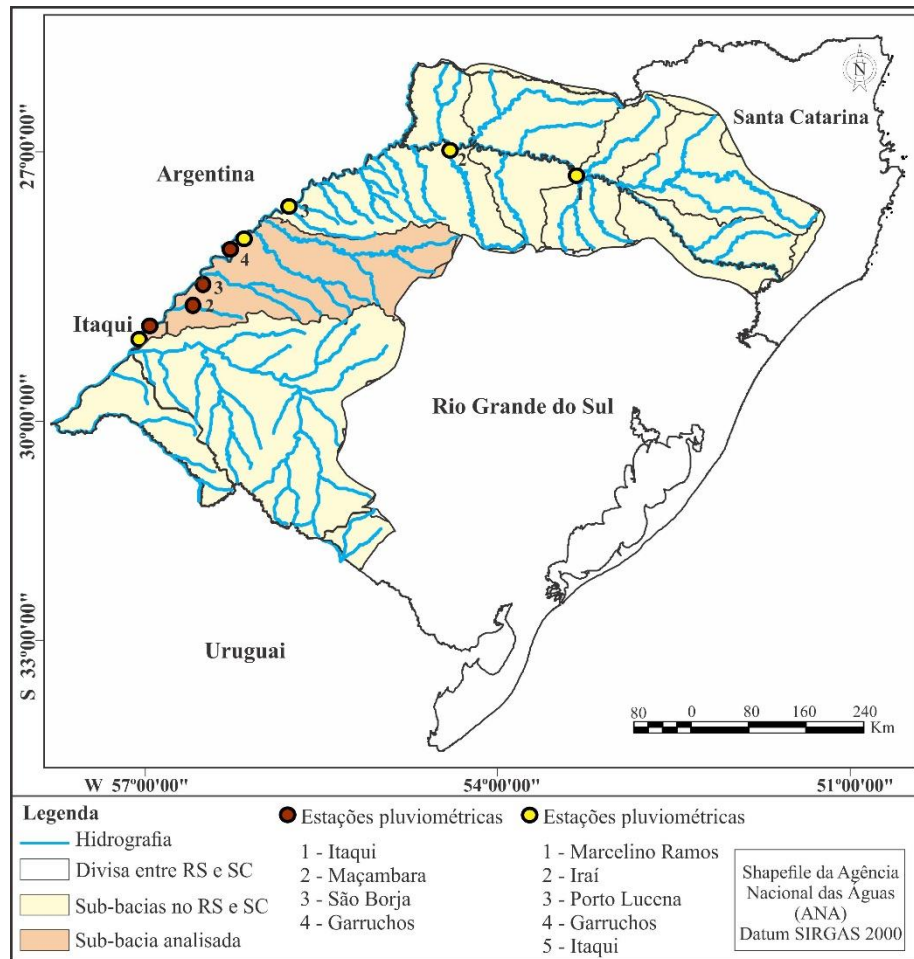


Figura 18 - Localização das estações pluviométricas e fluviométrica na BHRU, RS e SC.

Foram selecionados seis eventos, levando em consideração a maior quantidade de dados completos, que compreendem aos seguintes períodos: 1) 21-04/novembro/2008; 2) 16-30/novembro/2009; 3) 13-27/julho/2011; 4) 23-07/outubro/2014 e 5) 24-07/01/2015. Foram comparados os volumes de chuva de cada evento de inundação e a distribuição temporal da precipitação, considerando o período de sete dias que antecederam a cota de 8 m, nível de alerta padrão para o rio Uruguai. O nível médio do rio Uruguai é de 3,50 m, e a cota de inundação para o município de Itaqui é 8,50 m (DEFESA CIVIL, 2019).

O tempo de retorno (TR) se refere às cotas máximas anuais (estação fluviométrica) obtidas na série histórica entre os anos de 1940 e 2018 (78 anos a série). Para tal foi utilizada a estação fluviométrica de Itaqui, localizada em médio curso do rio Uruguai. O cálculo da TR (período que decorre entre duas cheias de igual magnitude) se baseou no método empírico de

Christofolletti (1981), e compreende a seleção do evento de maior magnitude em cada ano da série histórica, o ordenamento dos eventos conforme a sequência de magnitude dos valores mais elevados para os menores e a aplicação da seguinte equação (1):

$$TR = \frac{N+1}{M} \quad (1)$$

Em que: TR: tempo de retorno; N: é o número total de eventos considerados na série; M: é o número de ordem que representa a posição da inundação na escala organizada.

Também foi utilizado os método de distribuição empírica de Kimball e Califórnia (Equações, 2 e 3), no qual consistem em estimar a frequência para os valores máximos, nos quais os dados observados devem ser classificados em ordem decrescente e a cada um atribui-se o seu número de ordem. A frequência com que foi igualado ou superado um evento de ordem m em um conjunto de N amostras pode ser dada por (Equações 2 e 3):

$$f = \frac{m}{N+1} \text{ ou } f = \frac{m}{n} \quad (2)$$

$$TR = \frac{1}{p} \quad (3)$$

O método de distribuição estatístico de Gumbel (equação 4) também foi utilizado e assim foram estimados os TR de 2, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 75, 100 e 150 anos respectivamente. Também conhecida como distribuição de eventos extremos ou de FisherTippett e é aplicada a eventos extremos, em séries anuais.

$$x = \bar{x} - 0,45 * S - 0,7797 * S * \ln[-\ln(1 - \frac{1}{Tr})] \dots\dots\dots(4)$$

Em que:  $\bar{x}$  = média amostral; S = desvio padrão, Tr = tempo de retorno e os parâmetros que definem a distribuição,  $\alpha = 0,7797S$  e  $\beta = \bar{x} - 0,45S$ .

### 3 Resultados e Discussão

#### 3.1 Análise da série histórica das precipitações em Itaqui

A análise da precipitação total no município de Itaqui, no período de 1971 a 2018 (Figura 19), mostra que os totais pluviométricos mais expressivos ocorreram em 1986 (2695,8 mm), 2002 (2658,6 mm) e 1972 (2113,9 mm), 2008 aparece com menor expressão nos totais pluviométricos (922 mm).



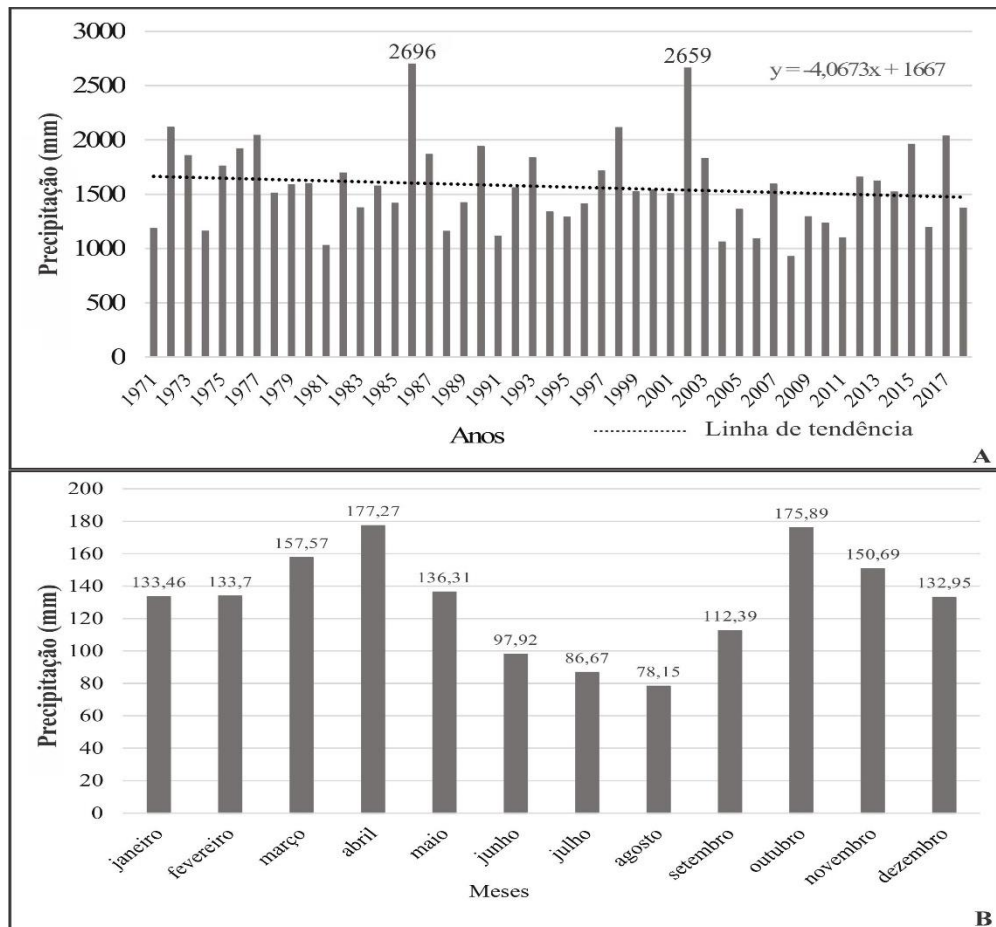


Figura 19 – Gráfico dos Totais Anuais de precipitações (A), Médias mensais de precipitações (B), entre 1971 e 2018, Itaqui - RS. Fonte: ANA (2018).

No Gráfico da Figura 19 B, da média mensal dos valores de precipitações, observa-se que os meses mais chuvosos foram abril (177,27 mm), outubro (175,89 mm) e março (157,57 mm), e menor que 100 mm os meses agosto (78,15 mm), julho (86,67 mm) e junho (97,92 mm).

A Figura 20 apresenta o gráfico do número de vezes em que cotas entre 8,5 m e 14 m atingiram seu pico máximo em determinado mês, no período entre 1940 e 2018. A cota de 8 m, é considerada nível de alerta para o rio Uruguai (DEFESA CIVIL, 2019). A medida que aumentam os valores de cota, a sua frequência de ocorrência diminui. A ocorrência de cotas entre 11 e 14 m é menor, com 19 registros, isto se deve ao tempo de retorno de eventos de tamanha magnitude. A cota de 12 m ocorreu nos meses de junho, julho, setembro, outubro e novembro, a cota de 13 m nos meses de junho, julho e outubro e a cota de 14 m apenas em julho de 1983, Figura 21.

Ao analisar as inundações no município de São Borja, Righi (2010) destaca que outubro tem maior incidência de eventos de inundação (8 eventos), seguido de julho (7) e maio (6). Em Itaqui a cota de inundação de 8,5 foi atingida e/ou ultrapassada 22 vezes no mês de outubro

(Tabela 8). Sartori (1993a) destaca que outono é a estação com o maior número de registros de inundações, as causas são a reconfiguração dos sistemas atmosféricos, entretanto uma reconfiguração de uma condição de verão com o hemisfério sul mais aquecido, para condições de inverno.

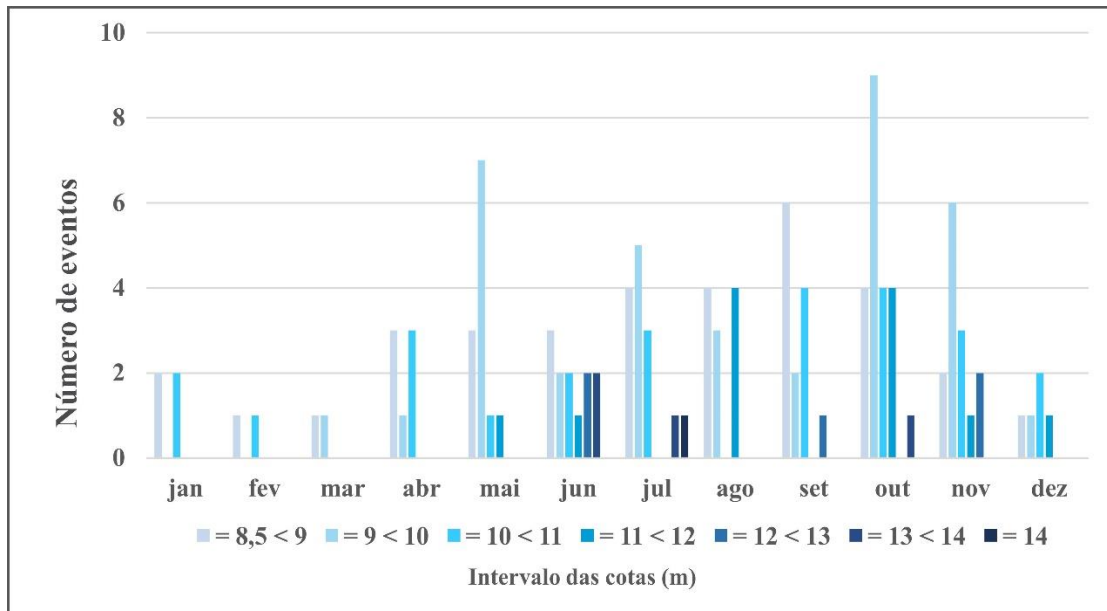


Figura 20 - Gráfico da Frequência das cotas máximas, entre 1971 e 2018, Itaqui - RS.

Fonte: ANA (2018)

A frequência dos eventos, Tabela 8, mostra os eventos de inundação em decorrência do nível de cota máxima, a partir de 8,5 m. O mês de outubro é o mais significativo até 2018 (24 eventos), seguido de novembro (19 eventos). Os meses de fevereiro, março e janeiro tiveram as menores frequências (2, 3, 4 eventos, respectivamente), conforme a Figura 20.

Ao catalogar os eventos adversos no Rio Grande do Sul, no período entre 1980 e 2005, Reckziegel (2007) destaca 1258 ocorrências desencadeadas por inundações. Os anos de 1983 e 1984 registraram maior número de eventos (155 e 145 ocorrências, respectivamente). A estação do ano com maior número de registros por municípios é o inverno, seguido do outono, primavera e o verão.

Tabela 8 - Número de eventos em relação ao nível de cota, Itaqui (1971-2018)

Cota (m)	Intervalo das cotas						
	≥ 8,5 e < 9	≥ 9 e < 10	≥ 10 e < 11	≥ 11 e < 12	≥ 12 e < 13	≥ 13 e < 14	≥ 14
Nº de eventos	34	37	25	12	5	4	1

A Figura 21 apresenta o quadro dos tempos de retornos empíricos pelos métodos de Kimball e Califórnia, os quais são baseados apenas nas observações. Os tempos de retorno referem-se às cotas máximas na série histórica entre os anos de 1940 – 2017 para a estação fluviométrica de Itaqui. Ao comparar os dois métodos empíricos observa-se uma pequena diferença entre ambos para o valor de TR. Pelos dois métodos, a cota máxima observada de 14,52 m, apresenta probabilidade de frequência de 1,28% para TR de 79 e 78 anos respectivamente.

Ano	Ordem	Cota (cm)	Kimball		Califórnia		Ano	Ordem	Cota (cm)	Kimball		Califórnia	
			f (%)	TR (anos)	f (%)	TR (anos)				f (%)	TR (anos)	f (%)	TR (anos)
1983	1	1452	1,27	79,0	1,28	78,0	1957	40	895	50,63	2,0	51,28	2,0
1990	2	1360	2,53	39,5	2,56	39,0	1969	41	893	51,90	1,9	52,56	1,9
1997	3	1330	3,80	26,3	3,85	26,0	1955	42	890	53,16	1,9	53,85	1,9
2017	4	1321	5,06	19,8	5,13	19,5	1966	43	883	54,43	1,8	55,13	1,8
2014	5	1320	6,33	15,8	6,41	15,6	1947	44	874	55,70	1,8	56,41	1,8
1972	6	1257	7,59	13,2	7,69	13,0	1971	45	871	56,96	1,8	57,69	1,7
1992	7	1244	8,86	11,3	8,97	11,1	1975	46	867	58,23	1,7	58,97	1,7
1963	8	1205	10,13	9,9	10,26	9,8	1999	47	865	59,49	1,7	60,26	1,7
2005	9	1167	11,39	8,8	11,54	8,7	2007	48	854	60,76	1,6	61,54	1,6
1965	10	1165	12,66	7,9	12,82	7,8	1956	49	848	62,03	1,6	62,82	1,6
1979	11	1132	13,92	7,2	14,10	7,1	1980	50	839	63,29	1,6	64,10	1,6
1954	12	1130	15,19	6,6	15,38	6,5	1978	51	837	64,56	1,5	65,38	1,5
1961	13	1119	16,46	6,1	16,67	6,0	1959	52	826	65,82	1,5	66,67	1,5
2015	14	1119	17,72	5,6	17,95	5,6	1985	53	824	67,09	1,5	67,95	1,5
1984	15	1114	18,99	5,3	19,23	5,2	1995	54	819	68,35	1,5	69,23	1,4
1982	16	1100	20,25	4,9	20,51	4,9	1948	55	810	69,62	1,4	70,51	1,4
1998	17	1091	21,52	4,6	21,79	4,6	1977	56	810	70,89	1,4	71,79	1,4
2002	18	1084	22,78	4,4	23,08	4,3	1976	57	804	72,15	1,4	73,08	1,4
2008	19	1081	24,05	4,2	24,36	4,1	1970	58	803	73,42	1,4	74,36	1,3
2009	20	1075	25,32	4,0	25,64	3,9	1941	59	800	74,68	1,3	75,64	1,3
2016	21	1073	26,58	3,8	26,92	3,7	1946	60	799	75,95	1,3	76,92	1,3
1989	22	1057	27,85	3,6	28,21	3,5	1952	61	793	77,22	1,3	78,21	1,3
1986	23	1052	29,11	3,4	29,49	3,4	1943	62	785	78,48	1,3	79,49	1,3
1953	24	1047	30,38	3,3	30,77	3,3	2013	63	770	79,75	1,3	80,77	1,2
1987	25	1046	31,65	3,2	32,05	3,1	1958	64	757	81,01	1,2	82,05	1,2
2003	26	1039	32,91	3,0	33,33	3,0	2004	65	755	82,28	1,2	83,33	1,2
1994	27	1012	34,18	2,9	34,62	2,9	2012	66	734	83,54	1,2	84,62	1,2
1967	28	995	35,44	2,8	35,90	2,8	1991	67	730	84,81	1,2	85,90	1,2
1940	29	994	36,71	2,7	37,18	2,7	1988	68	698	86,08	1,2	87,18	1,1
1942	30	985	37,97	2,6	38,46	2,6	1974	69	685	87,34	1,1	88,46	1,1
1950	31	966	39,24	2,5	39,74	2,5	2006	70	680	88,61	1,1	89,74	1,1
1973	32	965	40,51	2,5	41,03	2,4	1949	71	668	89,87	1,1	91,03	1,1
1951	33	962	41,77	2,4	42,31	2,4	1964	72	667	91,14	1,1	92,31	1,1
2011	34	940	43,04	2,3	43,59	2,3	1996	73	655	92,41	1,1	93,59	1,1
1960	35	934	44,30	2,3	44,87	2,2	1968	74	639	93,67	1,1	94,87	1,1
1993	36	920	45,57	2,2	46,15	2,2	1944	75	534	94,94	1,1	96,15	1,0
2000	37	920	46,84	2,1	47,44	2,1	1945	76	530	96,20	1,0	97,44	1,0
2001	38	919	48,10	2,1	48,72	2,1	1962	77	483	97,47	1,0	98,72	1,0
2010	39	907	49,37	2,0	50,00	2,0	1981	78	474	98,73	1,0	100,00	1,0

Figura 21 – Quadro dos Tempos de retorno empíricos métodos de Kimball e Califórnia.  
Fonte: ANA (2018).

A partir da Tabela 9 dos tempos de retorno (TR) estimados pela distribuição de Gumbel, observa-se diferenças em relação aos métodos empíricos de Kimball e Califórnia. A distribuição de Gumbel é muito utilizada para análise de máximos, apresentando bons resultados, sendo considerada entre as distribuições estatísticas, uma das mais precisas. Foram delimitados dez TR de 2, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 75, 100 e 150 anos respectivamente.

O TR de 2 anos atinge uma cota máxima de 8,99 m, sendo que o TR de 30 anos é o que mais se aproxima da cota máxima registrada de 14,52 m. Pelo método de Gumbel, com este TR alcançaria a cota de 14,62 m. Baptista et al. (2005) destaca que o tempo de retorno é o intervalo médio decorrido entre duas ocorrências sucessivas de um dado evento ou sua superação.

Tabela 9 – TR estimado pela distribuição de Gumbel

TR (anos)	Distribuição de Gumbel
	Cota (cm)
2	899
5	1111
10	1251
15	1330
20	1385
30	1462
50	1559
75	1635
100	1689
150	1765

### 3.2 Análise dos padrões de distribuição temporal das chuvas nos eventos de inundação

Os eventos de 2008 e 2011 (Tabela 10), apresentaram os menores valores de precipitação média observada em 15 dias antecedentes ao pico máximo do evento (cota e vazão) e por consequência menor desvio padrão. O evento de 2011 apresentou os menores picos de cota e vazão em comparação aos demais. Destaca-se que o aumento da cota e vazão ocorreram de forma gradual para a estação fluviométrica de Itaquí. Os eventos analisados por Righi (2011) em outubro de 2008, apresentaram maior precipitação acumulada, chegando a quase 2500 mm.

Tabela 10 - Valores de precipitação média e desvio padrão de estações pluviométricas da sub-bacia Ijuí e de vazão e cota registrados na estação fluviométrica de Itaqui.

<b>Ano</b>	<b>Dia (pico máx.)</b>	<b>Precipitação Média (15 dias)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>2008</b>	<b>04/11/2008</b>		
<b>Vazão Máx. (m<sup>3</sup>/s)</b>	13.742	3,16	10,27
<b>Cota Máx. (m)</b>	10,81		
<b>2009</b>	<b>30/11/2009</b>		
<b>Vazão Máx. (m<sup>3</sup>/s)</b>	13.626	18,39	24,52
<b>Cota Máx. (m)</b>	10,75		
<b>2011</b>	<b>27/07/2011</b>		
<b>Vazão Máx. (m<sup>3</sup>/s)</b>	11.073	7,13	14,70
<b>Cota Máx. (m)</b>	9,39		
<b>2014</b>	<b>07/10/2014</b>		
<b>Vazão Máx. (m<sup>3</sup>/s)</b>	14.442	18,60	34,73
<b>Cota Máx. (m)</b>	11,16		
<b>2015</b>	<b>07/01/2015</b>		
<b>Vazão Máx. (m<sup>3</sup>/s)</b>	12.535	13,12	22,76
<b>Cota Máx. (m)</b>	10,18		

Fonte: ANA (2018).

O evento de 2014 apresentou maior diferença entre a precipitação média e o desvio padrão, seguido do evento de 2015 Também foi no evento de 2014 que se obtiveram os maiores valores de cota e vazão entre as datas analisadas. Righi (2011) ao analisar os tipos de classes de intensidade chuva no rio Uruguai, destaca que as chuvas de classe 2 (10,1 – 50 mm) e 3 (50,1 – 100 mm), ocorridas por mais de um dia, aumentam consideravelmente o nível do rio Uruguai, provocando inundações em médio curso. Em alguns eventos, mesmo ocorrendo apenas chuvas de classe 1 (0,2 – 10 mm), em São Borja, as precipitações de classe 3 em médio e alto curso, são suficientes para que o nível do rio aumente mais de 11 m.

Dehn e Buma (1999) destacam que chuvas de classe 3 e 4, representam os eventos de baixa frequência e alta intensidade, indicadas como as maiores causas de inundações. Esses eventos pouco contribuem para a manutenção da estabilidade hidrológica do geocossistema, uma vez que o volume de água produzido é rapidamente perdido pelo sistema na forma de escoamento superficial (FIGUEIRÓ, 2005).

Ao relacionar precipitações e vazões (TUCCI, 2001) verificou que o tempo médio de deslocamento das águas ao longo da bacia é em torno de 4 dias da montante até Porto Lucena e de 5 dias até São Borja. Assim, é necessário ocorrerem chuvas de mais de um dia de alta intensidade em alto curso, para que ocorra aumento da vazão e sejam registradas inundações em São Borja (RIGHI, 2010).

Na Tabela 11 os dados de cota de 5 estações fluviométricas, localizadas em alto e médio curso, mostram que em alto curso, o nível do rio Uruguai pode elevar-se rapidamente. Porém com a mesma velocidade que pode subir, também pode baixar com a mesma velocidade, abruptamente. Ao comparar a cota em Itaqui com as demais estações à montante, ressalta-se que o nível do rio eleva-se de forma mais lenta, do que ocorre em alto curso.

Tabela 11 - Estações fluviométricas à jusante de Itaqui - RS.

<b>Cotas (m) 2014</b>							
<b>Estação</b>	<b>1°</b>	<b>2°</b>	<b>3°</b>	<b>4°</b>	<b>5°</b>	<b>6°</b>	<b>7°</b>
Marcelino Ramos	2,06	2,65	2,16	4,19	5,24	5,62	4,06
Iraí	2,37	2,82	2,08	4,54	8,66	9,70	6,57
Porto Lucena	2,09	2,18	2,13	3,03	6,23	10,45	10,91
Garruchos	2,98	3,56	3,18	4,89	8,64	13,83	16,47
Itaqui	4,46	4,19	4,13	4,16	4,89	6,78	8,19
<b>Cotas (m) 2009</b>							
<b>Estação</b>	<b>1°</b>	<b>2°</b>	<b>3°</b>	<b>4°</b>	<b>5°</b>	<b>6°</b>	<b>7°</b>
Marcelino Ramos	1,6	1,58	2,81	3,15	2,66	2,09	1,83
Iraí	2,97	2,94	2,8	2,63	2,54	2,68	2,65
Porto Lucena	2,66	2,29	2,54	3,09	2,77	2,49	2,21
Garruchos	5,12	4,84	6,14	7,16	7,30	6,62	6,14
Itaqui	5,65	6,21	6,76	7,30	7,71	8,00	8,16

Fonte: ANA (2018).

A construção de usinas hidrelétricas no rio Uruguai afeta diretamente as inundações em municípios como Porto Lucena e São Borja. As UHE Machadinho e Itá, no alto rio Uruguai acarretam mudanças no fluxo de água, quando aumentado por regimes elevados de precipitação, minimizando as inundações em médio curso. Os reservatórios reduzem a vazão no rio à jusante da barragem, prolongando a duração do período de cheia. O volume retido no período de precipitações elevadas faz com que as vazões em muitos episódios não ultrapassem a calha natural do rio (RIGHI, 2011). A Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil (2015) destaca que apesar do número elevado de reservatórios no rio Uruguai, eles operam com pequenos volumes de espera, quando comparados aos grandes volumes afluentes, resultando em pequena capacidade de amortecimento de cheias.

A vazão média no rio Uruguai é de 4.103 m<sup>3</sup>/s, e corresponde a 2,3% da vazão média nacional (179.516 m<sup>3</sup>/s), a vazão de retirada (demanda total) é de 155,4 m<sup>3</sup>/s e a específica, de 23,5 L/s/km<sup>2</sup> (REGIÕES HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS, 2015). O Caderno da Região Hidrográfica do Uruguai (2006) destaca que esta bacia possui baixa capacidade de armazenamento. Esta característica é atribuída à sua geomorfologia, de relevo acidentado no

trecho alto e trecho mais plano na região da Campanha Gaúcha. Com solo pouco profundo, o rio escoar em leito rochoso, implicando em um regime de vazões que acompanha o regime de chuvas.

A maior cota de inundação no rio Uruguai em Itaquí foi registrada em julho de 1983, quando atingiu o pico de 14,52 m, com TR de 68 anos. Conforme a ordem decrescente na tabela de TR, 1983 ocupa o primeiro lugar. Os 5 primeiros no ranking de TR foram: 1983, 1990, 1997, 2017 e 2014, ambos em torno de 13,5 m, com exceção de 1983, que ultrapassou a cota de 14 m.

De acordo com as classes de relevo da bacia do rio Uruguai e suas sub-bacias, Itaquí está inserida na sub-bacia 75, de relevo predominantemente plano, com declividades que variam entre 0 e 3%. Souza *et al.* (2017) destacam que ao considerar o relevo de cada uma das sub-bacias do rio Uruguai, quando a precipitação é mais concentrada sobre a região central nas cabeceiras, mesmo que por um período curto de tempo, o rio apresenta uma rápida elevação de cota no município de Uruguaiana. Quando as precipitações ocorrem nas regiões de relevo mais íngremes não são necessários altos volumes para a elevação do rio, e consequente inundação no município, visto que há maior escoamento superficial de alta velocidade nestas regiões. Itaquí, por estar a montante de Uruguaiana e ambas com relevo plano na sua planície de inundação, apresentam uma rápida elevação no nível do rio, em decorrência do seu relevo.

A variação do nível ou da vazão de um rio depende das características climatológicas e físicas da bacia hidrográfica, sendo que as distribuições temporal e espacial da precipitação são as principais condições climatológicas. Quando altos índices pluviométricos são observados, estes foram provocados por atuação de sistemas frontais sobre a área (TUCCI *et al.*, 2013).

Cavalcanti *et al.* (2009) destacam que sistemas frontais atuam sobre a região durante todo o ano e possuem uma frequência que varia de 30 a 40 sistemas por ano, sendo mais frequentes entre maio e setembro. Nesse estudo, observou-se que entre maio e novembro a frequência de eventos é bem maior. Os meses mais chuvosos em Itaquí (Gráfico 2), são respectivamente abril, outubro e março, o que permite inferir que a participação das precipitações das sub-bacias a montante de Itaquí, com relevo ondulado têm participação fundamental na elevação do nível do rio.

#### **4. Conclusões**

O padrão temporal de distribuição das chuvas na bacia do rio Uruguai é do tipo concentrado, para a maioria dos eventos analisados, com maiores picos de cotas máximas e de

vazão. As chuvas locais têm uma participação considerável na elevação das águas em Itaqui, porém é importante destacar que as chuvas regionais são as que mais influenciam na dinâmica dos eventos de inundação no rio Uruguai. As precipitações nas cabeceiras do rio Uruguai, com sua declividade acentuada, acarretam no aumento da vazão. Porém, a presença de usinas hidrelétricas no rio Uruguai interfere na ocorrência de inundações, pois os reservatórios retêm temporariamente parte do volume da água escoada. Esta água é descarregada à jusante com uma vazão menor em relação àquela que ocorreria no desenvolvimento do fenômeno natural, e por consequência aumenta o tempo de duração do período de cheia, devido ao represamento das águas. Tanto as chuvas locais quanto as regionais interferem diretamente na magnitude dos eventos. O volume, a duração e a distribuição espacial e temporal das precipitações, estão diretamente relacionadas à dimensão de eventos extremos de precipitações que ocasionam inundações devido a chuvas fortes e/ou prolongadas no rio Uruguai.

## 5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## 6. Referências

ANA. 2016. Agência Nacional de Águas. HIDROWEB – Séries Históricas. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/.htm>>. Acesso em: 07 nov. 2017.

CADERNO DA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO URUGUAI. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília – Distrito Federal, 128p, 2006.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, J.F.; JUSTI DA SILVA, M.G.A.; SILVA DIAS, M. A. F. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo, Oficina de Textos, 463p, 2009.

CEPED/RS-UFRGS. 2016. Capacitação em gestão de riscos [recurso eletrônico] / Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. – 2. ed. – Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016. 270 p. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/grid>>. Acesso em: 10 out. 2016.

CEPED (Centro Universitário sobre Estudos e Pesquisas sobre Desastres/Universidade Federal de Santa Catarina). Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2010. Volume Rio Grande do Sul. 185p, 2012.

CONJUNTURA DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL: REGIÕES HIDROGRÁFICAS BRASILEIRAS – EDIÇÃO ESPECIAL. Agência Nacional das Águas. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, 2015. 163p.



Disponível em: < <http://www.snrh.gov.br/portal/snrh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>>. Acesso em: 03 jun. 2019.

DEFESA CIVIL. 2019. Defesa Civil Rio Grande do Sul. Disponível em: < <https://www.defesacivil.rs.gov.br/inicial>>. Acesso em: 30 mai. 2019.

DEHN, M.; BUMA, J. Modeling future landslide activity base don general circulation models. *Geomorfology*, v. 30, p. 175-187, 1999.

FERREIRA NETO, J. V. 2001. Regiões climatologicamente homogêneas do Estado de Alagoas com base na análise espaço-temporal da pluviometria. 215 p. Tese de Doutorado - Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2001.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/itaqui/panorama>>. Acesso em 20 abr. 2019.

OGASSAWARA, J. F.; GASS, S. L. B. Análise morfométrica dos afluentes principais da bacia hidrográfica do rio Uruguai e sua influência nas inundações na cidade de Itaqui, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Geomática**. v. 6, n. 3, p. 222-240, 2018.

RECKZIEGEL, B. W. Levantamento dos desastres desencadeados por eventos naturais adversos no Estado do Rio Grande do Sul no período de 1980 a 2005. 284 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007

RIGHI, E. ROBAINA, L. E de. S. Análise das áreas de perigo a inundação nos municípios de São Borja, Itaqui e Uruguaiana, localizados em médio curso do rio Uruguai – RS. VIII Simpósio Nacional de Geomorfologia, III Encontro Latino Americano de Geomorfologia, I Encontro Ibero-americano de Geomorfologia, I Encontro Ibero-americano do Quaternário. 2010. Recife. 16p.

RIGHI, E. Risco a inundação em médio curso do rio Uruguai: um estudo de caso nos municípios de Porto Lucena e São Borja. 222 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SOUZA, D. O DE; LINO, J. F. DE L; BERNARDES, T; SATO, E. N; FIRMINO, M. B. M. Padrões meteorológicos e morfológicos associados à eventos de inundação do rio Uruguai: estudo de caso para o município de Uruguaiana-RS. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 69, n. 4, p. 621-633, 2017.

TOMINAGA L. K; SANTORO, J; AMARAL, R. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico. 196p, 2009.

TUCCI, C. E. M; DA SILVEIRA, A. L. L; BERTONI, J. C; LANNA, A. E; CAICEDO, N. L; LOUZADA, J. A; BELTRAME, L; CHEVALLIER, P; CLARKE, R. T.; PORTO, R. L.; ZAHED FILHO, K.; BENETTI, A.; BIDONE, F.; PESSOA, M. L.; BORDAS, M. P.; SEMMELMAN, F. R. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre, Editora UFRGS, 943p, 2013.

**ARTIGO 4 - COMPARAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES NDWI, MNDWI E NDPI PARA O MAPEAMENTO DE PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO.**

## COMPARAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES NDWI, MNDWI E NDPI PARA O MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES

**Greice Vieira SILVEIRA<sup>1</sup>, Laurindo Antonio GUASSELLI<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto / Universidade Federal do Rio Grande do Sul. - Campus do Vale.  
Porto Alegre - RS – Brasil. Emails: greice.v.silveira@gmail.com; laurindo.guasselli@ufrgs.br

**Resumo** O presente trabalho objetiva identificar áreas de inundações a partir de diferentes índices espectrais, e comparar a sua eficiência no mapeamento de inundações por meio de classificações. A área de estudo corresponde a uma seção do rio Uruguai e afluentes, com destaque para o município de Itaqui ao norte e o rio Ibicuí ao sul. Foram realizadas operações aritméticas nas imagens Landsat TM 5, na data de 05/12/2009, para o mapeamento das áreas inundadas. A partir dos índices espectrais NDWI, MNDWI e NPDI foram realizadas classificações supervisionadas. Para validar as classificações realizadas foi utilizado o algoritmo MAXVER e posteriormente os índices Kappa e Tau. Os três índices apresentaram um bom contraste entre corpos d'água e os demais alvos da imagem, permitindo uma melhor eficiência na identificação das áreas inundadas, e demais corpos d'água, O classificador MAXVER conseguiu identificar pequenas áreas úmidas no MNDWI e NPDI. O desempenho geral foi satisfatório para os três índices, com diferenças pouco significativas para os índices Kappa e Tau.

**Palavras-chave:** Índices Espectrais, Áreas Úmidas, Classificação não Supervisionada.

### 1 Introdução

Índices espectrais são medidas radiométricas capazes de identificar em imagens digitais a abundância relativa e a atividade de determinados tipos de informações (FRANÇA et al., 2012). Podem ser obtidos a partir da razão entre bandas, e utilizados para realçar as diferenças espectrais entre duas ou mais bandas, caracterizando determinadas feições da curva de assinatura espectral de alguns alvos (INPE, 2006).

Os índices espectrais da água como o NDWI (*Normalized Difference Water Index*) são mais utilizados em áreas úmidas como as planícies de inundação (BRUBACHER & GUASSELLI, 2013; BORGES *et al.*, 2015; BRENNER, 2016; PEREIRA *et al.*, 2018); o MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*) para identificação de corpos d'água e mapeamento de áreas úmidas (WANG *et al.*, 2013; SAAVEDRA *et al.*, 2015; REIS *et al.*, 2015); e o NDPI (*Normalized Difference Pond Index*) para definir limites e classificar áreas úmidas, especialmente de lagos (JI *et al.*, 2009; RAY *et al.*, 2012; MOZUMDER *et al.*, 2014; KUMAR, 2015; BITTENCOURT e GUASSELLI, 2017).

O índice espectral para determinação de corpos d'água é um número único, derivado de uma operação aritmética de duas ou mais bandas espectrais (JI *et al.*, 2009). Parte do contexto de que a água absorve energia em comprimentos de onda do infravermelho próximo e de ondas curtas de infravermelho (entre 740 e 2.500 nm). Segundo Jensen (2009), são os melhores comprimentos de onda para discriminar terra de água, pois os corpos d'água se apresentam mais escuros em razão da alta absorção do fluxo radiante incidente. A distinção entre os elementos terra/água ficam realçadas devido a significativa reflectância da energia no infravermelho próximo e médio por parte da vegetação e do solo exposto.

Classificadores por pixel utilizam a informação espectral de cada pixel para encontrar regiões homogêneas (JENSEN, 2005). A classificação não supervisionada agrupa os pixels segundo as suas características espectrais, organizando-os em agrupamentos denominados de *clusters*. O usuário utiliza algoritmos para reconhecer as classes presentes na imagem. Os pixels são submetidos a um algoritmo que determina o agrupamento do dado, numa feição espacial de dimensão igual ao número de bandas presentes (INPE, 2019).

Os métodos de classificação que utilizam duas ou mais bandas, chamados de multibandas, baseados no índice espectral da água utilizam as diferenças de reflectância de cada banda envolvida para extrair informações de corpos d'água, com base na análise das diferenças de comportamento entre a água e outros elementos (XU, 2006; REIS & SAAVEDRA, 2015).

Assim, o objetivo do trabalho foi identificar áreas de inundações a partir de diferentes índices espectrais (NDWI, MNDWI e NDPI) e comparar suas diferenças a partir de classificações. Além disso, é relevante classificar as imagens resultantes dos índices espectrais, por meio de classificação supervisionada, utilizando o algoritmo Máxima Verossimilhança (MAXVER) e os índices Kappa e Tau para validar os dados.

## 1.1 Área de estudo

O rio Uruguai tem suas nascentes na confluência dos rios Pelotas e Canoas, e divide os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina e faz limite com a Argentina. A área total drenada pela Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai (conforme Resolução CNRH n.º 30/2003), é de cerca de 385.000 km<sup>2</sup>. Seus principais tributários estão situados no setor leste da bacia. A vazão média anual é de 3600m<sup>3</sup>/s e seu volume médio anual é de 114 km<sup>3</sup> (Caderno da Região Hidrográfica do Uruguai, 2006).

Sausen & Reis (2013) mapearam os municípios do Rio Grande do Sul que decretaram Situação de Emergência, em decorrência de inundações e enxurradas, no período entre 1980 e

2012. Verificaram que a maioria dos municípios localizados próximos ao rio Uruguai, apresentam pelo menos um Decreto de Situação de Emergência. E que nos meses de inverno e outono apresenta maior registro de decretos de inundação, enquanto na primavera há mais registros para as enxurradas.

A área de estudo corresponde a uma seção do rio Uruguai e afluentes (com destaque para o rio Ibicuí), Figura 22, situada na fronteira entre a Argentina e o Brasil, na margem esquerda do rio Uruguai no Estado do Rio Grande do Sul. Este trecho do rio apresenta alta suscetibilidade a inundações em frequência e impactos (ANA, 2016).

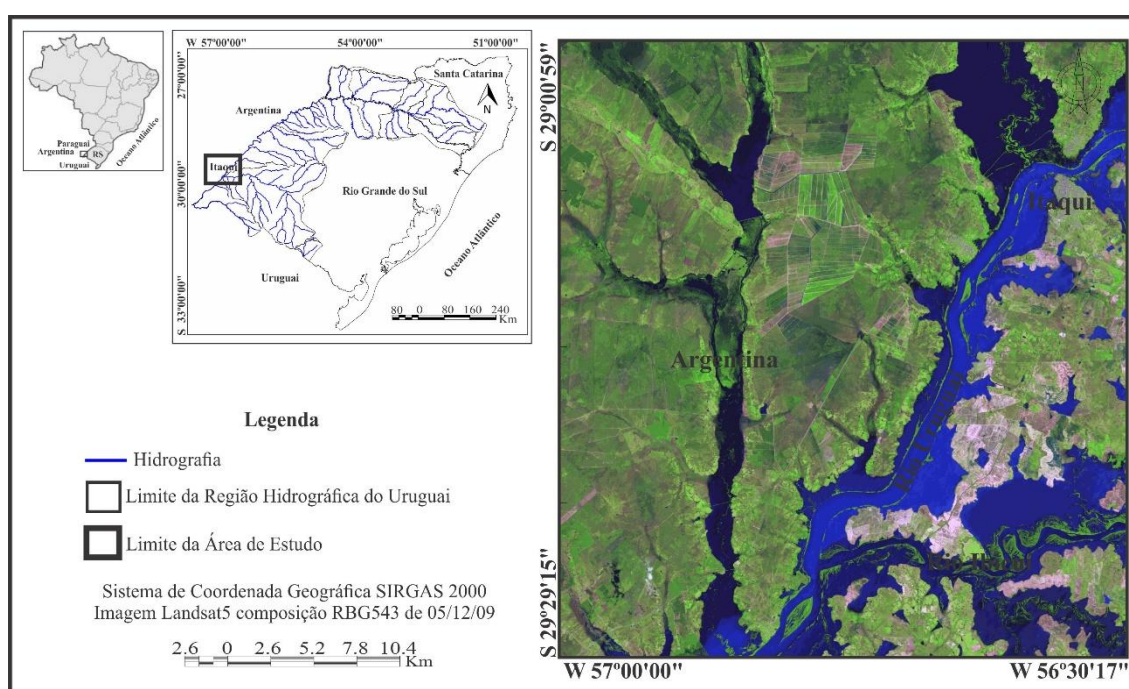


Figura 22 – Localização da área de estudo, município de Itaqui – RS

## 2 Metodologia

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizadas imagens Landsat TM 5, na data de 05/12/2009, correspondente à órbita/ponto 225/80, com ausência de nuvens. As imagens são disponibilizadas gratuitamente no site do Serviço Geológico Norte Americano (U.S. Geological Survey - USGS), no catálogo de imagens do *EarthExplorer*, e processadas sob demanda no site da ESPA-USGS, com correção atmosférica e convertida para reflectância de superfície (produto *Landsat Surface Reflectance*).

Foi criado um banco de dados geográfico no software Spring 5.4.3, com as imagens georreferenciadas a partir de uma imagem do Landsat OLI 8 georreferenciadas. Foram

realizadas operações aritméticas para o mapeamento das áreas inundadas, por meio dos índices espectrais e posteriormente a soma entre os três índices (NDWI, MNDWI e NDPI). A partir da soma entre os índices, foram obtidas imagens que demonstraram as diferenças encontradas no produto soma.

Foi realizada uma classificação supervisionada, com o classificador Máxima Verossimilhança (MAXVER), com limiar de aceitação de 99,9%, para duas classes temáticas, água e não água. O classificador MAXVER associa classes considerando pontos individuais da imagem e assume que essas classes possuem distribuição normal, a partir dos parâmetros definidos e uma amostra de pixels adquiridas a priori, o algoritmo computa a probabilidade estatística de um pixel desconhecido pertencer a uma ou outra classe (SILVA *et al.*, 2011; LEITE & ROSA, 2012). Para avaliação da acurácia dos mapeamentos, foram utilizados os índices Kappa e Tau. Novo (2010) destaca o índice Kappa avalia a concordância dos dados em campo com os mapas elaborados por meio da classificação.

## 2.1 Índices espectrais

São métodos que utilizam índice espectral da água e realçam o sinal espectral contrastando a reflectância entre distintos comprimentos de onda, facilitando o processo de classificação em relação aos outros elementos (REIS & SAAVEDRA, 2015). O uso de índices espectrais para mapeamento de corpos d'água podem apresentar resultados mais precisos do que métodos gerais de classificação (LI *et al.*, 2013).

A partir do índice de diferença normalizada da vegetação (NDVI), McFeeters (1996), desenvolveu o índice de água por diferença normalizada – NDWI (*Normalized Difference Water Index*).

$$NDWI = \frac{\rho_{green} - \rho_{IVP}}{\rho_{green} + \rho_{IVP}} \quad \text{Equação (1)}$$

Em que:  $\rho_{green}$  e  $\rho_{IVP}$  são as bandas de reflectância do verde e infravermelho próximo, respectivamente.

O NDWI é expresso como a diferença normalizada entre a faixa do verde e NIR banda (ou SWIR). É utilizada a banda do verde, em vez da banda do vermelho porque o solo e a vegetação têm uma reflectância similar na banda do verde. Porém, apresenta reflectância de vegetação muito mais baixa na faixa do vermelho, devido à absorção da clorofila na vegetação verde.

Xu (2006) observou que McFeeters não conseguiu separar completamente as demais características do terreno em relação aos recursos hídricos. O NDWI proposto por McFeeters apresenta valores positivos em relação à áreas construídas que eram semelhantes à água, pois a reflectância do  $\rho_{IVP}$  foi menor do que a reflectância do  $\rho_{green}$ . Para compensar as desvantagens do NDWI de McFeeters, Xu (2006) propôs substituir a faixa do IVP pela faixa do SWIR, gerando o MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*).

$$MNDWI = \frac{\rho_{green} - \rho_{swir}}{\rho_{green} + \rho_{swir}} \quad \text{Equação (2)}$$

Em que:  $\rho_{green}$  e  $\rho_{SWIR}$  são as bandas de reflectância do verde e infravermelho médio, respectivamente.

O Índice de diferença normalizada para lagos (NDPI) foi utilizado por Lacaux *et al.* (2007) para a detecção de pequenas lagoas a partir de imagens de alta resolução. Também é usado para distinguir a vegetação presente nas lagoas. O NDPI é expresso como a diferença normalizada entre o SWIR e o  $\rho_{green}$ . Os valores de NPDI variam de -1 a 1, sendo os valores próximos a 1 relacionados aos corpos d'água ou áreas úmidas, e os próximos a -1 referente à áreas mais secas, e com menor teor de umidade na vegetação.

$$NDPI = \frac{\rho_{swir} - \rho_{green}}{\rho_{swir} + \rho_{green}} \quad \text{Equação (3)}$$

Em que:  $\rho_{SWIR}$  e  $\rho_{green}$  são as bandas de reflectância do infravermelho médio e do verde, respectivamente.

### 3 Resultados

Os resultados apresentam a análise dos índices NDWI, MNDWI e NDPI a partir das classificações supervisionadas MAXVER para o mapeamento de inundações.

#### 3.1 Análise dos índices espectrais da água

Nas imagens dos índices da água NDWI, MNDWI e NDPI, Figura 23, observa-se um forte contraste entre os corpos d'água e os demais alvos da imagem, identificando as áreas de inundação, e demais corpos d'água nas imagens. A reflectância da água ao utilizar o comprimento de onda do verde, minimiza a baixa reflectância dos corpos d'água no infravermelho próximo, realçando o contraste entre a água e a cobertura vegetal (MCFEETERS, 1996, MARTH *et al.*, 2016). Em trabalhos realizados para identificação e delimitação de áreas

úmidas, o NDWI apresentou resultados consistentes conforme CINQUINI & AZEVEDO (2012) e BRENNER & GUASSELLI (2015).

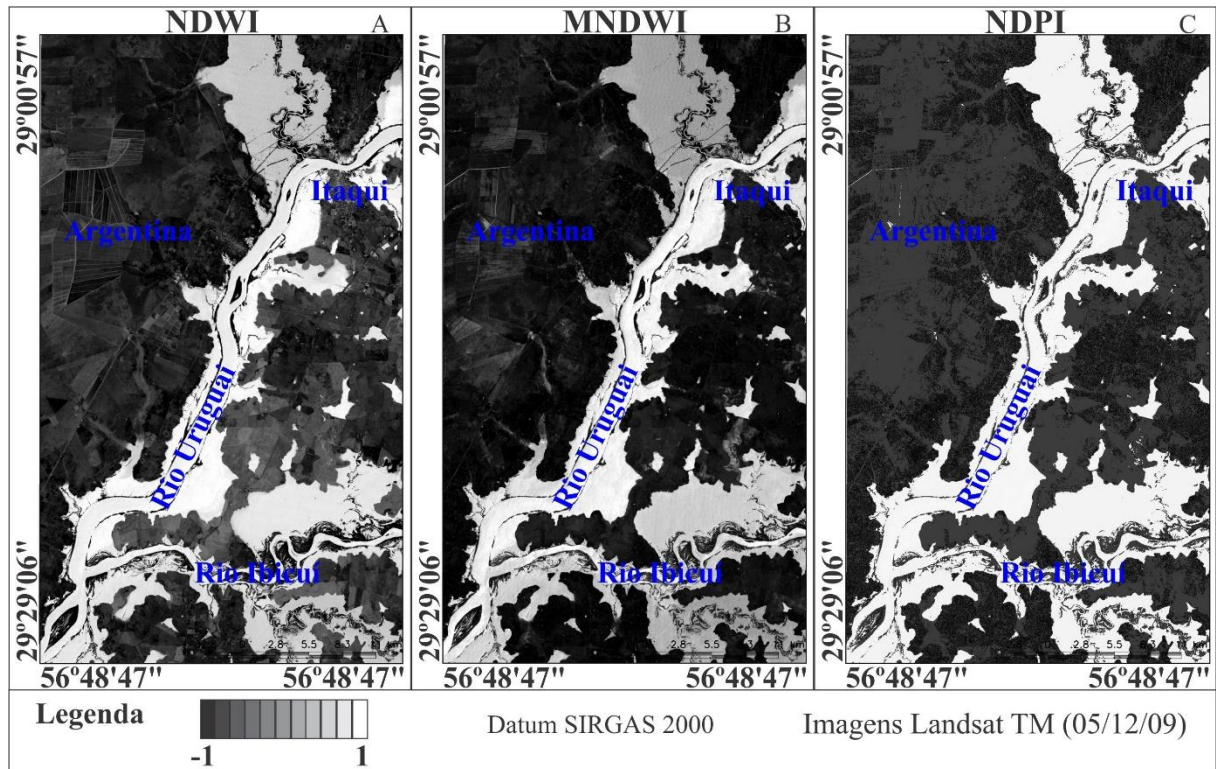


Figura 23 – Índices espectrais da água: NDWI (A), MNDWI (B), NDPI (C), imagens Landsat 5 de 05/12/09, seção do rio Uruguai - RS.

Marth *et al.* (2016) utilizaram duas classes de NDWI para mapear áreas úmidas e os usos da terra o que permitiu confirmar na primeira classe, os corpos d'água perenes e na segunda classe, as áreas alagadas, evidenciando o potencial do NDWI para o mapeamento da lâmina d'água e identificação de áreas alagáveis.

Gonzaga *et al.* (2011) identificaram forte relação do NDVI e NDWI com a intensidade pluviométrica. Ambos apresentaram os maiores valores para o período chuvoso, uma vez que a vegetação nativa responde fortemente a ocorrência dos eventos pluviométricos. O NDVI é um índice sensível ao verde da vegetação e o NDWI ao teor de água, essas variáveis apresentaram uma forte relação, sendo a correlação mais acentuada para o período chuvoso.

Azira *et al.* (2013) destacam que o NDWI e o MNDWI, possuem uma interpretação inversa, já que seus valores representam informações de regiões diferentes do espectro (500 nm – 800 nm), relacionadas à absorção de água no conteúdo foliar. Estes índices maximizam a refletância da água contra a absorção radiométrica da vegetação e do solo. Desta forma, os



valores negativos estão associados à vegetação e ao solo, enquanto os valores positivos estão associados ao teor de água.

A partir da análise estatística da separabilidade pelo índice Fisher e mapeamento de linha de base associado a corpos e lâminas d'água, Azira *et al.* (2013) avaliaram a sensibilidade da classificação de índices espectrais à detecção de áreas associadas a inundação. O índice Fisher quantifica a separabilidade das características individuais, quanto maior o índice Fisher mais discriminante ele é. Valores derivados do MNDWI, apresentaram maior ajuste e correlação com o perímetro inundado. Dentre os resultados obtidos com o modelo automático CAIN (*Corrección Atmosférica e Índices de Inundación*), destaca-se o mapeamento dos corpos ou lâminas d'água relacionados as inundações, a partir da análise do MNDWI. As análises apresentam uma grande dimensão na distribuição dos valores do índice MNDWI, evidenciando maior separabilidade entre as lâminas d'água de outras coberturas.

Segundo Lacaux *et al.* (2007) os valores de NDPI variam de -1 a 1, em que valores próximos a 1 são relacionados com corpos d'água ou solos inundados e os próximos a -1 áreas mais secas, com menos umidade presente no solo. Bittencourt (2017) cruzou as imagens de NDPI e uso e cobertura do solo através da sobreposição de valores máximos, resultando em uma imagem reclassificada com base nos valores de prioridade global para cada grau de fragilidade. Também realizou a sobreposição do mapa de altitude com a classe NDPI Muito Úmido, em função da relação da altitude com os principais rios, para considerar a análise dos padrões de inundação. Para mapear a influência da inundação no rio Uruguai, utilizou as classes de NDPI a partir do processamento de algumas imagens, com base nos registros de precipitação.

Nos três índices as feições hídricas ficam em evidência com valores positivos, apresentando maior realce em relação a outras feições. No contraste entre o rio Uruguai, açudes e os terrenos adjacentes, essas áreas apresentam entorno úmido, mas devido à diferença nos valores de números digitais de um alvo para o outro, os corpos hídricos têm maior realce, facilitando sua identificação.

A figura 24 apresenta os resultados das classificações supervisionadas, por meio do algoritmo Máxima Verossimilhança, para os três índices. Optou-se por destacar apenas as áreas dos corpos d'água (áreas inundadas, rios, açudes) e comparar o desempenho da classificação nos índices. A área em vermelho, destaca as diferenças entre as três classificações.

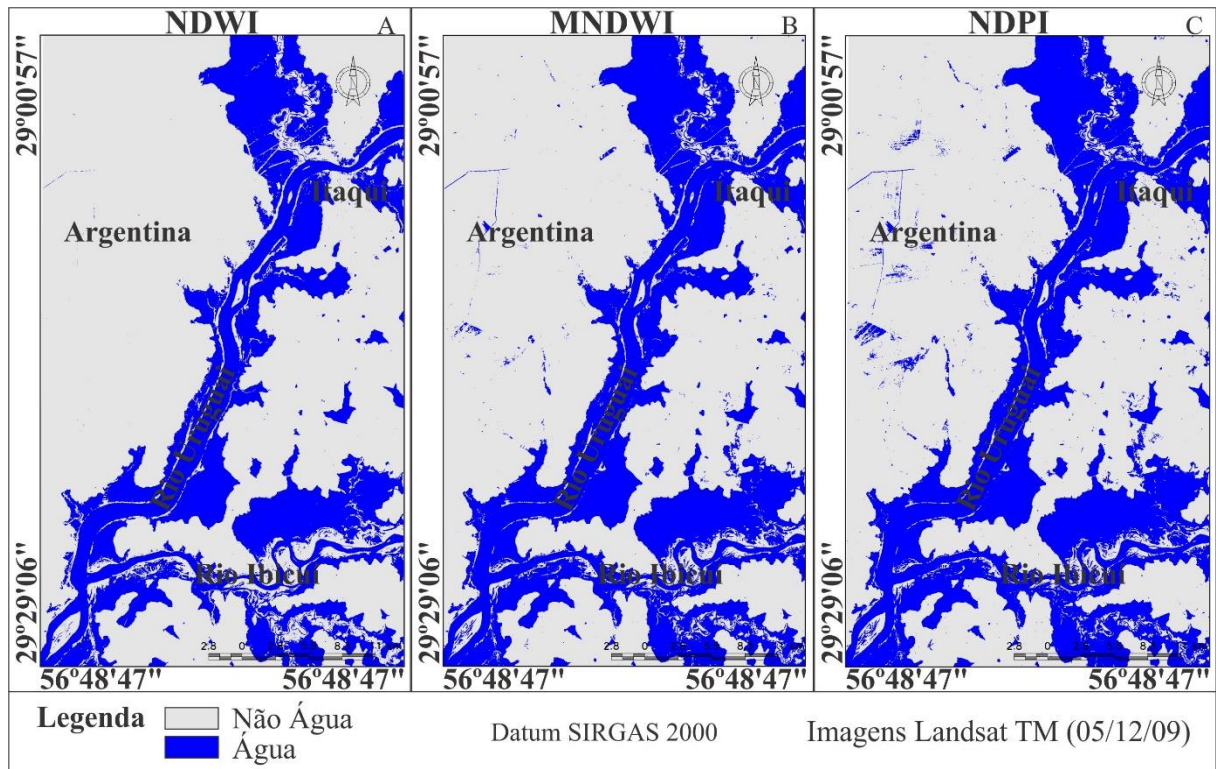


Figura 24 – Classificação Supervisionada, algoritmo MAXVER, NDWI (A), MNDWI (B) e NDPI (C).

Na classificação do NDWI (figura 23A), o classificador não conseguiu identificar como água, áreas de alguns açudes. Essas áreas aparecem nas classificações do MNDWI e NDPI (figuras 23A e 23B), entre pequenos corpos d'água. Ou seja, o classificador foi mais eficiente em conseguiu identificar essas áreas úmidas, por meio das imagens resultantes de MNDWI e NPDI.

Du *et al.* (2016) propuseram uma nova metodologia para mapear corpos d'água a partir da imagem do Santinel-2, produzindo a imagem MNDWI de 10 m. Demonstrou que o MNDWI é mais eficiente em mapear os corpos d'água e suprimir recursos de áreas construídas do que o NDWI. Todos os MNDWI 10 m produzidos por PCA (análise de componentes principais), IHS (saturação de matiz de intensidade), HTP (filtro passa-alta) e ATWT (transformada Wavelet À Trous) podem representar informações espaciais mais detalhadas dos corpos hídricos do que o MNDWI de 20 m. O MNDWI 10 m permitiu extrair corpos d'água mais precisos do que NDWI 10 m e MNDWI20 m. Embora o HPF possa produzir imagens mais nítidas e precisas de MNDWI do que os outros três algoritmos de ajuste de referência, o algoritmo ATWT apresenta os melhores resultados de mapeamento de corpos d'água de 10 m.

A tabela 12 apresenta os dados da classificação, relativa aos índices NDWI, MNDWI e NDPI. A diferença de porcentagem da classe água, no MNDWI e NDPI, foi mínima, e para o NDWI a diferença é em torno de 3%. Isto corrobora com o que já havia sido observado na análise visual, com os valores das classes temáticas podemos comprovar essas pequenas diferenças.

Tabela 12 - Classes temáticas dos índices NDWI, MNDWI e NDPI

Índices	Classes				Área Total (ha)
	Água (ha)	%	Não Água (ha)	%	
NDWI	44.478,81	28,84	109.743,39	71,16	154.222,20
MNDWI	49.543,11	32,12	104.679,09	67,88	
NDPI	51.829,74	33,61	102.392,46	66,39	

Diversos trabalhos mostram que o MNDWI é mais adequado para extrair corpos d'água com maior precisão do que o NDWI (LI *et al.*, 2013; DU *et al.*, 2014; SINGH *et al.*, 2015). Neste sentido Singh *et al.* (2015) destacam que as características da água foram melhoradas com MNDWI, com valores positivos para características de águas misturadas com a vegetação. Sendo que as relações entre profundidade do lençol freático, antes da chuva na região, o modelo digital de elevação e as imagens de MNDWI classificadas explicam as diferenças na extensão da área inundada. Estes resultados sugerem que o MNDWI pode ser usado para delinear melhor as características da água misturada com a vegetação em comparação com o NDWI.

Doña *et al.* (2016) utilizaram vários métodos de classificação supervisionado e não supervisionado, para estimar água em lagos salinos. O NDWI de McFeeters (1996) apresentou melhor resultado com o limiar proposto pelo autor original ( $> 0$ ) para atribuir pixels de água, com precisão global de 90% e coeficiente Kappa de 0,80. Para o MNDWI e o NDWI de Gao (1996), os melhores resultados foram obtidos com limiar de 0,5. O NDWI de Gao apresentou piores possivelmente por estes comprimentos de onda serem mais sensíveis à presença de água, causando assim, erros na identificação dos pixels da cobertura da água. De acordo com Campos *et al.* (2012 utilizar o infravermelho médio permite maior contrastante na detecção de água sazonal e permanente.

Como a interpretação visual não é suficiente para avaliar a classificação que melhor diferencia água dos outros alvos, foi necessário aplicar índices que medem a acurácia das classificações em relação à verdade terrestre. A partir das estatísticas da Tabela 13 de pós validação observou-se um excelente desempenho para o limiar de 99,9% da classificação MAXVER. O desempenho geral para o NDWI e MNDWI foi em termos gerais muito parecidos,

assim como a abstenção média e os índices Kappa e Tau. A maior diferença ocorreu na variância Khat para os três índices.

Tabela 13 – Estatística de desempenho da classificação MAXVER – limiar 99,9%

Dados Estatísticos (%)	Índices		
	NDWI	MNDWI	NDPI
Desempenho Geral	99,87	99,88	99,64
Confusão Média	0,00	0	0
Abstenção Média	0,13	0,12	0,36
KHAT	99,72	99,77	99,24
Variância KHAT	1,088E+10	8,941E-08	4,057E-07
TAU	99,74	99,77	88,12

O índice Kappa é uma técnica multivariada discreta usada na avaliação da precisão de mapeamentos temáticos, utilizando todos os elementos da matriz de erros em seu cálculo (FIGUEIREDO & VIERA, 2007). A partir dos dados das classes temáticas e da validação do desempenho das classificações (Tabelas 12 e 13), o MNDWI apresentou o melhor resultado para os índices Kappa e Tau, como também a maior variância Tau em relação aos outros. O NDPI apresentou um desempenho bom, porém inferior aos demais.

Segundo Kumar (2015) e Mozumder *et al.* (2014), o NDPI é adequado para extrair áreas de corpos d'água e áreas inundadas, a partir de uma composição dos índices NDWI, MNDWI e NDVI para classificar áreas úmidas, diferenciando áreas com vegetação densa ou cobertura de macrófitas. Destacam ainda que a aplicação de um único índice não consegue identificar e classificar os diferentes compartimentos de áreas úmidas, devido as contribuições na resposta espectral do solo, vegetação e água nesse sistema.

Graosque (2018) destaca a complexidade no mapeamento de inundações, onde muitos fatores precisam ser considerados, e que uma única técnica pode não ser suficiente. A utilização de três técnicas diferentes (limiarização, análise temporal e modelo digital de elevação), resultou em um único mapa, onde a soma dos resultados foi escolhida como método, pois assim se obteve a resposta de todas as técnicas, destacando assim, a área suscetível de inundação.

#### 4 Conclusões

A partir das classificações por pixel supervisionada MAXVER, sobre as imagens resultantes de NDWI, MNDWI e NDPI, pode-se destacar as diferenças pela análise visual e

também pela quantificação das áreas temáticas. As três imagens resultantes apresentaram um bom desempenho de um modo geral, mas a classificação a partir do MNDWI apresentou os melhores resultados para o mapeamento dos corpos d'água, facilitado pelo forte contraste entre a água e a superfície terrestre. Assim, demonstrado a partir os dados do índice Kappa e Tau. O desempenho para o NDPI não foi tão satisfatório quanto os demais em termos de comparação, porém os resultados foram eficientes.

## 5 Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## 6 Referências

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/.htm>. Acessado em: 07nov2016.

AZIRA, A.; GARCIA, S.; ROJAS, S.; RAMÍREZ, M. D. Desarrollo de un modelo de corrección de imágenes de satélite para inundaciones: (CAIN – Corrección Atmosférica e índices de Inundación) CIAF – Centro de Investigación y Desarrollo em Información Geográfica del IGAC UN-SPIDER Regional Support Office in Colombia. 2013. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/313346186\\_Desarrollo\\_de\\_un\\_modelo\\_de\\_correccion\\_de\\_imagenes\\_de\\_satelite\\_para\\_inundaciones\\_CAIN\\_Correccion\\_Atmosferica\\_e\\_Indices\\_de\\_Inundacion](https://www.researchgate.net/publication/313346186_Desarrollo_de_un_modelo_de_correccion_de_imagenes_de_satelite_para_inundaciones_CAIN_Correccion_Atmosferica_e_Indices_de_Inundacion)>. Acesso em: 20 out 2018.

BITTENCOURT, D. Z. Dinâmica e análise de fragilidade ambiental, banhado da reserva biológica de São Donato –RS. 114 p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

BRENNER, V. C.; GUASSELLI, L. A. Índice de diferença normalizada da água (NDWI) para identificação de meandros ativos no leito do canal do rio Gravataí/RS – Brasil. In: **XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, n. 17, 2015, João Pessoa/PB. XVII.

BRUBACHER, J. P. Inundações e enxurradas, município de Esteio – RS. 111p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

CAMPOS, J. C.; SILLERO, N.; BRITO, J. C; Normalized difference water indexes have dissimilar performances in detecting seasonal and permanente water in the Sahara-Sahel transition zone. **Journal of Hydrology**. v. 464-465, p. 438-446, 2012.

CINQUINI, J.; AZEVEDO, A. Estimativa de áreas alagadas no período de seca e cheia em Otto bacia no município de Corumbá/MS, utilizando NDVI, NDWI e atributos de textura em imagens Landsat/TM. In: **Simpósio de Geotecnologias no Pantanal**, n. 4, 2012, Bonito/MS.

Anais do 4º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal. Brasília: EMBRAPA, 2012. p. 71-80. Disponível em: <<https://www.geopantanal.cnptia.embrapa.br/2012/cd/geopantanal.pdf>> Acesso em: 15 de mar. 2019.

DOÑA, C.; CHANG, N. B.; CASELLES, V.; SÁNCHEZ, J. M.; PLANELLS, L. P.; BISQUERT, M. M.; SANTOS, V. G.; IMEN, S.; CAMACHO, A. Monitoring hydrological patterns of temporary lakes using Remote Sensing and machine learning models: Case study of la mancha húmeda biosphere reserve in Central Spain. **Remote Sensing**, v. 8, n. 8 (618) p. 1-18, 2016.

DU, Z. Q.; LI, W. B.; ZHOU, D. B.; TIAN, L. Q. LING, F.; WANG, H. L.; GUI, Y. M.; SUN, B. Y. Analysis of Landsat-8 OLI imagery for land surface water mapping. *Remote Sensing Letters*. v. 5, n. 7, p. 672-681, 2014.

DU, Y.; ZHANG, Y.; LING, F.; WANG, Q.; LI, W.; LI, X. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with Modified Normalized Water Index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. **Remote Sensing**. v. 8, n. 4, 354, 2016.

FIGUEIREDO, G. C.; VIEIRA, C. A. O. Estudo do comportamento dos índices de Exatidão Global, Kappa e Tau, comumente usados para avaliar a classificação de imagens do sensoriamento remoto. *Anais...*, Florianópolis - SC, 2007 p. 5755-5762.

GONZAGA, E. P.; SANTOS, V. V. DOS.; NICÁCIO, R. M. Análise do comportamento do NDVI e NDWI em períodos de diferentes intensidades pluviométricas no Sertão alagoano. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE, p. 1736.

GRAOSQUE, J. Z. Mapeamento das áreas de inundação utilizando imagens C-SAR e SRTM, nas províncias de Santa Fé e Entre Rios – Argentina. Dissertação (Mestrado em Geografia). Programa de Pós-graduação em Geografia. 119 f. 2018.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Tutoriais.

Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/classific.html>>. Acesso em: 15 mai. 2019.

JENSEN, J. R. **Introductory Digital Image Processing: a remoting sensing perspective**. 3ª edição. Universidade da Califórnia: Prentice Hall. 526 p. 2005.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. Tradução da 2ª edição. J. C. N. EPIPHANIO (org.). São José dos Campos: Parêntese Editora. 672p. 2009.

JI, L.; ZHANG, L.; WYLIE, B. Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. v. 75, n. 11, p. 1307-1317, 2009.

KUMAR, M. C. V. S. S. Automatic extraction of water features at multiple scales. 92p. Master of Technology in Remote Sensing and GIS, Indian Institute of Remote Sensing, India, 2015.

LACAUX, J.P.; TOURRE, Y. M.; VIGNOLLES, C.; NDIONE, J. A.; LAFAYE, M. Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. **Remote Sensing of Environment**, v.1, n. 106 p. 66–74, 2007.

LEITE, E. F.; ROSA, R. Análise do uso, ocupação e cobertura da terra da bacia hidrográfica do Rio Formiga, Tocantins. *Revista Eletrônica de Geografia*. v. 4, n. 12, p. 90-106, 2012.

LI, W.; DU, Z.; LING, F.; ZHOU, D.; WANG, H.; GUI, Y.; SUN, B.; ZHANG, X. A comparison of land surface water mapping using the Normalized Difference Water Index from TM, ETM plus and ALI. **Remote Sensing**, v. 5, n. 11, p. 5530-5549, 2013.

MAGALHÃES, I. L.; THIAGO, C. R.; AGRIZZI, D. V, SANTOS, A. R. DOS. Uso de Geotecnologias para mapeamento de áreas de risco de inundação em Guaçuí, ES: Uma análise comparativa entre dois métodos. **Cadernos de Geociências**, v. 8, n. 2, p. 63-70, 2011.

MARTH, J. D.; MOURA, N. S. V.; KOESTER, E. Localização e mapeamento de áreas úmidas na sub-bacia hidrográfica Arroio Santa Isabel, através do método NDWI. **Geografia (Londrina)**. v. 25, n. 1, p. 23-41, 2016.

MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, n.7, p. 1425-1432, 1996.

MOZUMDER, C.; TRIPATHI, N. K.; TIPDECHO, T. Ecosystem evaluation (1989-2012) of Ramsar wetland Deepor Beel using satellite-derived índices. Springer, **Environmental Monitoring and Assessment**, v.186, n. 11, p.7909-7927, 2014.

NOVO, E. M. L. M. Sensoriamento Remoto Princípios e Aplicações. 4. ed. São Paulo –SP: Blucher, 2010.

REIS, J. B. C. dos; SAAVEDRA, O. F. C. Comparação de métodos de classificação para reconhecimento de corpos d'água em imagens do sensor OLI do Landsat8. Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, João Pessoa – PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE. 59-66p.

SAUSEN, T.M. & REIS, J.T. Levantamento e avaliação das inundações ocorridas no Rio Grande do Sul. In: GUASSELLI, L. A.; OLIVEIRA, G.G.; ALVES, R.C.M. (Editores), **Eventos extremos no Rio Grande do Sul: inundações e movimentos de massa**. Porto Alegre: Ed. Evangraf, p. 25-44, 2013.

SINGH, K. V.; SETIA, R.; SAHOO, S.; PRASAD, A.; PATERIYA, B. Evaluation of NDWI and MNDWI for assessment of waterlogging by integrating digital elevation model and groundwater level. *Geocarto International*, v. 30, n. 6, p. 650-661, 2015.

SIRANGELO, F. R. Relação entre a ocorrência de inundações e enxurradas e os índices morfométricos das sub-bacias hidrográficas da Região Hidrográfica do Guaíba, Rio Grande do Sul, Brasil. Dissertação de Mestrado -Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Landsat Project Description. Disponível em: [http://landsat.usgs.gov/about\\_project\\_descriptions.php](http://landsat.usgs.gov/about_project_descriptions.php). Acessado em: 20 jul. 2016.

USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Shuttle Radar Topography Mission. Disponível em: <http://srtm.usgs.gov/>. Acesso em: 25 abr. 2018.

XU, H. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International Journal of Sensing**, v. 27, n. 14, p. 3025–3033, 2006



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista que o objetivo desta tese foi identificar o comportamento das inundações no rio Uruguai no seu médio curso, a partir de séries temporais de imagens, dados de precipitação, cota e vazão do rio entre os anos de 1980 e 2017, os resultados apresentados permitem as seguintes conclusões:

No artigo 1, o uso de imagens de satélite para espacializar inundações demonstrou ser eficiente, na comparação de três eventos e assim caracterizar cada inundação. Ao comparar imagens em anos considerados neutros e com ocorrência de El Niño, observou-se que as águas do rio Uruguai extravasam para a planície de inundação em todas as situações analisadas, mas em níveis diferentes. O evento mais expressivo, na seção analisada, foi novembro de 1997, sob influência do fenômeno El Niño, corroborando que este exerce influência nos totais pluviométricos, que por sua vez ocasionam inundações no Rio Grande do Sul. Destaca-se também que quando as chuvas são concentradas em setores da bacia, a elevação do nível do rio decorre gradativamente, enquanto que chuvas espacializadas como um todo na bacia, ocasionam uma elevação mais rápida do nível do rio, em decorrência da declividade da bacia do rio Uruguai.

No artigo 2, os dados de precipitação, anomalias, cota da régua e as imagens de satélite permitiram entender a dinâmica e a magnitude do evento de inundação na planície do rio Uruguai. Os dias consecutivos de chuva, o volume acumulado e a declividade da bacia hidrográfica influenciam na velocidade da elevação do nível das águas. As imagens de superfície podem ser utilizadas para acompanhar a evolução das condições do tempo que ocasionam inundações, e que de um modo geral, as precipitações são resultantes de sucessivas passagens de sistemas frontais. No evento extremo de 2017, as precipitações que culminaram em inundação no município de Itaqui, são tanto de origem regional, quanto local. A análise da imagem do dia 11/06 mostra que em diversos setores da bacia hidrográfica a presença de áreas úmidas, evidenciando assim, a relação das chuvas regionais e locais no evento de inundação.

No artigo 3 destaca-se que o padrão temporal de distribuição das chuvas na bacia do rio Uruguai é do tipo concentrado, para a maioria dos eventos analisados, com maiores picos de cotas máximas e de vazão. As chuvas locais têm uma participação considerável na elevação das águas em Itaqui, porém é importante destacar que as chuvas regionais são as que mais influenciam na dinâmica dos eventos de inundação no rio Uruguai. As precipitações nas cabeceiras do rio Uruguai, com sua declividade acentuada, acarretam no aumento da vazão.

A presença de usinas hidrelétricas no rio Uruguai interfere na ocorrência de inundações, pois os reservatórios retêm temporariamente parte do volume da água escoada. Esta água é descarregada à jusante com uma vazão menor em relação àquela que ocorreria no desenvolvimento do fenômeno natural, e por consequência aumenta o tempo de duração do período de cheia, devido ao represamento das águas. Tanto as chuvas locais quanto as regionais interferem diretamente na magnitude dos eventos. O volume, a duração e a distribuição espacial e temporal das precipitações, estão diretamente relacionadas à dimensão de eventos extremos de precipitações que ocasionam inundações devido a chuvas fortes e/ou prolongadas no rio Uruguai.

No artigo 4, a comparação entre as diferenças espectrais por meio da análise visual e da quantificação das áreas temáticas mostra as diferenças entre as classificações supervisionadas pelo algoritmo MAXVER sobre as imagens resultantes de NDWI, MNDWI e NDPI respectivamente. As imagens resultantes de MNDWI e NDWI apresentaram os melhores resultados para o mapeamento dos corpos d'água, facilitado pelo forte contraste entre a água e a superfície terrestre. O resultado entre os índices para o desempenho geral foi satisfatório, os índices Kappa e Tau, demonstraram melhor eficiência para os índices MNDWI e NDWI, embora as diferenças entre ambos sejam pequenas.

Os trabalhos realizados na bacia hidrográfica do rio Uruguai ainda são poucos, considerando a importância de trabalhos voltados para a temática inundações. O rio Uruguai sofre tanto com estiagens, assim como com as inundações, seja em alto, médio e baixo nível. O planejamento por parte dos municípios para os usos do solo, com restrição nas planícies de inundação para os municípios ribeirinhos do rio Uruguai seria uma alternativa para mitigar os prejuízos das inundações. O trabalho em conjunto das esferas municipais e estaduais, considerando que este rio abrange dois estados brasileiros, seria importante para projetos de gestão em conjunto para um melhor planejamento das situações críticas como as inundações.