

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Indiara Bruna Costa Moura Moraes

**USO DOS DADOS DA MISSÃO GRACE PARA ESTUDO DOS  
EVENTOS DE ESTIAGEM NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
URUGUAI, NO PERÍODO ENTRE 2003 A 2015**

Santa Maria, RS  
2019



**Indiara Bruna Costa Moura Moraes**

**USO DOS DADOS DA MISSÃO GRACE PARA ESTUDO DOS EVENTOS DE  
ESTIAGEM NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI, NO PERÍODO  
ENTRE 2003 A 2015**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Área de Concentração Análise Ambiental e Dinâmica Espacial do Cone Sul, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do grau de **Doutora em Geografia.**

Orientadora: Prof. Dra. Andrea Valli Nummer

Santa Maria, RS  
2019

Moraes, Indiará Bruna Costa Moura  
USO DOS DADOS DA MISSÃO GRACE PARA ESTUDO DOS EVENTOS  
DE ESTIAGEM NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI, NO  
PERÍODO ENTRE 2003 A 2015 / Indiará Bruna Costa Moura  
Moraes.- 2019.  
243 p.; 30 cm

Orientadora: Andrea Valli Nummer  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de  
Pós-Graduação em Geografia e Geociências, RS, 2019

1. Rio Uruguai 2. Estiagens 3. Missão GRACE 4.  
Desastres 5. Equivalente à altura d'água I. Valli Nummer,  
Andrea II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, INDIARA BRUNA COSTA MOURA MORAES, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Indiara Bruna Costa Moura Moraes

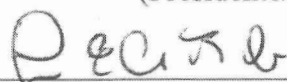
**USO DOS DADOS DA MISSÃO GRACE PARA ESTUDO DOS EVENTOS DE  
ESTIAGEM NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI NO PERÍODO  
ENTRE 2003 A 2015**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Área de Concentração Análise Ambiental e Dinâmica Espacial do Cone Sul, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora em Geografia**.

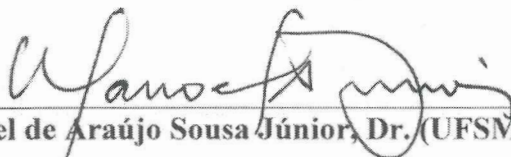
**Aprovado em 30 de setembro de 2019:**



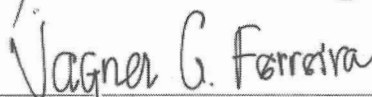
**Andrea Valli Nummer, Dr.<sup>a</sup>**  
(Presidente/Orientadora)



**Luis Eduardo de Souza Robaina, Dr. (UFSM)**



**Manoel de Araújo Sousa Júnior, Dr. (UFSM)**



**Vagner Gonçalves Ferreira, Dr. (Hohai University)**



**Victor Hugo Fernandes, Dr. (UFRRJ)**

Santa Maria, RS  
2019



## DEDICATÓRIA

*À minha família que sempre esteve ao meu lado.*





## AGRADECIMENTOS

*À minha família, pelo apoio, amor e dedicação.*

*À minha avó Dolores, minha mãe Glória, minhas tias Cida e Graças por toda paciência, por entenderem a minha ausência ao longo desses anos e me apoiarem incondicionalmente.*

*À minha irmã Michele, que sempre esteve comigo durante toda essa loucura.*

*Ao meu PAIdrasto Martin Ringoot, por ser o pai que não tive.*

*À minha orientadora, Professora Andrea Valli Nummer, que acreditou em mim quando eu mesma já não acreditada.*

*Ao Lucas Santos, que me deu abrigo, amor e atenção.*

*Aos meus amigos Jeaníris Freixas e Lucas Guimarães, por serem mais que amigos, sendo minha família gaúcha.*

*Aos amigos de Itaqui, em especial a Tia Mara Biasi, Janice Biasi, Maiara Biasi, João Pedro Biasi, Magno Lopes, Rolando Larico e Marcelle Freire que fizeram da Fronteira Oeste um novo lar para mim.*

*Ao Victor Hugo, por me colocar nos trilhos quando só restava desespero.*

*Aos amigos do LAGEOLAM (parte B), em especial a Tiéle, Wellerson Pessotto, Glória Durán, Guilherme Cardoso, Thomás Lixinski e Vinicius.*

*Aos velhos amigos de Seropédica. Aos amigos e colegas de Santa Maria. Obrigada pelo companheirismo.*

*Aos meus colegas do Colégio Técnico da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pelo suporte, especialmente aos professores do curso técnico de Agrimensura que me substituíram e a Letícia Campos de Faria.*

*À Universidade Federal de Santa Maria e ao PPGGeo por proporcionar um ensino de pós graduação gratuito e de qualidade.*

*À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e a Universidade Federal do Pampa pelo apoio e liberação para que eu cursasse o doutorado.*

*As meninas do Espaço Vip (Amanda, Aline, Janicler e Camila), Renata (Rivotril) e ao Luís Fernando (Loui), aos quais compartilhei momentos de desespero e alegrias nesta jornada.*

*A todos que contribuíram de algum modo para que esse trabalho fosse realizado.*

*“A aqueles que passam por nós, não vão nós, não nos deixam nós. Deixam um pouco de si, levam um pouco de nós.”*  
Antoine de Saint-Exupéry



*“Quando Deus fez este mundo fez do rio a veia artéria  
A água é sangue da terra lhe digo de cara seria  
Sou taura na geografia, tirei cinco na matéria  
E a lo largo se me engano, bobagem pouca é miséria.*

*Meu velho rio Uruguai regra de sangue e de vida  
A região missioneira que por ele é repartida  
É manso quando nas caixa, é uma fera na subida  
Fazendo roncar enchente mesmo que tigre parida.*

*O Uruguai é meu padrinho, pois nele fui batizado  
E é por isso que eu levo jeito de potro aporreado  
E aqui recordo cantando aquele velho ditado  
Quem dos seus não puxa a raça não passa de um desgraçado.*

*Minha mãe uma xirua, destas do pêlo trançado  
Meu pai um velho chibeiro que ganha a vida embarcado  
Nasci num catre de balsa e se não estou enganado  
Minha primeira chupeta foi a cola de um dourado.*

*Viro o mundo pelo avesso e sempre no vem-e-vai  
Venho lavar as feridas nas barrancas do Uruguai  
Meu velho rio colorado de dentro de mim não sai  
E a quem sempre peço a benção como se fosse meu pai”*

Rio Uruguai. (Lima, Mano).



## RESUMO

### USO DOS DADOS DA MISSÃO GRACE PARA ESTUDO DOS EVENTOS DE ESTIAGEM NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI, NO PERÍODO ENTRE 2003 A 2015

AUTORA: Indira Bruna Costa Moura Moraes

ORIENTADORA: Andrea Valli Nummer

Os municípios situados na Bacia Hidrográfica do rio Uruguai têm sido atingidos periodicamente por estiagens que tem provocado grandes prejuízos econômicos para a região. Existe uma grande variação de vazões, desde a ocorrência de grandes estiagens, que afetam o abastecimento humano e animal, passando por perdas na produção do Setor Primário e efeitos indiretos em outros setores, e também, o aumento no custo de vida da população. O objetivo geral desta pesquisa é analisar as variações do armazenamento total de água na Região Hidrográfica da Bacia do Uruguai utilizando dados da Missão espacial GRACE (*Gravity Recovery & Climate Experiment*), permitindo um melhor conhecimento do período de estiagem e comportamento ao longo dos rios, principalmente nas áreas de baixa cobertura das estações fluviométricas num período entre os anos de 2003 e 2015. Nesta pesquisa foram utilizadas as soluções mascons CSR GRACE RL05 para obter o equivalente à altura d'água em cm. Foram comparadas as séries temporais da missão GRACE com os poços, onde aplicou-se a média ponderada, considerando todos os poços da região, com base na área de influência de cada poço determinado pelos polígonos de Thiessen. Foram selecionados, a priori, estações fluviométricas nos mesmos municípios que possuem monitoramento dos poços de águas subterrâneas. Calculou-se as médias mensais sobre as informações de cotas d'água obtidas das leituras das régua e comparou o comportamento dos níveis d'água com o EqW e os níveis dos poços subterrâneos. Os registros de estiagens obtidos a partir de decretos de situação de emergência e estado de calamidade pública foram divididos em números de municípios atingidos por ano e número de eventos por ano, pois há municípios com registro de mais de um evento por ano. E o usou-se o índice de vegetação normalizado obtido a partir do sensor MODIS no período do estudo para correlacionar com o EqW obtido pelas soluções mascons da missão GRACE. Para verificar a correlação entre os EqWs e os índices de vegetação normalizado, foi realizada uma regressão geograficamente ponderada, entre os valores de EqW e os índices de vegetação normalizados, obtendo o valor de  $R^2 = 0,979$ . A metodologia utilizada, apresentou-se como uma opção para a avaliação de eventos de estiagens na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai. Observou-se a relação direta do aumento dos decretos de situação de emergência ou estado de calamidade pública com a diminuição dos níveis do EqW na área supracitada, permitindo observar que declínio do nível do EqW inicia meses antes dos decretos, percebendo a que a estiagem está a caminho entre 1 ano a 6 meses antes e se programar economicamente para o tal evento, pois a Bacia leva uns 4 meses para se recuperar do grande pico da estiagem. Como a série temporal da missão GRACE ainda é pequena para estudos hidrológicos, sugere-se uma regressão dos dados para auxiliar nesses estudos e também prever o comportamento nos EqW no futuro, ajudando na gestão dos recursos hídricos.

**Palavras-chave:** Rio Uruguai. Estiagens. Missão GRACE. Desastres. Equivalente à altura d'água.



## ABSTRACT

### USE OF GRACE MISSION DATA FOR DROUGHT EVENTS RESEARCH IN THE URUGUAY RIVER BASIN BETWEEN 2003 AND 2015

AUTHOR: Indiará Bruna Costa Moura Moraes

ADVISOR: Andrea Valli Nummer

Cities located in the Uruguay River Basin have been hit periodically by droughts that have caused major economic damage to the region. There is a wide range of flow rates, since the occurrence of major droughts, affecting human and animal supplies, experiencing losses in Primary Sector output and indirect effects on other sectors, and also, the increase in the cost of living of the population. The objective of this research is to analyze variations in total water storage by the GRACE Mission (*Gravity Recovery & Climate Experiment*) in the Uruguay Basin Hydrographic Region, allowing a better understanding of drought and behavior along rivers, mainly in the low coverage areas of the river stations between 2003 and 2015. In this research, masks of CSR GRACE RL05 solutions were used to obtain the *Equivalent water thickness* in cm. The time series of the GRACE mission were compared with the wells, where the weighted average was applied, considering all wells in the region, based on the area of influence of each well determined by the Thiessen polygons. A priori, fluviometric stations were selected in the same municipalities that monitor groundwater wells. Monthly averages were calculated on the water quota information obtained from the readings of the rulers and compared the behavior of water levels with EqW and the levels of underground wells. The records of droughts obtained from decrees of emergency situation and state of public calamity were divided into numbers of municipalities affected per year and number of events per year, as there are municipalities with more than one event per year. And the normalized vegetation index obtained from the MODIS sensor during the study period was used to correlate with the EqW obtained by the mascon solutions of the GRACE mission. To verify the correlation between the EqWs and the normalized vegetation indices, a geographically weighted regression was performed, between the EqW values and the normalized vegetation indices, obtaining the value of  $R^2 = 0.979$ . The methodology used was presented as an option for the evaluation of drought events in the Uruguay River Basin. There was a direct relationship between the increase in emergency decrees or state of emergency with the decrease in EqW levels in the aforementioned area, allowing note that EqW level of decline begins months before the decrees, realizing that the drought is the path from 1 year to 6 months before and plan economically for such an event because the basin takes about four months to recover from the great peak of the drought. As the time series of the GRACE mission is still small for hydrological studies, suggest a regression of data to assist in these studies and also predict the behavior in EqW in the future, helping in the management of water resources.

**Keywords:** Uruguay River. Drought. GRACE Mission. Disaster. Equivalent water thickness.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai. ....	36
Figura 2 - Mapa das Sub-bacias Hidrográfica do Rio Uruguai de acordo com PNRH. ....	38
Figura 3 - Distribuição espacial do clima na bacia. Não se deve tirar valores da mesma, pois é apenas uma representação qualitativa. ....	42
Figura 4 - Salto do Yucumã, PE do Turvo. ....	47
Figura 5 - Reserva Biológica do São Donato. ....	48
Figura 6 - Mapa Geológico da Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai. ....	54
Figura 7 - Altimetria da Bacia do Uruguai. ....	55
Figura 8 - Mapa Hidrogeológico da Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai. ....	62
Figura 9 - Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai. ....	64
Figura 10 - Distribuição espacial da precipitação da Região Hidrográfica do Uruguai – Isoietas. ....	65
Figura 11 - Uma das Alternativas de melhor divisão de quedas do Rio Uruguai no trecho compartilhado entre Brasil e Argentina do Inventário da Década de 70. Mapa Hidrogeológico da Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai. ....	69
Figura 12 - Alternativas de melhor divisão de quedas do Alto e Médio Rio Uruguai, com a inclusão dos resultados do Inventário 2010. ....	70
Figura 13 - Evolução na representação da Terra. ....	74
Figura 14 - Determinação da anomalia da gravidade. ....	77
Figura 15 - Sistema AIRY-HEISKANEN. ....	80
Figura 16 - Anomalia isostática para a América do Sul – modelo de AIRY-HEISKANEN. ..	80
Figura 17 - Sistema isostático de PRATT-HAYFORD. ....	81
Figura 18 - Diagramas apresentando os mecanismos de compensação isostática. As linhas pontilhadas apresentam a crosta de referência com espessura T. ....	81
Figura 19 - Correção Topográfica da anomalia de Bouguer. ....	82
Figura 20 - Anomalia Bouguer da América do Sul. ....	83
Figura 21 - Platô de Bouguer. ....	84
Figura 22 - Gravímetro FG5. ....	85
Figura 23 - Gravímetro Lacoste & Romberg D-74. ....	86
Figura 24 - Anomalias gravitacionais em $\mu\text{Gal}$ do componente estático (médio do campo de gravidade da Terra). Modelo EGM08, de Pavlis et al., 2008. ....	88
Figura 25 - Representação dos satélites da missão GRACE. ....	93
Figura 26 - Quinta versão das soluções mascons da missão GRACE (Release 05 – RL05). ..	100
Figura 27 - Satélites gêmeos GRACE-FO vistos a partir da renderização de um artista. ....	101
Figura 28 - Diagrama esquemático do armazenamento integrado de água conforme mensurado pela missão GRACE. ....	103
Figura 29 - Diagrama esquemático do ciclo global da água. ....	105
Figura 30 - Evolução das secas em função da duração e dos impactos. ....	107
Figura 31 - Distribuição dos decretos SE no devido à estiagem em 2009 no território brasileiro. ....	109
Figura 32 - Distribuição do SPI nas bacias hidrográficas do território brasileiro. ....	110
Figura 33 - Anomalias de chuva no período entre novembro/11 a janeiro/12. ....	111
Figura 34 - Equivalente à altura d'água terrestre. ....	113
Figura 35 - Equivalente à altura d'água oceânica. ....	113
Figura 36 - Imagem colorida da fumaça no Peru e Bolívia, no dia 16 e agosto de 2019. ....	115
Figura 37 - Fluxograma com a síntese das etapas da pesquisa. ....	124
Figura 38 - Mapa de localização dos poços subterrâneos na Bacia do Rio Uruguai. ....	127
Figura 39 - Mapa de localização das estações fluviométricas da Bacia do Rio Uruguai. ....	131

Figura 40 - Réguas limnimétricas.....	132
Figura 41 - Mapa do quantitativo de eventos de estiagem por municípios.....	140
Figura 42 - Variação no EqW em março/05. ....	146
Figura 43 - Variação no EqW em maio/09. ....	147
Figura 44 - Variação no EqW em março/12. ....	148
Figura 45 - Comportamento do EqW na Bacia do Uruguai entre o período de out/04 a mar/06. .....	150
Figura 46 - Comportamento do EqW na Bacia do Uruguai entre o período de out/08 a mar/10. .....	151
Figura 47 - Áreas e fatores de influência das tendências pluviométricas. ....	153
Figura 48 - Mapa de localização dos poços subterrâneos com os polígonos de Thiessen.....	157
Figura 49 - (a)Variação do nível do EqW no poço subterrâneo de Puita em Itaquí durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço subterrâneo de Puita em Itaquí durante o ano de 2012. (c) Variação da cota média mensal (m) da Estação Fluviométrica de Itaquí durante o ano de 2012. ....	158
Figura 50 - (a) Variação do nível do EqW no poço subterrâneo de Três Capões em Alegrete durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço subterrâneo de Três Capões em Alegrete durante o ano de 2012. (c) Variação da cota média mensal (m) da Estação Fluviométrica de Alegrete durante o ano de 2012. ....	160
Figura 51 - (a) Variação do nível do EqW no poço subterrâneo da Escola Agrícola Federal em Alegrete durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço subterrâneo da Escola Agrícola Federal em Alegrete durante o ano de 2012.....	161
Figura 52 - (a) Variação do nível do EqW no poço subterrâneo de Serro do Jarau em Quaraí durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço de Serro do Jarau em Quaraí durante o ano de 2012. (c) Variação da cota média mensal (m) da Estação Fluviométrica de Quaraí durante o ano de 2012. ....	162
Figura 53 - (a) Variação do nível do EqW no poço subterrâneo de Miracatu em São Francisco de Assis durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço de Miracatu em São Francisco de Assis durante o ano de 2012. (c) Variação da cota média mensal (m) da Estação Fluviométrica de Jacagua durante o ano de 2012.....	163
Figura 54 - (a) Variação do nível do EqW no poço subterrâneo de São Carlos em Rosário do Sul durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço subterrâneo de São Carlos em Rosário do Sul durante o ano de 2012. (c) Variação da cota média mensal (m) da Estação Fluviométrica de Rosário do Sul durante o ano de 2012.....	164
Figura 55 - (a) Variação do nível do EqW no poço subterrâneo de Azevedo Sodré em Rosário do Sul durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço subterrâneo de Azevedo Sodré em Rosário do Sul durante o ano de 2012.....	165
Figura 56 - (a) Variação do nível do EqW no poço subterrâneo da ETA Centro em Rosário do Sul durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço subterrâneo da ETA Centro em Rosário do Sul durante o ano de 2012.....	166
Figura 57 - (a) Variação do nível do EqW no poço subterrâneo da Estância Santa Rita em Santana do Livramento durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço subterrâneo Estância Santa Rita em Santana do Livramento durante o ano de 2012. ....	167
Figura 58 - (a) Variação do nível do EqW no poço subterrâneo do Assentamento do Torrão em Santana do Livramento durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço subterrâneo do Assentamento do Torrão em Santana do Livramento durante o ano de 2012. .....	168
Figura 59 - Comparação das imagens da missão GRACE x MODIS.....	170

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Províncias Geomorfológicas – Distribuição Espacial.....	56
Tabela 2 - Domínios hidrogeológico.....	59
Tabela 3 - Relação Hidrelétricas x Sub-bacias.....	71
Tabela 4 - Meses sem mensuração de dados da Missão GRACE.....	95
Tabela 5 - Resultados da correlação linear entre SVI e EqW.....	174
Tabela 6 - Resultados da GWR entre SVI e EqW.....	175



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Compartimentação da bacia hidrográfica do Uruguai e suas respectivas áreas.....	39
Quadro 2 - Unidades Geológicas da Bacia do Rio Uruguai.....	51
Quadro 3 - Classes de 3º nível de solos na BHRU.....	63
Quadro 4 - Precipitação e Evaporação na Região Hidrográfica do Uruguai.....	67
Quadro 5 - Equivalência entre unidades.....	76
Quadro 6 - Missões gerenciadas por Goddard.....	91
Quadro 7 - Classificação da seca.....	106
Quadro 8 - Características do sensor MODIS.....	114
Quadro 9 - Principais características dos poços de monitoramento no aquífero Guarani.....	128



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Número de decretos de SE entre o período de 2003 a 2015. ....	137
Gráfico 2 - Variação de EqW em cm durante o período de estudo.' .....	142
Gráfico 3 - Variação de EqW em cm entre os anos 2003 a 2007.....	142
Gráfico 4 - Variação de EqW em cm entre os anos 2007 a 2011.....	143
Gráfico 5 - Variação de EqW em cm entre os anos 2011 a 2015.....	143
Gráfico 6 - Variação de EqW em cm entre os anos 2011 a 2015.....	155





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACC	Acelerômetro SuperSTAR
AIUB	<i>Astronomical Institute of the University of Bern</i>
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BGI	<i>Bureau Gravimétrique International</i>
CHAMP	<i>CHALLENGING Minisatellite Payload for Geophysical Research and Application</i>
CNES	<i>Centre National d'Études Spatiales</i>
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CSR	<i>Center for Space Research</i>
DGFI	<i>Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut</i>
DLR	<i>Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt</i>
DNAE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
DORIS	<i>Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite</i>
DUT	<i>Danish University of Technology</i>
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
EGGC	<i>European GOCE Gravity Consortium</i>
EGM96	<i>Earth Gravity Model 1996</i>
EGM2008	<i>Earth Gravity Model 2008</i>
EIGEN	<i>European Improved Gravity Model of the Earth by New Techniques</i>
ENOS	<i>El Niño Oscilação Sul</i>
ENVISAT	<i>Environmental Satellite</i>
EOSDIS	<i>Earth Observing System Data and Information System</i>
EqW	<i>Equivalent water thickness</i>
ERS	<i>European remote sensing satellite</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler
FGV	Fundação Getúlio Vargas
GEM	<i>Goddard Earth Model</i>
GEOSAT	<i>GEOdetic SATellite</i>
GFZ	<i>GeoForschungs Zentrum</i>
GLDAS	<i>Global Land Data Assimilation System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GOCE	<i>Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRACE	<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>
GRACE-FO	<i>Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On</i>
GRGS	<i>Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale</i>
GRIM	<i>Groupe de Recherches et Institut de Munich</i>
GSFC	<i>Goddard Space Flight Center</i>
GSOC	<i>German Space Operations Center</i>
HidroWeb	Sistema de Informações Hidrológicas
IAG	<i>International Association of Geodesy</i>
IAU	<i>International Astronomical Union</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IERS	<i>International Earth rotation and Reference systems Service</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>

ILRS	<i>International Laser Ranging Service</i>
IOS	<i>Índice de Oscilação Sul</i>
ISDC	<i>Information System and Data Center</i>
ITG	<i>Institute of Theoretical Geodesy</i>
ITRF	<i>The International Terrestrial Reference Frame</i>
JGM	<i>Joint Gravity Model</i>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
KBRR	<i>K-band Range Rate</i>
LAGEOS	<i>Laser Geodynamics Satellites</i>
LRR	<i>Laser Retro-Reflector</i>
MMA	<i>Ministério do Meio Ambiente</i>
MASCON	<i>Mass Concentration blocks</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
mTc	<i>Tropical Continental</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NetCDF	<i>Network Common Data Form</i>
NGA	<i>National Geospatial-Intelligence Agency</i>
NIMA	<i>National Imagery and Mapping Agency</i>
OMP	<i>Observatoire Midi-Pyrénées</i>
PCH	<i>Pequena Central Hidrelétrica</i>
PO.DAAC	<i>Physical Oceanography Distributed Active Archive Center</i>
PRARE	<i>Precise Range and Range-Rate Equipment</i>
RBMC	<i>Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo</i>
RDC	<i>Raw Data Center</i>
RIMA	<i>Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas</i>
RN	<i>Referências de Nível</i>
SAG	<i>Sistema Aquífero Guarani</i>
SAO	<i>Smithsonian Astrophysical Observatory</i>
SCA	<i>Star Camera Assemblies</i>
SDT	<i>Secretaria de Desenvolvimento Territorial</i>
SERH-RS	<i>Sistema Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul</i>
SGB	<i>Sistema Geodésico do Brasil</i>
SLR	<i>Satellite Laser Ranging</i>
SPI	<i>Índice de Precipitação Padronizada</i>
SPOT	<i>Satellite Pour l'Observation de la Terre</i>
S2iD	<i>Sistema Integrado de Informações sobre Desastres</i>
TUM	<i>Technische Universität München</i>
TWS	<i>Terrestrial Water Storage</i>
UHE	<i>Usina Hidrelétrica de Energia</i>
UTCSR	<i>University of Texas Center for Space Research</i>
UTEX	<i>University of Texas</i>
WGHM	<i>WaterGAP Global Hydrology Model</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>29</b>
<b>2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>35</b>
2.1	SUB-BACIA DO RIO URUGUAI – TRECHO ALTO.....	44
2.2	SUB-BACIA DO RIO URUGUAI – TRECHO MÉDIO .....	46
2.3	SUB-BACIA DO RIO IBICUÍ.....	49
2.4	SUB-BACIA DO RIO NEGRO .....	50
2.5	ASPECTOS FÍSICOS DA BACIA .....	50
2.6	CARACTERIZAÇÃO DAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS .....	65
2.7	POTENCIAL HIDRELÉTRICO .....	68
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>73</b>
3.1	A GRAVIDADE .....	73
<b>3.1.1</b>	<b>Mensuração da Gravidade .....</b>	<b>84</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Satélites Geodésicos.....</b>	<b>87</b>
3.2	MISSÃO GRACE .....	92
<b>3.2.1</b>	<b>Soluções MASCON.....</b>	<b>98</b>
3.3	SECA E ESTIAGEM .....	105
<b>3.3.1</b>	<b>Obtenção do Equivalente à Altura d'Água (EqW) por meio da Missão GRACE .</b>	<b>111</b>
3.4	MODIS .....	114
<b>3.4.1</b>	<b>Índices de Vegetação do MODIS .....</b>	<b>116</b>
3.5	PESQUISAS SOBRE A TEMÁTICA .....	117
<b>3.5.1</b>	<b>Aplicação Hidrológica.....</b>	<b>118</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>123</b>
4.1	ABORDAGEM METODOLÓGICA .....	123
4.2	DELIMITAÇÃO DA ÁREA E DO PERÍODO DA PESQUISA .....	125
4.3	SERVIÇO GEOLÓGICO BRASILEIRO .....	125
4.4	ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS ..	129
4.5	DECRETOS DE SITUAÇÃO DE EMERGÊNCIA E ESTADO DE CALAMIDADE PÚBLICA .....	133
4.6	ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NORMALIZADO .....	133
4.7	SOLUÇÕES MASCONS CSR GRACE RL05 .....	134
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>137</b>
5.1	EVENTOS DE ESTIAGENS RECONHECIDOS PELA DEFESA CIVIL .....	137
5.2	VARIAÇÃO DO EQW (EQUIVALENTE DO NÍVEL D'ÁGUA) CALCULADO PARA O PERÍODO .....	141
5.3	COMPARAÇÃO DO EQW COM OS POÇOS SUBTERRÂNEOS .....	156
5.4	ÍNDICE DE VEGETAÇÃO.....	168
5.5	CORRELAÇÃO ENTRE SVI E EqW .....	173
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>177</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>179</b>
	<b>ANEXO A - CÓDIGO PARA O CÁLCULO DO TWS.....</b>	<b>197</b>
	<b>ANEXO B - CÓDIGO PARA O CÁLCULO DO SVI.....</b>	<b>199</b>
	<b>APÊNDICE A - DADOS ESTATÍSTICOS DO EQW.....</b>	<b>203</b>
	<b>APÊNDICE B - MAPAS .....</b>	<b>207</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A Resolução n.32/2003 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) divide o Brasil em 12 Regiões Hidrográficas sendo que a menor delas é a Região Hidrográfica do Uruguai, que corresponde a apenas 2% do território do país. A Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai (Resolução CNRH n.30/2003) compreende uma área drenada total de cerca de 385.000 km<sup>2</sup> sendo que destes, 45% (ou seja, 174.500 km<sup>2</sup>) estão situados em território nacional.

Apesar de sua pequena expressão territorial em relação as demais regiões hidrográficas do País, as atividades agroindustriais e o potencial hidrelétrico colocam a Região Hidrográfica do Uruguai em lugar de destaque no cenário nacional. A população total da Bacia, no ano 2010 era de 6,2 milhões de habitantes (IBGE, 2010), desta 61% se concentra nos centros urbanos, inseridos em 354 municípios brasileiros.

A Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai apresenta algumas características diferenciadas das demais bacias brasileiras no que se refere ao seu comportamento hidrológico e uso da água entre outros.

De acordo com MMA (2006a), a Bacia se caracteriza por possuir uma baixa capacidade de armazenamento atribuída a geologia e geomorfologia com predominância de relevo acidentado no trecho alto da Bacia, seguido de um trecho mais plano na região da Campanha Gaúcha, com solo pouco profundo, o que faz com que o rio Uruguai escoe predominantemente em leito rochoso. Desta forma, o regime de vazão na bacia acompanha o regime de chuvas: quando da ocorrência de períodos de precipitações intensas, estas geram inundações<sup>1</sup> nas áreas ribeirinhas; e da mesma forma, quando ocorrem períodos de estiagens, as vazões são bruscamente reduzidas, até mesmo comprometendo a garantia de atendimento das demandas. Como o regime de chuvas na Bacia é bastante variado, as vazões seguem este regime, o que dificulta o planejamento da utilização da água na Bacia

Uma outra característica importante diz respeito à utilização da água para geração de energia hidroelétrica, principalmente no trecho alto da Bacia. O potencial hidráulico da Bacia é alto e os empreendimentos ali instalados têm bom desempenho, devido as suas características topográficas e geológicas, com a possibilidade de aproveitar os vales encaixados dos cursos de água. Ainda no que se refere à utilização dos recursos hídricos, a bacia possui um dos maiores

---

<sup>1</sup> Segundo a Defesa Civil, a inundação gradual como a submersão de áreas fora dos limites normais de um curso de água em zonas que normalmente não se encontram submersas. O transbordamento ocorre de modo gradual, geralmente ocasionado por chuvas prolongadas de intensidade moderada em áreas de planície (DEFESA CIVIL DO BRASIL, 2012).

valores de área irrigada do Brasil, com uma área irrigada, em 2012, foi de aproximadamente 455.600 ha, 7,9% do total brasileiro (ANA, 2009b; ANA, 2015), sendo que a região mais baixa do trecho médio do rio Uruguai possui vocação para a cultura do arroz irrigado e na Sub-bacias como a do rio Ibicuí por exemplo, este uso é responsável pela maioria da demanda por água, conflitando com o abastecimento público nos períodos de verão, principalmente em anos de estiagens prolongadas. Entretanto, a Região Hidrográfica do Rio Uruguai tem um índice de 92% de atendimento urbano d'água e um dos menores índices do País de cobertura quanto à coleta de esgotos, menor que 10% (ANA, 2009b).

Os maiores eventos de estiagens na Bacia do Hidrográfica do Rio Uruguai estão associados aos períodos de pouca ocorrência de precipitações. Isso quer dizer que, devido à baixa capacidade de armazenamento da Bacia e a grande profundidade dos mananciais subterrâneos mais volumosos, o regime de vazões é muito dependente do regime de chuvas. No verão de 2004/2005 conforme a Defesa Civil do Rio Grande do Sul, praticamente a totalidade dos Municípios da Bacia decretaram situação de emergência (SE) devido à estiagem. Os casos mais graves foram registrados no baixo trecho médio, onde ocorre a irrigação de arroz, que apresentou grandes perdas na safra; nas áreas de plantio de soja não irrigada, onde a perda foi ainda maior; e, o mais, grave, os problemas de abastecimento na região norte da Bacia, onde houve sério e intenso racionamento.

De acordo com a Conjuntura dos Recursos Hídricos (ANA, 2010), a Região Hidrográfica do Rio Uruguai registrou o maior número de municípios em situação de emergência devido ao evento estiagem no ano hidrológico 2008-2009, sendo a maior parte no Rio Grande do Sul. Em 2010, Rio Grande do Sul também foi o estado que mais registrou municípios com SE devido à estiagem (ANA, 2012)

No Brasil, os estudos hidrológicos têm sido desenvolvidos utilizando dados da rede hidrometeorológica nacional, sob responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA), que dispõe, no momento, de 1.852 estações fluviométricas, cadastradas no banco de dados HidroWeb, acessível pelo endereço eletrônico <http://hidroweb.ana.gov.br>.

Conforme Almeida Filho (2009), apesar da quantidade aparentemente significativa de estações fluviométricas, o país ainda carece de informações hidrológicas básicas, fato explicado em função de que, atualmente, a rede brasileira apresenta densidade de estações quatro vezes menor do que as redes de países como os Estados Unidos por exemplo. Em relação à distribuição geográfica, o autor afirma que, as recomendações da Organização Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization - WMO*) (WMO, 1994), uma bacia precariamente monitorada possuiria pelo menos uma estação por 5750 km<sup>2</sup>.

O Brasil possui uma estação a cada 4.669 km<sup>2</sup>, porém, com uma má distribuição geográfica. No caso da Bacia do Uruguai, ela possui 651 estações fluviométricas o que significa uma estação a cada 268,1 km<sup>2</sup> o que pode ser considerada como bem monitorada, porém, elas estão geograficamente mal distribuídas ao longo da bacia. A grande maioria das estações encontram-se no alto e médio Uruguai até o rio Ijuí, o que poderia estar associado a presença das Usinas Hidrelétricas e do grande número de Pequenas Centrais Elétricas (PCH's) porém, nas sub-bacias do rio Ibicuí e rio Negro elas são em menor quantidade sendo que neste último existem somente 2 na parte Nacional.

A carência ou ausência de informações hidrológicas em regiões que são fortemente afetadas por estiagem como as sub-bacias dos rios Ibicuí e Negro tem como consequência uma utilização elevada dos recursos hídricos da Bacia, entretanto, estas informações não estão sistematizadas, para se ter um histórico desse evento somente nos registros da Defesa Civil.

Não se pode afirmar com certeza a motivo deste evento, que é um evento pontual, e que vêm assumindo uma tendência a se tornar cíclico.

Sabe-se que a instalação, coleta de dados e monitoramento das estações são operações de custo elevado e por isso, novas tecnologias estão sendo incorporadas como a utilização de dados geodésicos obtidos de missões espaciais como a *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE), por exemplo. Estudos de integração entre dados convencionais e geodésicos possibilitam transformar a variação gravimétrica da terra em altura de corpos de água, vem sendo aplicados no Brasil, principalmente na Bacia Amazônica (ALMEIDA FILHO, 2009; CHEN, 2009; XAVIER, 2012; MEDEIROS, 2016), possibilitando uma melhora no conhecimento hidrológico de grandes bacias e sendo a maioria desses dados fornecidos gratuitamente por agências internacionais.

Os levantamentos gravimétricos são baseados em medidas das variações do campo da gravidade da Terra. A gravimetria (do latim: gravis = peso, e do grego μετρέω = medida) portanto, consiste de um conjunto de técnicas que tem por finalidade a medida da intensidade da gravidade. A gravimetria exerce fundamental importância sobre os levantamentos geodésicos, principalmente entre as componentes geométricas dadas pelas técnicas de posicionamento, como a altitude elipsóidica e as componentes físicas dadas pelo campo gravitacional da Terra, como por exemplo, altitude ortométrica.

O estudo do campo da gravidade, externo da Terra é um dos objetivos primordiais da Geodésia (GEMAEL, 2002). Para alcançá-lo, o geodesta vale-se dos conceitos, técnicas e procedimentos que, didaticamente, constituem a chamada Geodésia Física. Além de fornecer subsídios à Geodésia, os levantamentos gravimétricos contribuem de forma importante para

estudos geológicos e geofísicos, dentre outras áreas de conhecimento. O objetivo da gravimetria, portanto é determinar o campo da gravidade da Terra, ou de qualquer outro corpo celeste, como função da posição e do tempo através da medição do valor da gravidade e do seu gradiente na superfície do corpo ou nas suas imediações (TORGE, 1989).

A era espacial, iniciada com o lançamento do Sputnik em 1957, o primeiro satélite artificial a orbitar a Terra, possibilitou uma revolução na Geodésia e um avanço considerável na obtenção dos coeficientes das funções harmônicas esféricas dos modelos do geopotencial, denominados de STOKES. As comparações entre as órbitas preditas e realizadas pelos satélites artificiais permitem obter esses coeficientes de baixo grau e ordem, como o C20 (achatamento), de forma mais precisa do que somente valendo-se de medidas terrestres de gravidade de forma que os longos comprimentos de onda podem ser melhor estimados (ALMEIDA FILHO, 2009).

As missões espaciais gravitacionais modernas são caracterizadas por órbitas baixas (aproximadamente 450 km), quase-polares ( $\sim 89^\circ$ ) e trajetórias precisamente determinadas pelos sistemas laser e *Global Positioning System* (GPS). Estas missões fazem a avaliação da variação do campo gravitacional através das perturbações orbitais dos satélites monitoradas pelos equipamentos embarcados, contribuindo significativamente para a obtenção do potencial perturbador e para as componentes do campo anômalo, como o distúrbio da gravidade. Uma destas missões espaciais é conhecida como GRACE.

A *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) é um projeto conjunto da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), da *University of Texas Center for Space Research* (UTCSR) e da agência espacial alemã *Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt - GeoForschungs Zentrum* (DLR-GFZ). O principal diferencial desta missão em relação às anteriores é a existência de dois satélites gêmeos separados por uma distância de  $\sim 220$  km monitoradas por um distanciômetro embarcado, composto por um sistema de micro-ondas instalado de forma a medir a separação entre os satélites com precisão de até  $1\mu\text{m}$  cujo principal objetivo é mapear as variações do campo gravitacional da Terra no tempo (ALMEIDA FILHO, 2009).

O fornecimento periódico dos coeficientes de STOKES pelo *Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale* (GRGS) se dá a cada 10 dias, com resolução de 400km (grau e ordem 50), e são obtidos a partir do rastreamento da missão GRACE, o que facilita o cálculo das variações no tempo do campo gravitacional com maior precisão em todo o planeta.

Os blocos de concentração de massa (*Mass Concentration blocks* - mascons) são outra forma de se calcular as variações do campo gravitacional, desenvolvidas em uma grade geodésica (SAVE et al., 2016). Com as soluções mascons não é mais necessário aplicar o pós-



processamento aos harmônicos esféricos ou fatores de escala empíricos da missão GRACE, podendo ser usadas para as aplicações da missão GRACE.

Dados derivados da missão GRACE estão sendo utilizados para estudos de seca/estiagem em bacias hidrográficas, como a pesquisa de Getirana (2015) que usou dados da missão para detectar e quantificar uma grande seca estendida no leste do Brasil e fornecer estimativas de áreas impactadas e déficits de água específicos da região. Sun et al. (2016), utilizaram campos de armazenamento terrestre de água (TWS), medidas invertidas da missão GRACE, para avaliar e quantificar a seca em curso sobre a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Scanlon et al. (2016), compararam a amplitude das anomalias de armazenamento total de água terrestre (TWSA) de abril de 2002 a março de 2015 de (1) mascons GRACE recém-lançados do *Center for Space Research* (CSR-M) com (2) mascons da NASA JPL (JPL-M) e com (3) CSR Tellus harmônicos esféricos em grade redimensionados (sf) (CSRT-GSH.sf) em 176 bacias hidrográficas, 60% da área terrestre global.

O objetivo geral desta pesquisa é, portanto, analisar as variações do armazenamento total de água a partir dos dados obtidos das soluções mascons da missão GRACE na Região Hidrográfica da Bacia do Uruguai, permitindo um melhor conhecimento do período de estiagem e comportamento ao longo dos rios, principalmente nas áreas de baixa cobertura das estações fluviométricas num período entre os anos de 2003 e 2015.

Como objetivos específicos pretende-se:

- Calcular e avaliar o armazenamento total d'água com os dados da missão GRACE para o período entre os anos de 2003 a 2015;
- Correlacionar os dados oriundos da missão GRACE com os decretos de Situação de Emergência (SE) e Estado de Calamidade Pública (ECP) da Defesa Civil relacionado aos períodos de estiagem;
- Correlacionar os dados da missão GRACE com os níveis dos poços subterrâneos da CPRM/SGB, localizados na bacia obtidos do monitoramento realizado pelo Serviço Geológico do Brasil;
- Comparação entre os períodos de estiagem observados pela missão GRACE com os índices de vegetação normalizado gerados pelo sensor MODIS a bordo do satélite TERRA.

A partir de uma correta compreensão do comportamento do equivalente à altura d'água da bacia, será possível estimar o regime de estiagem, bem como as cotas d'água para regiões não monitoradas in-situ, de modo a fornecer suporte para elaboração de políticas de gestão de

recursos hídricos como, por exemplo, uso d'água e fornecer subsídios para o transporte hidroviário da região.

Este trabalho justifica-se pelo fato de que o conhecimento mais profundo do evento de estiagem da bacia do rio Uruguai é fundamental para a subsistência da população local, transporte e acesso em algumas regiões, agricultura, atividade pesqueira (pescadores artesanais) etc. As medidas de gravidade terrestre e obtenção de cotas de água *in situ* são caras e necessitam de uma logística bastante complexa porém, com o lançamento das missões espaciais modernas, como a missão GRACE, é possível monitorar bacias hidrográficas com relativa precisão no que diz respeito às variações climáticas e de transporte de massa d'água que, por sua vez, afetam o campo gravitacional da Terra.

Esta tese está estruturada da seguinte forma: no capítulo 1, a introdução onde é apresentado do tema da pesquisa, justificativa e objetivos. No capítulo 2, apresenta a área de estudo e sua caracterização. No capítulo 3, encontra-se o embasamento teórico e os principais assuntos abordados na tese. No capítulo 4, estão os matérias e métodos utilizados nesta pesquisa. No capítulo 5, são apresentados os resultados e suas respectivas análise. O capítulo 6, refere-se as conclusões e recomendações para futuras pesquisas.

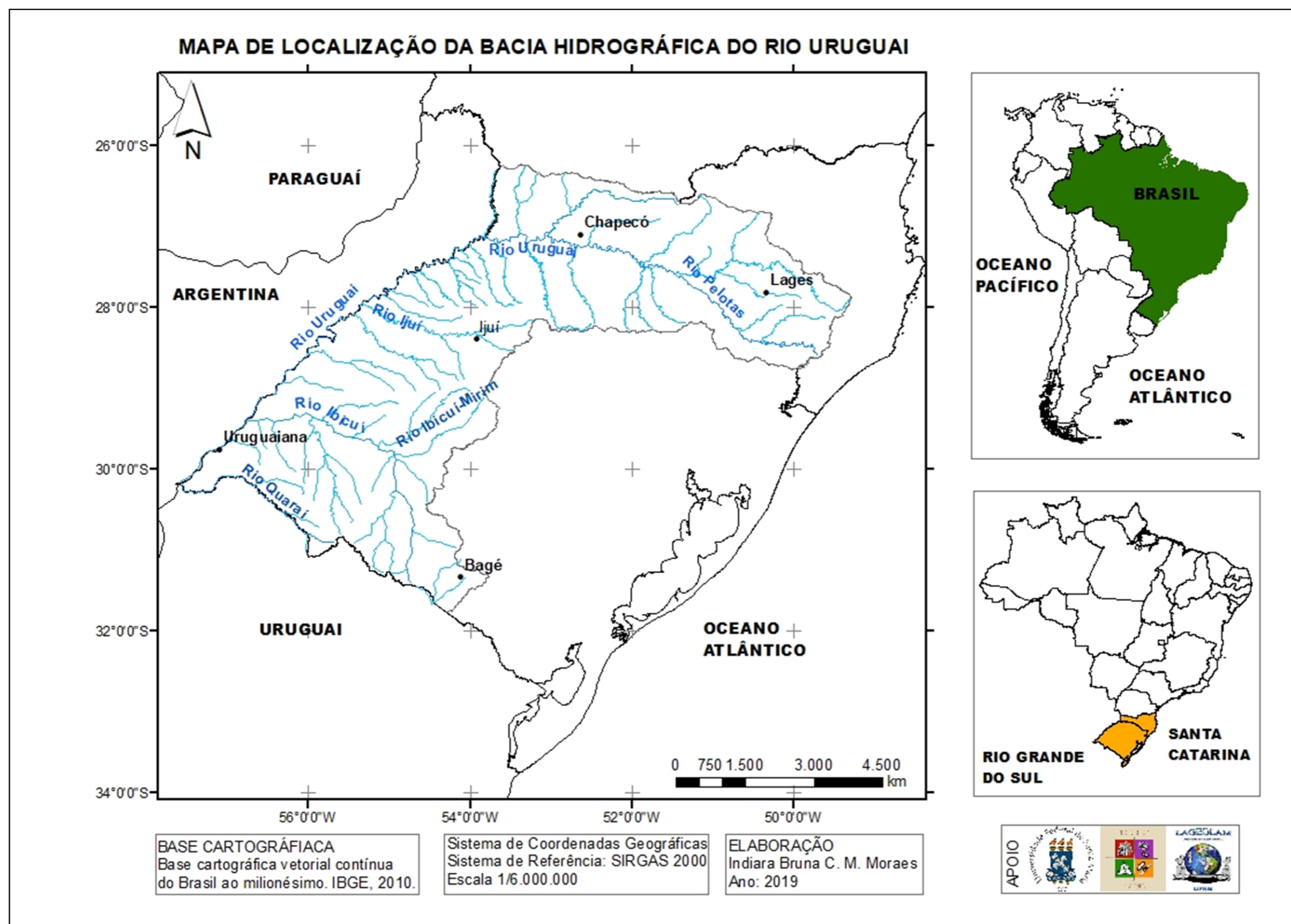
## 2 CARACTERIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde a porção brasileira da Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai. A Região Hidrográfica do Uruguai (Figura 1), correspondendo a apenas 2% do território brasileiro, porém, apesar de sua pequena extensão territorial, as atividades agroindustriais e o potencial hidrelétrico colocam a Região Hidrográfica do Uruguai em um lugar de destaque no cenário nacional.

A Região Hidrográfica do Uruguai possui em território brasileiro 174.500 km<sup>2</sup> (ANA, 2005), abrangendo 45.600 km<sup>2</sup> no Estado de Santa Catarina (27%) e 128.900 km<sup>2</sup> no Estado do Rio Grande do Sul (73%) (ANA, 2015). A disponibilidade hídrica da Região Hidrográfica do Uruguai é de 565 m<sup>3</sup>/s, ou seja 0,6% da disponibilidade hídrica nacional (91.071 m<sup>3</sup>/s), e a vazão média é de 4.103 m<sup>3</sup>/s, correspondendo a 2,3% da vazão média nacional (179.516m<sup>3</sup>/s). A vazão de retirada (demanda total) é 155,4 m<sup>3</sup>/s (cerca de 7% da demanda nacional) e a vazão específica, de 23,5 L/s/km<sup>2</sup>. O volume máximo de reservação per capita é de 3.388 m<sup>3</sup>/hab., pouco abaixo da média brasileira, de 3.607 m<sup>3</sup>/hab. (ANA, 2015).

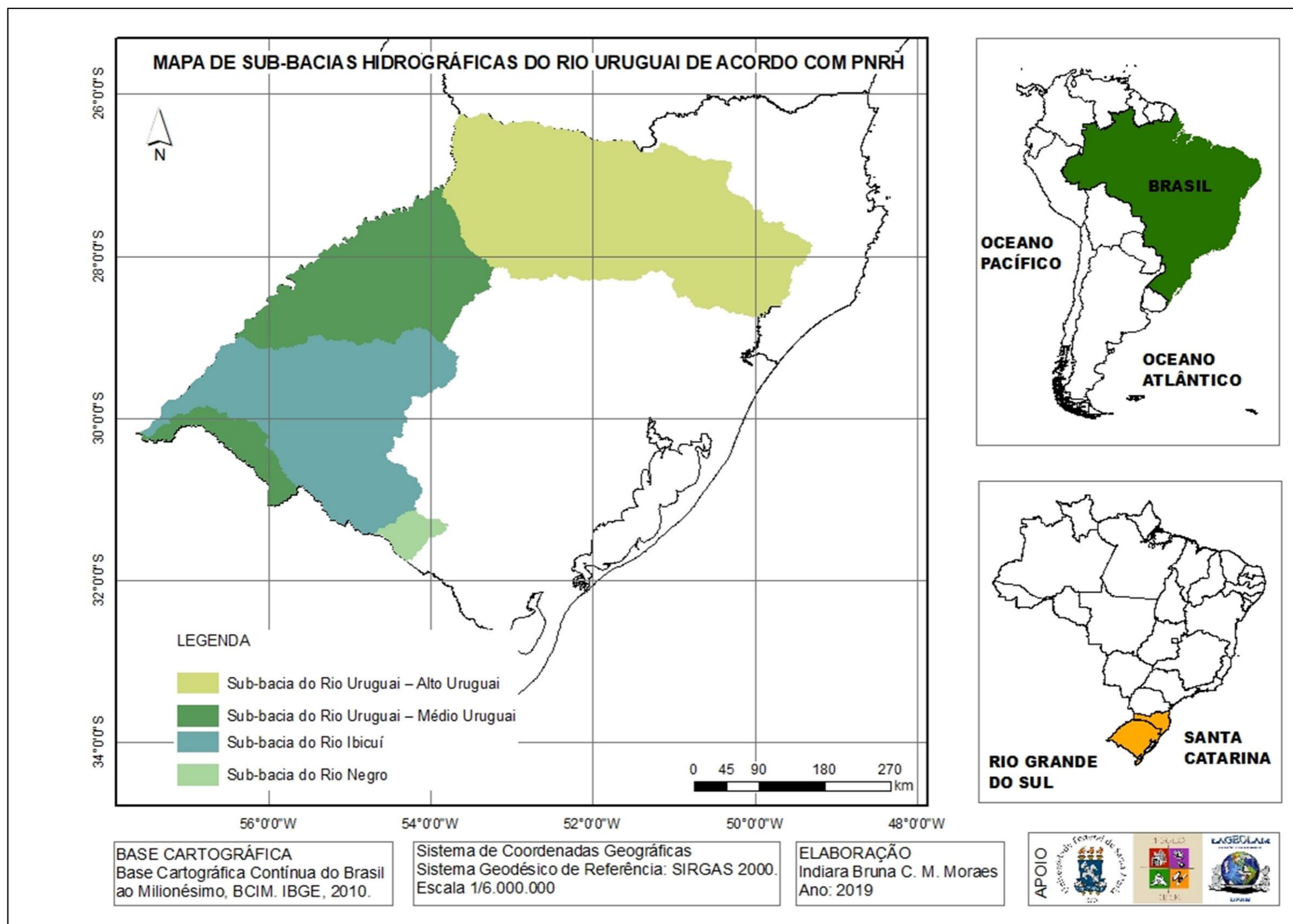
O rio Uruguai é formado da confluência do rio Pelotas com o rio Canoas, a partir daí percorre 2.200 quilômetros, até a sua foz no estuário do rio da Prata. Após a confluência de seus formadores, o rio Uruguai escoar na direção leste-oeste constituindo a divisa entre o Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Neste trecho recebe importantes contribuições dos rios do Peixe, Irani, Chapecó e Antas (margem Catarinense) e dos rios Apuaê, Inhandava, Passo Fundo, da Várzea e Guarita (margem esquerda ou Gaúcha). Ao receber as águas do rio Peperi-Guaçu, toma a direção sudoeste, passando a seu trecho fronteiroço, onde recebe os seguintes afluentes pela margem esquerda, em território nacional: Turvo, Santa Rosa, Santo Cristo, Ijuí, Icamaquã, Piratini, Butuí e Ibicuí. Após a afluência do rio Quaraí, deixa de banhar o território brasileiro, dirigindo-se para o sul, passando a dividir a Argentina e o Uruguai, até sua foz (SRH,2006).

Figura 1 - Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai.



A Bacia Hidrográfica do Uruguai foi dividida em quatro grandes sub-bacias, devido a sua extensão e à diversidade paisagística, conforme o estabelecido no Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH - Resolução N° 32) que são: 1) do Alto Uruguai; 2) do Médio Uruguai; 3) do Rio Ibicuí; 4) do Rio Negro conforme Figura 2.

Figura 2 - Mapa das Sub-bacias Hidrográficas do Rio Uruguai de acordo com PNRH.



Estas quatro grandes Sub-bacias foram subdivididas em 10 unidades menores, nomeadas de Sub-bacias de nível 2. O Quadro 1 apresenta as divisões do rio Uruguai em sub-bacias de nível 1 e nível 2 com suas respectivas áreas de extensão.

De acordo com a ANA (2015), a Região Hidrográfica do Uruguai (RH) apresenta duas áreas especiais para gestão: a bacia do rio Negro e a bacia do rio Quaraí. Essas áreas são baseadas em trechos críticos de rios federais, definidos segundo o balanço hídrico quali-quantitativo. A metodologia de identificação de trechos críticos está descrita na Nota Técnica Conjunta ANA n° 002/2012/SPR/SRE, e a lista completa de trechos críticos identificados consta na Portaria ANA n° 62, de 26 de março de 2013.

Quadro 1 - Compartimentação da bacia hidrográfica do Uruguai e suas respectivas áreas.

Bacia Hidrográfica	Área em km <sup>2</sup>	Sub-bacia nível 1		Sub-bacias nível 2	
		Nome	Área (km <sup>2</sup> )	Nome	Área (km <sup>2</sup> )
Uruguai	174.533	Alto Uruguai	76.209	Pelotas	13.227
				Canoas	14.898
				Uruguai Alto	48.084
		Médio Uruguai	47.581	Uruguai 1	10.810
				Ijuí	10.849
				Uruguai 2	16.465
				Quaraí	9.457
		Ibicuí	47.320	Santa Maria	15.784
				Uruguai 3	31.536
		Negro	3.008	Negro	3.008

Fonte: Adaptado de SRH (2006), citado em Relatório FRAG-RIO, 2011.

Cerca de 6,2 milhões de pessoas vivem na parte brasileira da RH (IBGE, 2010), com maior concentração nas unidades hidrográficas de Chapecó, Canoas, Ibicuí e Turvo, onde 61% da população se concentra nos centros urbanos. A densidade demográfica da região é de 22,8 hab./km<sup>2</sup>, similar média brasileira que é de 22,4 hab./km<sup>2</sup> (ANA, 2015).

A região possui um total de 354 municípios, dos quais merecem destaque: Chapecó/SC, com aprox. 168 mil hab., Lages/SC, com aprox. 154 mil hab., Uruguaiana/RS, com aprox. 117 mil hab., Bagé/RS, com aprox. 116 mil hab., Erechim/SC, com aprox. 90 mil hab., Santana do Livramento/RS, com aprox. 75 mil hab., Santo Ângelo/RS, com aprox. 72 mil, Ijuí/RS, com aprox. 72 mil hab. e Alegrete/RS, com aprox. 70 mil hab.

Segundo Rossato (2011), o clima da Bacia que corresponde a área no estado do Rio Grande do Sul é classificado como Subtropical Ia e Ib, Subtropical II, Subtropical III e Subtropical IVa e IVb. O clima Subtropical Ia é a área com maior influência dos sistemas polares e com menor participação dos sistemas tropicais conjugados com a influência do relevo (Escudo Sul-riograndense e Planície Costeira) e da corrente fria das Malvinas (*Falklands*).

Os sistemas frontais são responsáveis pela maior parte das precipitações que variam entre 1200-1500 mm anuais, distribuídos em 80-100 dias de chuva, onde os menores valores de precipitação pluvial se distribuem mensalmente em cerca de 6-9 dias de chuva. A temperatura média anual varia entre 17-20°C, a temperatura média do mês mais frio oscila entre 11-14°C e a temperatura média do mês mais quente varia entre 20-26°C.

O clima Subtropical Ib é caracterizado como a área com maior influência dos sistemas polares e com maior participação dos sistemas tropicais continentais em associação com o efeito da continentalidade e do relevo (*Cuesta do Haedo*), sendo os sistemas frontais responsáveis pela maior parte das precipitações que variam entre 1400-1700 mm ao ano, concentrada em 70-90 dias de chuva, onde essa chuva se concentra em pouco dias ao mês (entre 6 e 9) nos meses de outono e primavera, com temperatura média anual entre 20-23°C, a temperatura média mensal variando entre 23-29°C.

O clima Subtropical II é caracterizado como a área com maior influência dos sistemas polares e continentais, porém com interferência crescente dos sistemas tropicais marítimos, sendo influenciando, também, pelo relevo (Depressão Central), a continentalidade e a maritimidade, sendo os sistemas frontais responsáveis pela maior parte das precipitações que oscilam entre 1500-1700 mm anuais distribuídas em 90-110 dias, mensalmente, entre 6 a 9 dias, com temperatura média e nos meses de outono e primavera, com a temperatura média mensal mais fria entre 11 a 14°C e a mensal mais quente entre 23-26°C.

O clima Subtropical III têm influência do relevo (escapas e vales da borda do Planalto Basáltico), chove entre 1700-1800 mm/aa em 100-120 dias de precipitação, com um leve aumento nos dias de chuvas mensais que nesta região variam entre 9-12 dias, sendo a temperatura média anual entre 17-20°C, com a temperatura média do mês mais frio oscilando entre 11-14°C e a temperatura média do mês mais quente variando entre 23-26°C, sendo que as temperaturas aumentam em direção ao oeste da região, além dos grandes centros urbanos do RS.

O clima Subtropical IVa sofre influência do relevo (Planalto Basáltico e vale do rio Uruguai) conjugado com sistemas tropicais marítimos e continentais, com menor influência dos sistemas polares, sendo os sistemas frontais responsáveis pela maior parte das precipitações que



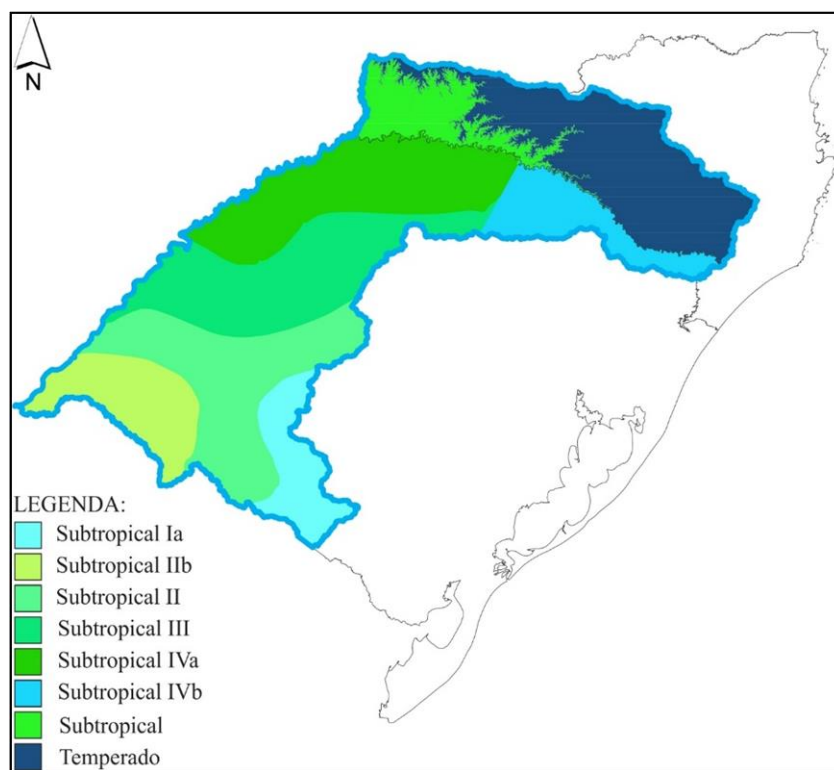
variam entre 1700-1900 mm/aa distribuídos entre 110-140 dias, sendo chuvas bem distribuídas (9-12 dias ao mês), com redução dos totais de precipitação nos meses de inverno, com a temperatura média anual variando entre 20-23°C, com a temperatura do mês mais frio oscilando entre 14-17°C e a temperatura média do mês mais quente variando entre 23-29°C, caracterizando como a região que possui o conjunto de médias de temperaturas mais alta do estado.

Finalmente, o clima Subtropical IVb, sendo a área com menos influência dos sistemas polares, entretanto com maior atuação dos sistemas tropicais marítimos conjugados com efeito do relevo-altitude (Planalto Basáltico), sendo os sistemas frontais responsáveis pela maior parte das precipitações que variam entre 1700-2000 mm/aa bem distribuídas em 130-150 dias, sendo mensalmente a região com maior quantidade de precipitações (12-15 dias), com a temperatura média anual variando de 14 a 17°C, a temperatura média do mês mais frio oscilando entre 8-14°C, e a temperatura média do mês mais quente variando entre 17 a 23°C, caracterizando como a região que possui o conjunto de médias de temperaturas mais baixas do RS.

Na parte da bacia que se localiza no estado de Santa Catarina, usou-se a classificação climática de Köppen. Nas áreas onde o relevo é mais baixo, próximas ao rio Uruguai a temperatura do mês mais quente é superior a 22°C e o clima é classificado como sendo Subtropical (Cfa). Em contraponto nas áreas de temperatura do mês mais quente inferior a esta, ou seja, nas partes mais altas da Bacia, o clima é Temperado – Cfb (NIMER, 1989).

A Figura 3, mostra a distribuição espacial do clima dentro da bacia, lembrando que mesmo não sendo correto cartograficamente demonstrar dados de escalas diferentes no mesmo mapa, é importante despontar as diferenças climáticas na bacia, podendo verificar mais adiante no presente estudo, a análise temporal da estiagem. O clima Subtropical IVa da classificação da Rossato (2011) corresponde ao clima Subtropical (Cfa) da classificação de Köppen, assim como o clima Subtropical IVb corresponde ao clima Temperado (Cfb).

Figura 3 - Distribuição espacial do clima na bacia. Não se deve tirar valores da mesma, pois é apenas uma representação qualitativa.



Fonte: Adaptado de Rossato (2011) e Nimer (1989), por MORAES, 2019.

As chuvas são bem distribuídas ao longo de todo o ano, mas com concentração média maior no inverno (maio a setembro). Segundo dados do Inmet, a precipitação média anual é de 1.623 mm, pouco abaixo da média nacional, de 1.761 mm. A sua disponibilidade hídrica é de 565 m<sup>3</sup>/s, ou seja 0,6% da disponibilidade hídrica nacional (91.071 m<sup>3</sup>/s), e a vazão média é de 4.103 m<sup>3</sup>/s, correspondendo a 2,3% da vazão média nacional (179.516m<sup>3</sup>/s). A vazão de retirada (demanda total) é 155,4 m<sup>3</sup>/s (cerca de 7% da demanda nacional) e a vazão específica, de 23,5 L/s/km<sup>2</sup>. O volume máximo de reservação per capita é de 3.388 m<sup>3</sup>/hab., pouco abaixo da média brasileira, de 3.607 m<sup>3</sup>/hab (ANA, 2015).

Conforme o diagnóstico da Fundação Getúlio Vargas (1998, *apud* MMA. 2006) a orografia é um fator importante na formação de chuvas. Cidades como Santo Augusto, Ijuí e Erechim no Rio Grande do Sul, Herval do Oeste, São Miguel do Oeste e Xanxerê, em Santa Catarina apresentam precipitações mais elevadas do que outras localidades próximas em razão do efeito orográfico. Nas áreas mais planas as chuvas são menores com registros de estiagens devidas à baixa umidade dos ventos.

A análise do regime de chuvas não permite identificar um período de estiagem característico, já que os valores médios mensais de precipitação são muito próximos entre si, porém, o que pode ser constatado é um acentuado déficit de umidade nos meses de verão, já que os valores de evaporação superam os de precipitação. Os eventos de estiagens registrados nos verões de 2003/2004 e 2004/2005 apontam que os usos da água na Bacia operam com elevado índice de risco. Segundo a Defesa Civil do Rio Grande do Sul, no verão de 2004/2005 praticamente a totalidade dos Municípios da Bacia decretaram “situação de emergência” devido à estiagem. Os casos mais graves foram nas áreas de plantio de soja não irrigada, onde a perda foi ainda maior; e, o mais, grave, os problemas de abastecimento na região norte da Bacia, onde houve sério e intenso racionamento.

Os meses de inverno apresentam diferenças significativas de precipitação em relação à baixa evapotranspiração, sendo naturalmente o período de excesso hídrico (FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS, 1998; *apud* MMA, 2006) o que acarreta um grande número de eventos de inundações que atingem principalmente às populações ribeirinhas ao longo do curso principal do rio e também de alguns outros contribuintes, como o rio Chapecó. As cidades mais atingidas são Aratiba, Caiçara, Crissiumal, Iraí, Itaqui, Machadinho, Marcelino Ramos, Mariano Moro, Maximiliano de Almeida, Nonoai, Porto Lucena, Porto Xavier, São Borja, São Nicolau, Uruguiana e Vicente Dutra no Rio Grande do Sul, e Chapecó, Xanxerê, Joaçaba, Lages e Campos Novos, em Santa Catarina.

Com relação à vegetação, a bacia apresentava, originalmente, nas nascentes do rio Uruguai, os Campos e a Mata com Araucária e, na direção sudoeste a Mata do Alto Uruguai, Mata Atlântica. Atualmente, a região encontra-se intensamente desmatada e apenas regiões restritas conservam a vegetação original (ANA, 2016).

De acordo com o Diagnóstico Geral das Bacias Hidrográficas de Santa Catarina (1997), na bacia do rio Canoas/Pelotas, principalmente as florestas de pinheiros (araucária) foram devastadas pela indústria madeireira. Como consequência, a vegetação primária e a secundária ocupam, em média, 18% da área da bacia. Mesmo assim, a região continua a dedicar-se à indústria madeireira e à produção de papel e celulose. Por essa razão, as áreas reflorestadas atingem, em média, 6% de sua área total. A destruição da vegetação original deve-se também à expansão agrícola, especialmente das lavouras de arroz irrigado na região da Campanha e soja e trigo no planalto.

No Rio Grande do Sul, as principais atividades econômicas desenvolvidas estão relacionadas principalmente com a agricultura, notabilizando-se as culturas do arroz irrigado, na bacia hidrográfica dos rios Butuí–Piratinim–Icamaguã, Santa Maria, Ibicuí e Quaraí, e soja

e milho, nas dos rios Ijuí, Turvo–Santa Rosa–Santo Cristo, Passo Fundo–Várzea e Apuaúê–Inhandava. (ANA 2005). Contudo, as culturas de arroz, geram riscos de contaminação por agrotóxicos, além de outros impactos, como a drenagem de banhados, a redução da mata ciliar e a perda da diversidade biológica. Nas áreas de minifúndio, localizadas junto aos vales, desenvolveram-se intensamente a suinocultura e a avicultura (ANA,2005), principalmente na região do Alto Uruguai.

No Médio Uruguai (de Ivaí até barra do Quaraí), correm atividades de mineração de pedras semipreciosas, areia e cascalho ao longo dos rios Ibicuí, Santa Maria e Uruguai (ANA, 2005).

## 2.1 SUB-BACIA DO RIO URUGUAI – TRECHO ALTO

A Sub-bacia do Alto Uruguai abrange dois estados brasileiros: Santa Catarina e Rio Grande do Sul. No estado de Santa Catarina, engloba dezesseis municípios que constituem o território, totalizando uma área total de 3.327 km<sup>2</sup>, o que representa cerca de 3,5% da superfície do estado de Santa Catarina, com uma população 145.737 habitantes e uma Densidade Demográfica (DD) de 43,8 hab./km<sup>2</sup>, pouco abaixo dos 64,8 hab./km<sup>2</sup> do estado de Santa Catarina e bem acima dos 21,7 hab./km<sup>2</sup> do Brasil (PTDRS, 2010).

A peculiaridade consiste na presença do município de Concórdia com 68.469 habitantes e uma DD de 85,9 hab./km<sup>2</sup>. Embora o Território tenha essa especificidade, a média populacional dos dezesseis municípios é de apenas 8.097 habitantes, portanto pelos critérios da Secretaria de Desenvolvimento Territorial (SDT) trata-se de um território rural, segundo Plano de Desenvolvimento Territorial Rural Sustentável do Território do Alto Uruguai Catarinense do Estado de Santa Catarina (PTDRS, 2010). De acordo com PTDRS (2010), os municípios que compõem o Alto Uruguai catarinense são: Alto Bela Vista, Arabutã, Arvoredo, Concórdia, Ipira, Ipumirim, Irani, Itá, Jaborá, Lindóia do Sul, Paial, Peritiba, Piratuba, Presidente Castello Branco, Seara e Xavantina.

A Sub-bacia abrange os dois formadores do rio Uruguai e seu trecho inteiramente em território brasileiro. Envolve uma área de 76.209 km<sup>2</sup>, de relevo com grande declividade, com cotas variando de cerca de 1.600 m a 160 m, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2000). Neste trecho o rio Uruguai tem alto potencial hidrelétrico, o que é garantido por este intenso gradiente de relevo. Os mais populosos Municípios da Região Hidrográfica estão nesta Sub-bacia, são eles: Lages e Chapecó. Esta Bacia foi subdividida em três: uma para

cada formador dos rios Uruguai, Pelotas e Canoas, e mais uma para o trecho em território nacional, Uruguai Nacional (MMA, 2006).

A Sub-bacia do Rio Pelotas tem área de drenagem de 13.227 km<sup>2</sup>. Trata-se de um rio de domínio da União, pois o rio Pelotas faz a divisa entre os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Os principais afluentes pelo lado catarinense (margem direita) são os rios Lava-Tudo, Pelotinhas, Vacas Gordas e Lajeado dos Portões. Já no lado gaúcho, destacam-se os rios Santana e Bernardo José. No lado do Rio Grande do Sul, a Sub-bacia ocupa uma parte da unidade U010 (Apuatê – Inhandava) da Sistema Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul (SERH-RS). Em Santa Catarina, a Sub-bacia insere-se na RH4, Sub-bacia do Rio Pelotas. Destaca-se a existência da Usina Hidrelétrica de Energia (UHE) Machadinho e da UHE Barra Grande e a possibilidade futura de instalação da UHE Pai Querê, todas no próprio rio Pelotas (MMA 2006).

Trata-se de uma Bacia com baixa ocupação antrópica. Os maiores municípios São Vacaria (RS) com 61.342 habitantes, parcialmente inserido na Bacia, e São Joaquim (SC), com 24.812 habitantes. Destacam-se a pecuária e o cultivo de maçã na região.

A Bacia do rio Canoas possui área de 14.084 km<sup>2</sup>, constituindo-se na maior Bacia do Estado. A cidade de Lages com população de 156.727 habitantes, maior população da Região Hidrográfica, inserida nesta Sub-bacia, que tem população total superior a 400.000 habitantes. Na Bacia estão implantadas três usinas hidrelétricas: Campos Novos e Curitibanos no rio Canoas e Lages no rio Caveiras. As Sub-bacias do Rio Pelotas (lado catarinense) e do Rio Canoas, constituem a sub-região do Planalto de Lages.

Com área de 48.084 km<sup>2</sup>, esta Sub-bacia do Alto Uruguai ou nacional compreende a porção do rio Uruguai em território brasileiro. Consiste em ser a maior das 10 Sub-bacias em estudo na Região Hidrográfica, e também a de maior população, superior a 1.700.000 habitantes. Trata-se da Sub-bacia de maior concentração industrial, inclusive apresentando comprometimento da qualidade dos recursos hídricos, a partir das fontes poluidoras de origem industrial. Ressalta-se também a intensa atividade suinícola. Na Bacia destacam-se a UHE Passo Fundo, no rio de mesmo nome, a UHE de Itá, no rio Uruguai, a UHE de Foz do Chapecó, situada entre os municípios de Águas de Chapecó, em Santa Catarina e Alpestre, no Rio Grande do Sul, no rio Uruguai, e a UHE Monjolinho, no rio Passo Fundo, entre os municípios de Nonoai e Faxinalzinho (RS).

No lado catarinense, encontram-se as Bacias dos rios do Peixe e Jacutinga (Região Hidrográfica 3); Irani e Chapecó (Região Hidrográfica 2); e das Antas e Peperi-Guaçu (Região Hidrográfica 1). No lado gaúcho localizam-se as Bacias dos rios: Apuatê e Inhandava (U010),

Passo Fundo (U020), Várzea e Guarita (U100). O rio Chapecó é o maior da Bacia. O rio Peperi-Guaçu é um rio de domínio da União por servir de fronteira entre o Brasil e a Argentina (MMA, 2006).

## 2.2 SUB-BACIA DO RIO URUGUAI – TRECHO MÉDIO

A partir desta Sub-bacia o rio Uruguai passa a condição de fronteiroço. Assim, as bacias que a integram referem-se as áreas em território brasileiro, mais especificamente do Rio Grande do Sul. São 47.581 km<sup>2</sup>, que a qualificam como uma região de grande diversidade de usos, pois a Bacia se estende por um longo trecho do Estado. Assim, nesta Sub-bacia, podem ser encontrados rios com grande potencial hidrelétrico, como o Ijuí, e também áreas com vocação para irrigação de arroz, como a Sub-bacia do Rio Quaraí. São quatro as subdivisões desta Sub-bacia, três delas delimitam Bacias contíguas: Uruguai 1, Uruguai 2 e Quaraí, e uma Bacia Hidrográfica: Ijuí (MMA, 2006).

Neste trecho, está localizada a Usina Hidrelétrica Binacional de Salto Grande (Represa de Salto Grande), aproximadamente 15km ao norte das cidades de Salto (Uruguai) e Concordia (província de Entre Ríos, Argentina).

O território Médio Alto Uruguai – RS é composto por 34 municípios, com população total do território de 189.946 habitantes. Seu IDH médio é 0,76.

A Sub-bacia Uruguai 1 corresponde a unidade U030 da divisão do Rio Grande do Sul em Bacias Hidrográficas, conhecida como a Bacia dos rios Turvo, Santa Rosa e Santo Cristo. Em verdade, trata-se de um conjunto de Bacias contíguas de sete afluentes do rio Uruguai: Turvo, Lajeado Grande, Buricá, Santa Rosa, Santo Cristo, Amandaú e Comandai. A Bacia ocupa uma área de 10.810 km<sup>2</sup>, com uso do solo destinado a cultura da soja, em rotação com milho e outras culturas relacionadas a esta: feijão, trigo, aveia etc. e os principais usos da água se destinam a dessedentação animal, abastecimento humano e irrigação. Por se tratarem de pequenos cursos de água, com no máximo, 2.500 km<sup>2</sup> de área de drenagem, o potencial hidrelétrico da sub-bacia é baixo, apesar de existirem algumas pequenas centrais de geração de energia. Outro uso da água que se reveste de importância é a suinocultura, com forte potencial de poluição de mananciais, inclusive os utilizados para abastecimento público.

Na Bacia destaca-se o Parque Estadual do Turvo no extremo norte da mesma, onde se encontram as cataratas do Yucumã (Figura 4) que marcam a divisa entre o trecho alto e médio do rio Uruguai (MMA, 2006).

Figura 4 - Salto do Yucumã, PE do Turvo.



Fonte: D. Meller. <https://parquedoturvo.wordpress.com/uso-publico/salto-do-yucuma/>

A Bacia Hidrográfica do Rio Ijuí possui área de 10.849 km<sup>2</sup>. Seu rio principal, de mesmo nome, caracteriza-se por um extremo potencial hidrelétrico, ainda pouco explorado, mas com grande possibilidade de vir a ser em curto prazo. O uso do solo também é marcado pela cultura de soja, de forma análoga a Bacia anterior, porém com maior utilização de irrigação por pivô central. Está sub-bacia coincide com a unidade U090 do Sistema Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul (SERH-RS), e foi palco de um estudo pioneiro, realizado pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM), em busca de diretrizes para o licenciamento ambiental de atividades do setor de geração de energia hidroelétrica na Bacia (MMA, 2006).

A Sub-bacia Uruguai 2 representa mais um conjunto de Bacias contíguas de afluentes do rio Uruguai, que ocupam uma área de 16.465 km<sup>2</sup>, configurando a maior unidade da Sub-bacia Médio Uruguai. Situada ao norte-noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, compreende a província geomorfológica Planalto Meridional. Possui área de 10.703,78 km<sup>2</sup>, abrangendo municípios como Cruz Alta, Ijuí, Santo Ângelo e Tupanciretã. Os principais cursos de água são os rios Caxambu, Potiribu, Conceição, Ijuizinho e o Rio Ijuí, sendo as principais utilizações hídricas destinadas a irrigação e ao abastecimento público. Os municípios mais populosos da bacia são o Ijuí com 78.915 habitantes, e Panambi com 38.058 habitantes.

A unidade U040 da divisão do Rio Grande do Sul (Butuí – Piratinim – Icamaguã) está totalmente inserida nesta unidade, que abrange ainda um trecho da U050. Caracteriza-se como uma região de transição entre o planalto e a Campanha. Assim é possível encontrar um rio com potencial de geração de energia, como o Icamaguã, como também uma área com vocação para

o plantio de arroz, como a Bacia do Butuí. Esta transição no potencial de uso do solo e da água vai acompanhando a mudança no relevo da Bacia.

Merece destaque a região da Reserva Biológica do São Donato - Banhado São Donato (Figura 5), na porção sudoeste da Bacia. Há ainda que se considerar a possibilidade da implantação de uma UHE no rio Uruguai que alteraria as condições locais, a usina de Garabi (MMA, 2006).

Figura 5 - Reserva Biológica do São Donato.



Fonte: <http://www.sema.rs.gov.br/reserva-biologica-do-sao-donato>

A sub-bacia do Rio Quaraí situa-se a oeste-sudoeste do Estado, ocupa uma área de 9.457 km<sup>2</sup>, caracterizando-se como a menor desta unidade. Encontra-se fisicamente separada das outras três Sub-bacias pela Bacia do Rio Ibicuí, abrangendo 4 municípios, drenando uma área de 6.557,08 km<sup>2</sup>, contando com uma população de 29.720 habitantes. Trata-se de uma bacia transfronteiriça de águas compartilhadas entre a República Federativa do Brasil e a República Oriental do Uruguai, através do próprio Rio Quaraí, cujo eixo estabelece a fronteira entre os dois países.

No aspecto socioeconômico, os municípios da bacia têm suas atividades produtivas alicerçadas na pecuária extensiva, no cultivo do arroz irrigado e no pequeno comércio de fronteira, o que tem determinado a estagnação econômica da região. Há registros de conflitos relacionados com o aporte de esgotos não tratados nos cursos de água da Bacia. Próximo as cidades de Quaraí e Barra do Quaraí, a hidrografia apresenta problema com a elevada contaminação por afluentes urbanos, sobretudo nos períodos de verão. Por outro lado, a região tem sofrido, com uma frequência elevada de inundações, especialmente, na região urbana de



Quaraí e, bem à jusante, em Barra do Quaraí, onde também se faz sentir a influência dos níveis do Rio Uruguai.

Em relação aos aspectos ambientais, a bacia tem um baixo índice de degradação, porém apresenta riscos de arenização e de erosão, caso o solo não seja adequadamente manejado.

Nesta unidade encontra-se ainda o rio Touro Passo, afluente do rio Uruguai, onde também se destaca a irrigação de arroz. Comparando-se com a divisão do Rio Grande do Sul em Bacias Hidrográficas, encontra-se aqui a unidade U060 (Quaraí) e parte da U050 (Ibicuí) (MMA, 2006).

### 2.3 SUB-BACIA DO RIO IBICUÍ

Segundo Vieira (1984), esta bacia tem características um pouco diferenciadas das demais, tendo em vista a natureza do relevo. Boa parte do Rio Ibicuí tem seu curso em terrenos paleozóicos da bacia sedimentar do Paraná (Depressão Central). Já o curso médio inferior ocorre no capeamento basáltico, de pouca consistência. O alagamento das margens, várzeas e campos de pastagens é uma consequência do escoamento mais lento, face à gradientes de declives menores. Nos períodos de cheias, o rio se torna navegável em quase toda a extensão.

Esta unidade corresponde à Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí, incluindo seus afluentes o rio Santa Maria e o Ibirapuitã, juntamente com seus tributários à direita como o Toropi, Jaguari e Itu (COMITE IBICUI, 2013).

A área de drenagem é de 47.320 km<sup>2</sup>, nos quais se destaca a irrigação de arroz em rotação com a pecuária bovina (PROFILL, 2011). Situada na fronteira oeste do Estado e abrange parte das regiões fisiográficas da Campanha, Missões e Depressão Central. Os principais corpos de água são os rios Ibicuí, Itu, Ibirapuitã, Jaguari e um trecho do rio Uruguai. Dentro do território brasileiro, o principal afluente do rio Uruguai é o Ibicuí. O principal uso da água nesta bacia se destina a irrigação. Este uso pode ocasionar escassez hídrica nos meses de verão, principalmente causado à irrigação do arroz.

A Sub-bacia do Rio Santa Maria situa-se a sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, possui área de 15.784 km<sup>2</sup>, abrangendo municípios como Bagé, Dom Pedrito, Rosário do Sul, Santana do Livramento e São Gabriel, com população estimada em 220.296 habitantes (SEMA-RS). Seus principais formadores são o rio Santa Maria-Chico, o arroio Taquarembó, arroio Santo Antônio, o rio Cacequi, o arroio Poncho Verde, o rio Ibicuí da Armada e o arroio Saicã (FEPAM-RS).

Na Bacia destaca-se a utilização amplamente majoritária dos recursos hídricos para irrigação de arroz, o que tem gerado conflitos com o abastecimento público, principalmente em ocasiões de estiagens extremas. A extração de areia também é praticada na região. Destaca-se a existência de um plano de desenvolvimento para a Bacia, baseado na construção de operação de um conjunto de barramentos para regularização de vazões para irrigação. A Bacia possui o Comitê de Gerenciamento mais antigo da Região Hidrográfica, sendo o terceiro mais antigo do país (MMA, 2006).

Já a Sub-bacia Uruguai 3 (Ibicuí) ocupa uma área de 31.536 km<sup>2</sup> e abrange um conjunto de contribuintes do rio Ibicuí, além do próprio. Todos têm utilização predominante para a irrigação de arroz. São rios como: Ibicuí-Mirim, Toropi, Jaguari, Miracatu e Itu (pela margem direita); e Ibiratpuitã, Inhanduí e Ibirocaí (pela margem esquerda). A Bacia não apresenta conflitos tão graves quanto no caso anterior, Santa Maria, uma vez que ocorre uma menor concentração de uso e uma maior disponibilidade hídrica (MMA, 2006).

#### 2.4 SUB-BACIA DO RIO NEGRO

Finalmente, a Bacia do Rio Negro, que não sofre subdivisões, abrange as nascentes deste importante curso de água que atravessa a República do Uruguai, desaguando no rio Uruguai já próximo à sua foz. Assim, o rio Negro configura-se como um curso de água de domínio da União, uma vez que atravessa a fronteira do Brasil com o Uruguai. A Bacia possui uma pequena área, para os padrões desta Região Hidrográfica, de 3.008,0 km<sup>2</sup>, abrangendo municípios como Aceguá, Bagé, Candiota, Dom Pedrito e Hulha Negra, com população estimada em 106.982 habitantes. (MMA, 2006).

A Bacia Hidrográfica do Rio Negro situa-se a sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul. Abrange as províncias geomorfológicas Depressão Central e Escudo Sul-Riograndense. A Sub-bacia coincide com a unidade U080 do SERH-RS. Os principais cursos de água são os arroios Piraí, Piraizinho, Bagé e o Rio Negro. Os principais usos da água se destinam a irrigação de arroz, abastecimento humano e dessedentação animal (SEMA-RS).

#### 2.5 ASPECTOS FÍSICOS DA BACIA

A hidrogeologia, importante na avaliação desta pesquisa, é reflexo da geologia da bacia, isto é dos tipos litológicos, suas texturas e estruturas. Neste item será apresentada a geologia da

Bacia do Uruguai, geomorfologia, hidrogeologia e solos, que são aspectos físicos importantes e que interferem nos dados gravimétricos e de nível d'água da bacia.

A geologia da Bacia do Uruguai foi obtida da Carta do Brasil ao Milionésimo da Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais/CPRM (2006), onde os Fácies da Formação Serra Geral foram agrupados em dois tipos litológicos principais: rochas ígneas básicas e rochas ígneas intermediárias e ácidas com o objetivo de simplificar a leitura do mapa. As demais Formações mantiveram-se como no original (FRAG-RIO, 2011). O Quadro 2 apresenta um resumo das unidades geológicas da Bacia do Rio Uruguai.

Quadro 2 - Unidades Geológicas da Bacia do Rio Uruguai.

<b>Era</b>	<b>Período</b>	<b>Grupo</b>	<b>Formação</b>	<b>Tipo litológico</b>
Cenozóico	Quaternário		Depósitos Aluvionares/Coluvionares	Areias, cascalhos.
	Paleógeno		Santa Tecla	Arenito fino, conglomerado esbranquiçado, cimento silicoso ou carbonático e matriz arenosa.
			Tupanciretã	Arenitos.
Mesozóico	Cretáceo	São Bento	Complexo Alcalino de Lages	Sienitos, carbonatitos.
			Serra Geral – vulcânicas básicas	Basaltos, andesitos.
			Serra Geral – vulcânicas Intermediárias e ácidas	Riolito, riodacitos, dacitos.
	Jurássico		Botucatu	Quartzo-arenitos.
			Guará	Arenito fino a conglomeráticos.
	Triássico	Rosário do Sul	Caturrita	Arenito, conglomerado, siltito areno-argiloso e folhelho.
			Santa Maria	Arenitos (fluviais), siltitos argiloso maciço e folhelhos.
			Sanga do Cabral	Corpos tabulares ou lenticulares alongados, brecha e conglomerado intraformacional, siltito e raro argilito.
Paleozóico	Permiano	Passa Dois	Pirambóia	Arenito médio a fino.
			Rio do Rasto	Pelitos, arenitos.
			Serra Alta	Argilito, siltito, folhelho.
			Teresina	Siltito argiloso.
			Irati	Calcário, folhelho
	Guatá	Palermo	Arenito, siltito	

(continua)

			Rio Bonito	Arenito, siltito carbonoso	
	Carbonífero	Itararé	Taciba	Arenito, diamictito, siltito, folhelho, ritmito, conglomerado e ambiente glácio-marinho.	
Proterozóico	Neoproterozóico / Ediacariano	Grupo Cerro do Bugio	Formação Acampamento Velho	Vulcanismo bimodal constituído por derrames de riolitos alcalinos a peralcalinos.	
			Fáceis Básica	Derrames andesíticos, traquitos, basaltos mugearíticos e depósitos piroclásticos básicos	
			Fáceis Particulada	Depósito de fluxos piroclásticos, brechas, tufo, tufo lapilíticos e ignimbritos	
		Grupo Bom Jardim	Formação Hilário – Fáceis Coerente	Domos de lamprófiros espessartíficos e <i>necks</i> de monzonitos e quartzo-monzonitos	
		Grupo Maricá	Formação Arroio América	Arenitos e lentes conglomeráticas	
			Formação São Rafael	Arenitos e tempestitos	
		Província Mantiqueira	Complexo Anelar Leões Quartzo-Monzonito	Augita, augita subcálcica e sienito	
			Complexo Anelar Leões Quartzo-Sienito	Quartzo-sienito com aegirina-augita	
			Suíte Subvulcânica Vauthier	Dacito e riocacitos porfirítico	
			Granito Dom Pedrito	Pertitagrano, sienogranito e sienito	
			Granito Saibro	Sieno a monzogranito	
			Monzogranito Santo Antônio	Monzo a granodiorito	
			Suíte Granítica Campinas - Granito Campinas	<i>Stock</i> de composição monzogranítica	
		Criogeniano		Complexo Granito-Gnaissico Bagé	Ortognaisse e granitoides monzo a granodioríticos foliados
		Arqueano	Não-arqueano		Complexo Granulítico Santa Maria-Chico

(conclusão)

Fonte: Adaptado de CPRM (2006), por MORAES (2019).

As rochas mais antigas ocorrem na Sub-bacias do rio Negro e Ibicuí, associadas ao Escudo Sul-Rio-Grandense como os gnaisses e metapelitos do complexo Granulítico Santa Maria Chico que datam do Arqueano. Em associação ocorrem as rochas do Complexo Metamórfico Porongos que se configura numa sequência pelito-carbonática com vulcânicas

associadas. Ocorrem também rochas antigas (Neoproterozóico) pertencentes a Província Mantiqueira como granitos, monzonitos etc.

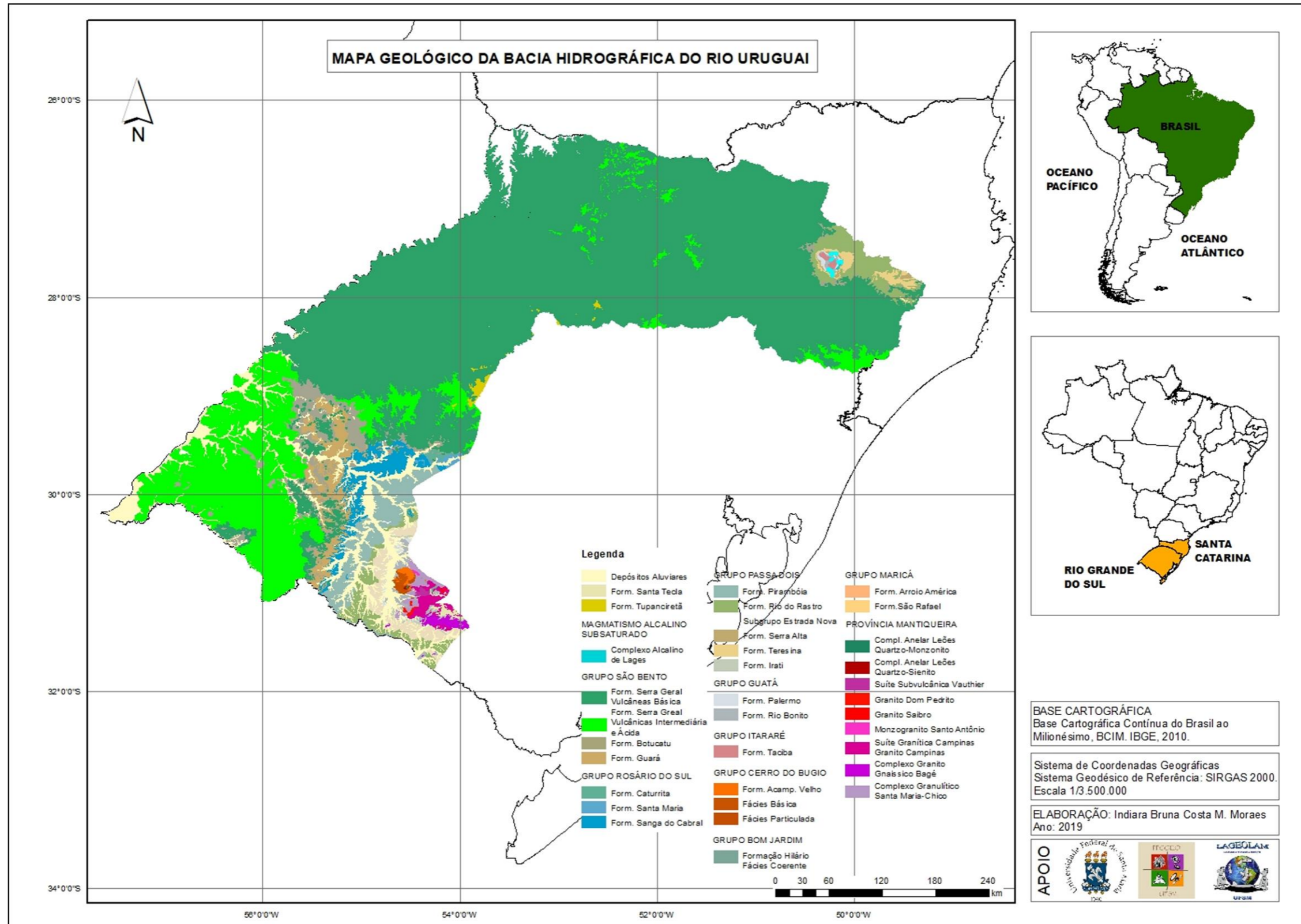
Ainda na porção do Escudo ocorrem os arenitos e lamitos do Grupo Maricá, os depósitos vulcanogênicos da Formação Hilário (Grupo Bom Jardim) e a Formação Acampamento Velho, do Grupo Cerro do Bugio, que correspondem a riolitos e andesitos antigos. A Formação Rosário do Sul, constituída por arenitos vermelhos de granulação média a muito fina, ocorre de modo bastante expressivo nas Sub-bacias do Rio Santa Maria, do Rio Ibicuí da Armada, do Rio Ibicuí Mirim, do Rio Jaguarí e do Rio Ibicuí, no Estado do Rio Grande do Sul.

A Formação Botucatu ocorre de modo expressivo e contínuo nos afluentes do curso médio do rio Ibicuí, e na forma de corpos isolados, como o domo estrutural do Cerro do Jarau, em Quaraí no Rio Grande do Sul.

Nas Bacias do Médio Uruguai e Alto predominam as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral sendo que, no Alto Uruguai há uma maior variabilidade de rochas que ocorre no estado de Santa Catarina na região do Domo de Lages. Nesta região ocorre uma grande variedade de rochas sedimentares como quartzo-arenitos, siltitos, calcários, folhelhos e diamictitos, pertencentes aos Grupos São Bento, Passa Dois, Guatá e Itararé. Além destes, ocorrem sienitos e carbonatitos do Grupo Caiuá. No Rio Grande do Sul, sobre a Formação Serra Geral ocorrem os arenitos friáveis da Formação Tupanciretã, ao sul da bacia do Alto Uruguai e a leste, na porção intermediária do Médio Uruguai.

No Quaternário estão incluídos os depósitos aluvionares que se mostram com envergadura mais significativa no Rio Grande do Sul, sobretudo ao longo dos rios Ibicuí e Santa Maria, onde surgem diversos terraços essencialmente arenosos com intercalações de cascalho, silte e argila, definindo extensas planícies de inundação. O terço médio do curso dos rios Cacequi, Jaguarí, Butuí, Ibirapuitã e Quaraí apresenta depósitos aluvionares de menor envergadura. Nos rios que se desenvolvem em Santa Catarina, assim como ao longo da calha do rio Pelotas-Uruguai, em razão da grande energia de relevo, os depósitos aluvionares, predominantemente de cascalho e areia grossa, ocorrem no leito dos cursos de água e zonas marginais muito limitadas. Na Figura 6 é apresentado o mapa geológico da bacia.

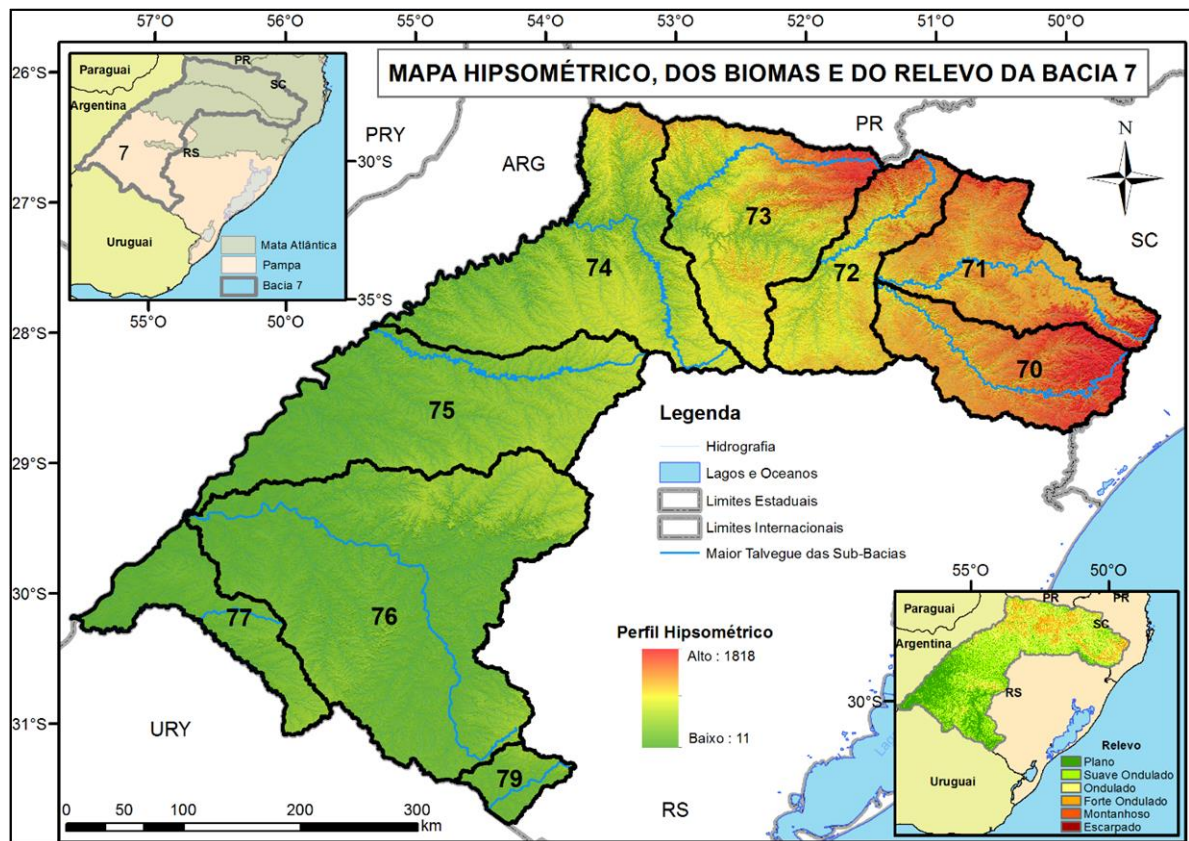
Figura 6 - Mapa Geológico da Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai.



Fonte: Adaptado de CRPM (2006), por MORAES, 2019.

A Figura 7 apresenta a altimetria da Bacia onde as porções mais elevadas encontram-se no Alto Uruguai associadas a presença de inúmeros derrames de rochas vulcânicas. Já as menores altitudes estão no Médio Uruguai, na bacia do Ibicuí e do rio Negro, onde a espessura das rochas vulcânicas é menor e há uma grande ocorrência de rochas sedimentares.

Figura 7 - Altimetria da Bacia do Uruguai.



Fonte: MELATI et al., 2015.

Segundo a FGV (1998), a compartimentação geomorfológica da Região Hidrográfica do Uruguai está diretamente relacionada à distribuição das unidades litoestratigráficas e a evolução geotectônica que condicionam a distribuição da drenagem superficial. Em termos de distribuição espacial na Região Hidrográfica, o planalto Riograndense e o planalto Catarinense constituem as províncias geomorfológicas mais expressivas, condicionados pela presença de rochas vulcânicas básicas e ácidas, cuja energia de relevo é moderada e tabuliforme. Nas regiões de rochas vulcânicas básicas, o relevo tabuliforme cede lugar a formas mais arredondadas.

De acordo com RADAMBRASIL (1986, 2005) e Ross (2003), as bacias do Alto e Médio Uruguai estão inseridas dentro do domínio das Bacias e Coberturas Sedimentares, correspondente, em termos geológicos, à Província Paraná que configura uma entidade morfoestrutural responsável, em grande parte, pelos arranjos de relevo ocorrentes na Região Sul do Brasil. Esta entidade corresponde a um vastíssimo planalto monoclinal, inclinado para o oeste em consequência do mergulho das rochas da Província Paraná que, em sua parte oriental, apresentam tal sentido. Esse fato faz as cotas altimétricas variarem de 1.200 m, na parte leste, até aproximadamente 150 m nas porções mais ocidentais (FRAG-RIO, 2011).

Aos patamares se associam as maiores espessuras de solo argiloso e, às escarpas, os solos rasos e afloramentos rochosos. Os padrões de drenagem superficial exibem formas retangulares angulosas devido ao controle estrutural exercido pelas lineações tectônicas. A densidade de drenagem é relativamente elevada, ocorrendo frequentemente afloramentos de águas subterrâneas. Na tabela abaixo é apresentada a compartimentação geomorfológica da Região Hidrográfica do Uruguai, onde são observadas as províncias geomorfológicas principais (MMA, 2006).

Tabela 1 - Províncias Geomorfológicas – Distribuição Espacial.

Província Geomorfológica	Área	
	1000 ha	%
Planalto do RS – Planalto de SC	10.974,2	63
Planalto de Lages	337,9	2
Planalto de Uruguaiana	3.964,4	23
Depressão Central Gaúcha	1.921,2	11
Planaltos Residuais de Canguçu-Caçapava	339,2	2

Fonte: Adaptado de MMA (2006), por MORAES, 2019.

A denominação comum do planalto dada à superfície encerra algumas diferenças nas feições geomorfológicas existentes, sendo encontradas tanto áreas profundamente dissecadas quanto fracamente dissecadas, bem como extensas áreas planas. A presença de litologias de resistências diferentes provocou, neste subdomínio, duas linhas de escarpas que, em alguns trechos, constituem cuevas.

Planalto Catarinense são áreas que ocupam a porção Centro Leste de Santa Catarina. Este Planalto assenta-se sobre as litologias da formação Botucatu e Rio do Rasto, com forte controle estrutural. Pontualmente, ocorre a presença de importante elemento geomorfológico:



o chamado Domo de Lages, que se constitui de uma intrusão geológica, exibindo padrão de drenagem radial centrífugo, decorrente das intrusões de rochas alcalinas. O relevo predominante é suave ondulado (coxilhas), podendo caracterizar a presença de morros testemunhos de arenitos da Formação Botucatu. A densidade de drenagem é maior onde predominam folhelhos, argilitos e siltitos, o que caracteriza um maior escoamento superficial e menor taxa de infiltração. Nas zonas onde predominam os arenitos, a densidade de drenagem é baixa, ocorrendo elevada taxa de infiltração e pequeno escoamento superficial. São frequentes os trechos de drenagem controlados por fraturas de origem tectônica, assim como a incidência de olhos d'água e banhados.

Situado na região que engloba a cidade catarinense de mesmo nome, o Planalto de Lages tem como características acentuadas o intenso controle estrutural de sua rede hidrográfica e de sua litologia. Estas condicionantes atuam para realizar um trabalho de dissecação diferencial com formas de relevo alongadas de topos convexos e íngremes. Dentre essas formas, convém salientar as que se encontram às margens do rio Canoas, que apresentam-se de maneira delgada, com vales em “v” e aparecimentos de pequenos terraços fluviais.

Localizada no entorno da cidade de Uruguaiana, o Planalto de Uruguaiana tem como característica uma suavidade topográfica, variando de plana a subhorizontalizada, com suave caimento em direção ao rio Uruguai, a oeste. É comum a ocorrência de relevo de aplainamento retocado desnudado, nas áreas entre vales e uma ampla superfície de aplainamento que desce suavemente aos extensos terraços fluviais do Rio Uruguai. A área apresenta ainda uma dissecação homogênea representada em forma de colinas com vales pouco profundos. Devido a sua extensão e peculiaridades locais, esta unidade foi dividida em três setores geomorfológicos: Área Degradacional Oriental, Pediplano do Médio Uruguai e Área Transicional Setentrional (FRAG-RIO, 2011).

O maior segmento, com 32.134 km<sup>2</sup>, localizado na porção central do Rio Grande do Sul, encontra-se inserido entre as seguintes unidades de relevo, ao norte, com os Patamares da Bacia do Paraná e com o Planalto das Araucárias; a oeste, com o Planalto da Campanha Gaúcha; e, ao sul, contornando em forma de arco, com o Planalto Sul-Rio-Grandense. Este segmento, conhecido como Depressão Central Gaúcha, constitui uma área sem grandes variações altimétricas, sendo que as maiores cotas se situam ao redor de 200 m, onde dominam as extensas e alongadas formas de topos convexos ou planos, cujas encostas caem suavemente em direção aos vales, com profundidade média em torno dos 40 m. Essas formas de relevo são conhecidas, regionalmente, como coxilhas.

Esses modelados estão relacionados ao trabalho erosivo dos rios Jacuí e Vacacaí, correndo no sentido oeste-leste, que corresponde à Depressão Transversal (proposta por Valverde, 1957) e dos rios Santa Maria, Ibicuí da Armada e Negro no sentido sul para norte e pelo Rio Ibicuí-Mirim de leste para oeste, os quais comandam uma rede de drenagem de padrões dendríticos e subdendríticos. Ao lado dessas formas de relevo ocorrem vastas superfícies planas, rampeadas, recobertas por colúvio e com dissecação incipiente, localizadas geralmente a norte da unidade, entre o sopé da escarpa da Serra Geral e as coxilhas que contatam com as faixas aluvionares do Rio Jacuí.

Nas áreas de relevo de topo plano, como no trecho compreendido entre Cachoeira do Sul e Santa Maria, o nivelamento dos topos mostra truncamento das rochas, cujo fato pode estar relacionado à presença de rochas mais resistentes, que funcionariam como camada mantenedora ou seriam remanescentes de um pediplano. Ocorrem, ainda, áreas onde o relevo se apresenta mais dissecado, configurando colinas de topo convexo e encostas íngremes, com ocorrência de linhas de pedra, localizadas, principalmente, a leste do Rio Santa Maria e entre o vale do Rio Jacuí e borda do Planalto Sul-Rio-Grandense. O encontro entre a Depressão Periférica e o Planalto da Campanha Gaúcha, a sudeste, e das Araucárias, a norte, é brusco e escarpado, encontrando na superfície da depressão e em toda a faixa de contato inúmeros residuais de topo tabular e, junto ao sopé desses residuais encontram-se formas de colinas bastante amplas (HERRMANN et al.1990).

Os Planaltos Residuais de Canguçu-Caçapava, distribuídos nas Sub-bacias dos rios Ibicuí e Negro, estão inseridos na denominada Região Geomorfológica planalto Sul-Rio-Grandense (IBGE, 1986) que corresponde à área de ocorrência do Escudo Sul-Rio-Grandense, onde a complexidade da estrutura geológica se revela na paisagem através de um relevo intensamente dissecado em formas de topo convexo e vales profundos, que apresentam uma certa orientação SE-NW e SW-NE (MMA, 2006).

Os Planaltos Residuais abrangem superfícies elevadas muito aplainadas, praticamente não gastas pelos processos erosivos. Estes formam superfícies muito antigas com bordas muito conservadas e lisas. Estão distribuídas nas cotas superiores a 400 m. De forma geral, estas unidades geomorfológicas compreendem modelos de dissecação fluvial homogênea, sendo definidas pela combinação densidade (pode variar de muito grosseira a muito fina) e aprofundamento das drenagens (que pode variar de muito fraco a muito forte). A área de estudo apresenta drenagens com densidade entre grosseira e média, e aprofundamento muito fraco, com média predisposição à erosão.

Em relação aos domínios hidrogeológicos, na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai ocorrem 2 tipos de aquíferos, que podem ser agrupados em domínios, províncias ou sistemas hidrogeológicos; i) os granulares porosos e ii) os faturados. Os aquíferos granulares porosos, são os que compreendem sedimentos não consolidados (depósitos aluviais de rios de grande porte, por exemplo) constituídos basicamente por areia e argila; rochas sedimentares porosas e permeáveis (Ex: arenitos) depositadas nas Bacias sedimentares brasileiras, como a Bacia do Paraná. Já os aquíferos fraturados, são constituídos por rochas cristalinas e vulcânicas (Ex.: Formação Serra Geral).

Existem diferenças de nomenclatura para estes aquíferos conforme diferentes autores, tendo em vista os critérios adotados para individualização de cada unidade como por exemplo: hidrogeológica – geomorfologia, cronoestratografia (idade das rochas), características dos aquíferos, etc. A Tabela 2 resume os diferentes domínios hidrogeológicos conforme diferentes autores.

Tabela 2 - Domínios hidrogeológico.

<b>Domínio Hidrogeológico (FGV, 1998)</b>	<b>Província Hidrogeológica (Hausman, 1995)</b>	<b>Sistema Hidrogeológico (CPRM, 2004)</b>	<b>Unidades Geológicas</b>
Depósitos Aluvionares		Aquíferos Porosos Cenozóicos Aluvionares (APCA)	Aluviões
Rochas Vulcânicas de Planalto e de Escarpa	Província Basáltica Subprovíncia Planalto	Aquífero Fissurais Serra Geral (AFSG)	Formação Serra Geral
Rochas Vulcânicas da Fronteira Sudoeste do RS	Província Basáltica Subprovíncia Cuesta		
Arenitos da Formação Botucatu	Província Sedimentar Gondwânica Subprovíncia Botucatu Oeste	Aquíferos Porosos Eo-Cretáceos (APEC)	Formação Botucatu
Rochas Sedimentares Pré-formação Botucatu	Província Sedimentar Gondwânica Subprovíncia Rosário	Aquíferos Porosos Triássicos (APTR)	Formação Rosário do Sul
	Província Sedimentar Gondwânica Subprovíncia Permo carbonífero	Aquitardos Permianos (AQTP)	Grupo Passa Dois (Fms. Irati, Estrada Nova, Rio do Rasto)
		Aquíferos Porosos Permianos (APP)	Grupo Guatá (Fms. Rio Bonito e Palermo) Formação Itararé

De acordo com Freitas et al. (2004), as unidades hidroestratigráficas podem ser descritas como:

- Aquíferos Porosos Cenozóicos Aluvionares (APCA) - aquíferos intergranulares relacionados aos espessos depósitos aluvionares recentes;
- Aquífero Fissura Serra Geral (AFSG) - aquíferos descontínuos relacionados às lavas básicas e ácidas da Formação Serra Geral;
- Aquíferos Porosos Eo-Cretáceos - aquíferos contínuos intergranulares relacionados às formações areníticas Guará e Botucatu;
- Aquíferos Porosos Triássicos - aquíferos contínuos intergranulares relacionados às formações arenosas Pirambóia, Sanga do Cabral e Santa Maria;
- Aquitardos Permianos – aquitardos relacionados aos sedimentos finos (argilitos e siltitos) das formações Palermo, Irati, Estrada Nova e Rio do Rasto;
- Aquíferos Porosos Permianos – aquíferos contínuos intergranulares relacionados às formações areníticas Rio Bonito e Grupo Itararé.

Na Bacia do Uruguai ocorrem os seguintes sistemas de aquíferos (Figura 8):

-Aquíferos Embasamento Cristalino III - localizado nas porções mais elevadas do Escudo. Composto de rochas graníticas maciças, gnaisses riolitos e andesitos. A ausência de fraturas interconectadas e a condição topográfica desfavorável inviabilizam a perfuração de poços tubulares, mesmo para baixas vazões.

-Aquicludes Eo-paleozóicos - áreas do centro ao leste do embasamento cristalino. São arenitos finos a médios muito endurecidos pelo cimento ferruginoso, calcítico ou silicoso o que proporciona uma porosidade muito baixa. Apesar da predominância de arenitos, sua cimentação praticamente impermeabiliza a rocha, dando poços secos ou de vazão insignificante.

-Aquíferos Palermo - Rio Bonito: circula as regiões altas do embasamento cristalino. Composto por arenitos finos intercalados com camadas de siltitos argilosos. As capacidades específicas são em média inferiores a 0,5 m<sup>3</sup>/h/m.

-Aquíferos Sanga do Cabral - Pirambóia: camadas siltico-arenosas com matriz argilosa e arenitos finos a muito finos com cimento calcífero. As capacidades específicas são variáveis de 0,5 a 1,5 m<sup>3</sup>/h/m.

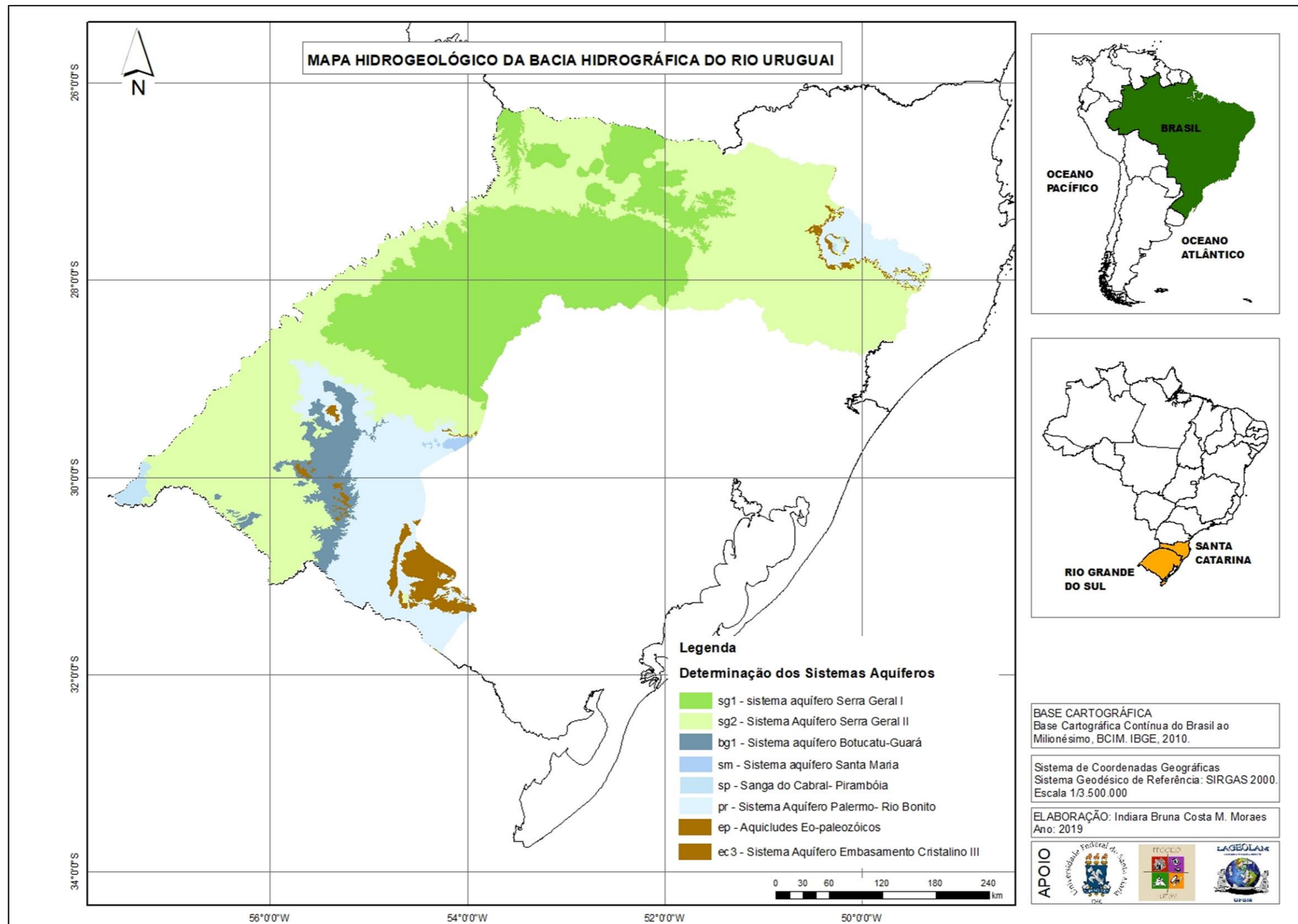
-Aquíferos Santa Maria - arenitos grossos a conglomeráticos na base, lamitos avermelhados, siltitos e arenitos médios a finos no topo. As capacidades variam de 0,5 a 1,0 m<sup>3</sup>/h/m nas áreas de afloramento chegando a 4,0 m<sup>3</sup>/h/m nas áreas confinadas.

-Aquíferos Botucatu-Guará - a porção confinada pelas rochas basálticas ocorre entre os municípios de Santana do Livramento, Alegrete, Uruguaiana, Itaqui e São Borja. As litologias são compostas por arenitos médios a finos apresentando intercalações pelíticas e cimento argiloso na unidade Guará. Na área aflorante, as capacidades específicas variam de 1 a 3 m<sup>3</sup>/h/m e nas confinadas ultrapassam 4 m<sup>3</sup>/h/m.

-Aquíferos Serra Geral II - predominam riolitos, riolacitos e em menor proporção basaltos fraturados a capacidade em ser encontrados valores superiores a 2,0 m<sup>3</sup>/h/m.

-Aquíferos Serra Geral I - rochas basálticas, amigdaloides e fraturadas capeadas por espessos solos avermelhados. As capacidades específicas variam de 1 a 4 m<sup>3</sup>/h/m podendo alcançar valores maiores de 4 m<sup>3</sup>/h/m em alguns poços.

Figura 8 - Mapa Hidrogeológico da Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai.



Segundo relatório do FRAG-RIO (2011), a região da bacia possui 12 classes de solos. Estas classes de solos têm variada resistência a impactos ambientais, em função de sua profundidade, textura, gradiente textural, drenagem, lençol freático, lençol suspenso, risco de inundação, suscetibilidade à erosão, relevo, declividade, aptidão agrícola e tipo de argilomineral (GIASSOM et al., 2005).

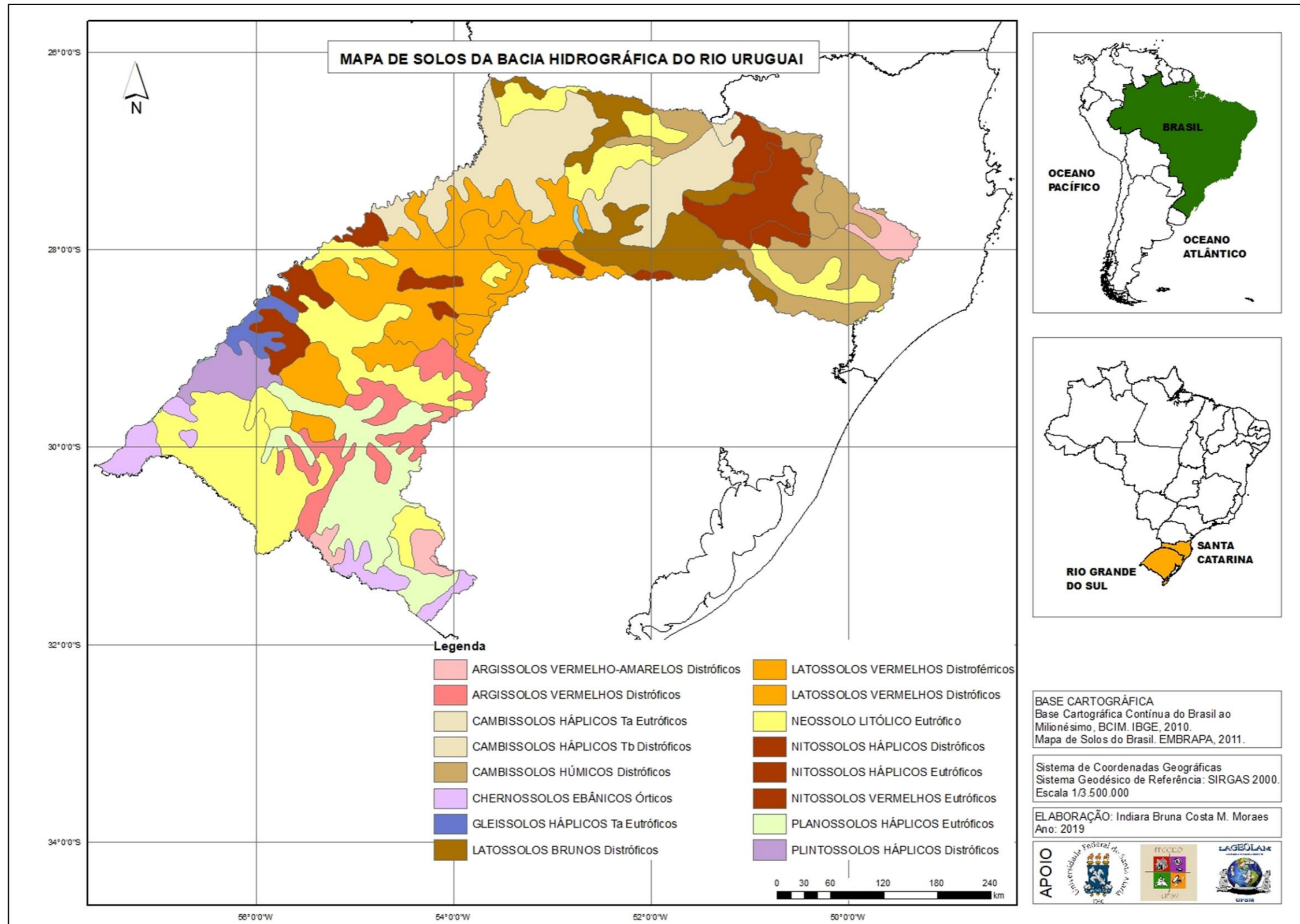
No Quadro 3 estão os tipos de solos encontrados na BHRU e na Figura 9, o mapa de solos para a área.

Quadro 3 – Classes de 3º nível de solos na BHRU.

<b>Símbolos</b>	<b>Classes de 3º Nível</b>
CHd	CAMBISSOLOS HÚMICOS Distróficos
CXbd	CAMBISSOLOS HÁPLICOS Tb Distróficos
CXve	CAMBISSOLOS HÁPLICOS Ta Eutróficos
FXd	PLINTOSSOLOS HÁPLICOS Distróficos
GXve	GLEISSOLOS HÁPLICOS Ta Eutróficos
LBd	LATOSSOLOS BRUNOS Distróficos
LVdf	LATOSSOLOS VERMELHOS Distroférricos
LVd	LATOSSOLOS VERMELHOS Distróficos
MEo	CHERNOSSOLOS EBÂNICOS Órticos
NVe	NITOSSOLOS VERMELHOS Eutróficos
NXd	NITOSSOLOS HÁPLICOS Distróficos
NXe	NITOSSOLOS HÁPLICOS Eutróficos
PVAd	ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS Distróficos
PVd	ARGISSOLOS VERMELHOS Distróficos
RLe	NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico
SXe	PLANOSSOLOS HÁPLICOS Eutróficos

Fonte: Adaptado de SANTOS et al. (2011), por MORAES, 2019.

Figura 9 - Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai.



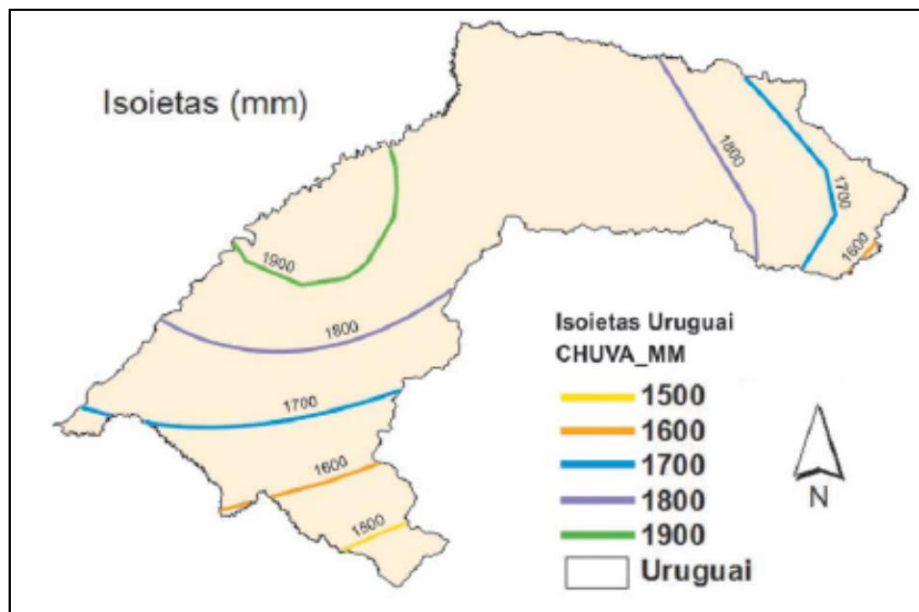


## 2.6 CARACTERIZAÇÃO DAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS

Pretende-se apresentar as potencialidades e as limitações da oferta hídrica da Bacia Hidrográfica, tanto para as águas superficiais quanto subterrâneas, considerando aspectos quantitativos e qualitativos. Com base nos dados existentes, foram identificados: i) o regime e; ii) o potencial hídrico superficial, de forma a permitir o balanço entre as disponibilidades e as demandas de água (MMA, 2006a).

As características da Bacia Hidrográfica do Uruguai que se referem à susceptibilidade a inundações e estiagens foram descritas, a partir dos relatos históricos e das propriedades físicas da Bacia. A Região Hidrográfica do Uruguai apresenta um regime de precipitações marcado por uma regular distribuição de chuvas ao longo do ano, com totais mensais superiores a 60mm, sem ocorrência de grandes extremos: máximos ou mínimos. A região ao norte é a mais chuvosa, sendo que Santo Augusto, Ijuí, Erechim e São Borja, no Rio Grande do Sul, e Herval do Oeste, São Miguel do Oeste e Xanxerê, em Santa Catarina, são as que apresentam os maiores totais anuais (1998, apud MMA, 2006a). A Figura 10 mostra a distribuição espacial da precipitação pluviométrica na região.

Figura 10 - Distribuição espacial da precipitação da Região Hidrográfica do Uruguai – Isoietas.



Fonte: MMA, 2006a.

O regime de chuvas de uma região é muito influenciado pelos deslocamentos das massas de ar e pelo relevo regional. Assim, a formação de chuvas na Região Hidrográfica do Uruguai apresenta comportamentos característicos para os períodos de inverno e verão, bem como para as regiões de relevo mais elevado e acidentado ou mais plano e baixo (MMA, 2006a).

Com relação as estações do ano, quanto às estações do ano, a FGV (1998) indica que a origem das chuvas de inverno é diferente das que ocorrem no verão:

- i. As chuvas de inverno são decorrentes da aproximação de um anticiclone (zona de alta pressão), que desloca as áreas de depressão, estas originando chuvas. Durante o inverno, devido à intensificação de circulação secundária do ar, as penetrações das massas de alta pressão são mais violentas, frequentes e duradouras, gerando chuvas mais prolongadas e com maior ocorrência. Os anticiclones mais frequentes, que correspondem a tempo mais seco e que sucedem às chuvas, na região, são as Massas Polar Atlântica e Pacífica.
- ii. Durante o verão, os anticiclones decrescem em valor e frequência, passando a atuar, então, novos fatores na formação das chuvas, dentre os quais se destacam os ventos alíseos, que soprando do Atlântico, transportam ar úmido que vai formar as chuvas de verão, com trovoadas, grande intensidade e baixa duração.

Quanto à influência do relevo, o diagnóstico apresenta que a orografia é um fator importante na formação de chuvas (MMA, 2006a):

- i. Cidades como Iraí, Soledade, Campos Novos, Xanxerê e Chapecó, essencialmente, em razão do efeito orográfico, apresentam precipitações mais elevadas do que outras localidades próximas.
- ii. Nas áreas mais planas as chuvas são menores, tendo-se registros de estiagens periódicas na região da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul. Estas estiagens são devidas à baixa umidade dos ventos que sopram nesta área.

Apesar destas variações no comportamento temporal e regional da precipitação, a análise do regime de chuvas não permite caracterizar um período de estiagem característico, já que os valores médios mensais de precipitação são muito próximos entre si. O que pode ser constatado é um proeminente déficit de umidade nos meses de verão, já que os valores de evaporação superam os de precipitação. O Quadro 4 apresenta valores médios de precipitação anual para as Sub-bacias (nível 2) da Região Hidrográfica (MMA, 2006a).

Segundo a FGV (1998), a evapotranspiração é intensamente influenciada pela temperatura média mensal, tendo uma correlação clara entre os valores apresentados por essas duas variáveis climáticas. A relação entre os valores médios de precipitação e os de

evapotranspiração, serve para caracterizar a deficiência de umidade que ocorre na Campanha Gaúcha, que apresenta, para os meses de dezembro e janeiro, diferenças superiores a 50mm/mês, sendo janeiro o mês mais crítico.

Alguns postos catarinenses também apresentam evaporação superior à precipitação (Fraiburgo, Lages, Urubici e Videira), sendo o mês de dezembro pouco chuvoso, observando-se em janeiro superávit de umidade. Os meses de inverno apresentam diferenças expressivas de precipitação em relação à baixa evapotranspiração, sendo naturalmente o período de excesso hídrico. O Quadro 4 apresenta valores de evaporação média anual nas Bacias onde a informação estava disponível.

Quadro 4 - Precipitação e Evaporação na Região Hidrográfica do Uruguai.

Região	Sub-bacias Nível 1	Precipitação Média Anual (mm)	Evaporação Média Anual (mm)	Sub-bacias Nível 2	Precipitação Média Anual (mm)	Evaporação Média Anual (mm)
Uruguai	Alto Uruguai	1.752,8	1.017,3	Pelotas	1.524,6	1.117,0
				Canoas	1.669,9	912,0
				Uruguai Nac.	1.841,2	1.022,5
	Médio Uruguai	1.618,6	1.088,5	Uruguai 1	1.892,0	1095,0
				Ijuí	1.783,3	1.062,0
				Uruguai 2	1.503,7	1.129,0
				Quaraí	1.317,1	1.041,0
	Ibicuí	1.540,0	1.545,0	Santa Maria	1.444,0	1.481,0
				Uruguai 3	1.588,0	1.577,0
	Negro	1.367,4	1.501,5	Negro	1.367,4	1.501,5

Fonte: MMA, 2006a.

Segundo a FGV (1998), o “Levantamento e Avaliação de Recursos Naturais, Socioeconômicos e Institucionais do Rio Grande do Sul” (INCRA, 1973), apresentam a relação entre a precipitação, a evapotranspiração, o deflúvio e a retirada ou a adição de água no lençol freático. Esta relação, mostra para toda a Bacia, que, nos meses de outubro a março, a precipitação média é insuficiente para compensar a evapotranspiração potencial e o escoamento dos cursos de água, sendo necessária a retirada de água do lençol; de abril a setembro, ocorre a adição de água ao lençol freático. O mesmo estudo apresenta um balanço hídrico para os solos da região, e indica que, para os solos rasos, predominantes na Campanha Gaúcha, a deficiência de umidade já ocorre, em geral, no mês de outubro, prosseguindo até o mês de março. Para os

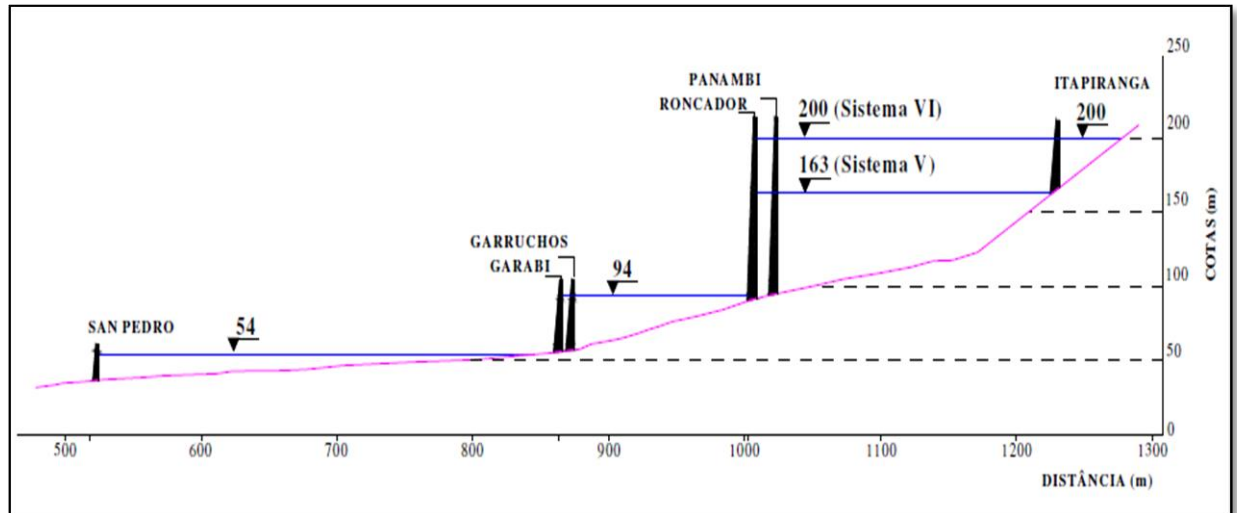
solos profundos esta deficiência é mais evidente de janeiro a março, indicando a necessidade de irrigação para todas as culturas de verão (1998, apud MMA 2006a).

## 2.7 POTENCIAL HIDRELÉTRICO

O uso mais expressivo dos recursos hídricos na região é a geração de energia por hidrelétricas. O trecho alto da bacia apresenta-se com uma vocação para geração de energia hidroelétrica. O potencial hidráulico da bacia é alto e os empreendimentos ali instalados têm bom desempenho, devido à possibilidade de aproveitar os vales encaixados dos cursos de água característicos da região.

Conforme Relatório do Projeto FRAG-RIO (2011) o Rio Uruguai, em seu curso Binacional Brasil/Argentina possui dois inventários para os estudos de aproveitamentos do seu potencial hidrelétrico que foram realizados pelas empresas estatais Eletrobrás (Centrais Elétricas Brasileiras S.A) do Brasil e AyE (Água y Energía Eléctrica Sociedad del Estado) /EBISA (Emprendimientos Binacionales S.A.) da Argentina (Eletrobras/Ebisa 2010). O primeiro inventário da década de 70 para o trecho de rio entre a barragem de Itapiranga e a Barra do Quaraí foram selecionadas as alternativas de barramento do Roncador, Garabi e San Pedro (Figura 11). O aproveitamento de Roncador atingiria o NA máximo na Cota 164 e o barramento de São Pedro na Cota 52, no limite dos dois países e próximo de Barra do Quaraí/Brasil em uma região relativamente plana, atingindo população e obras de infraestrutura e inundando os Saltos Moconá/Yucumã.

Figura 11 - Uma das Alternativas de melhor divisão de quedas do Rio Uruguai no trecho compartilhado entre Brasil e Argentina do Inventário da Década de 70. Mapa Hidrogeológico da Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai.



Fonte: Adaptado de ELETROBRAS/AyE (HIDROSERVECE-HIDRENED, 1974 apud ELETROBRAS/EBISA, 2010).

O segundo Inventário Hidrelétrico do Rio Uruguai, no trecho compartilhado entre Argentina e Brasil, foi concluído em 2010 pelas estatais Eletrobrás do Brasil e EBISA (Emprendimientos Binacionales S.A.) da Argentina (Eletrobras/Ebisa 2010). A área deste estudo envolve o trecho médio da bacia do rio Uruguai, desde a foz do rio Pepirí-Guaçu até a foz do rio Quaraí, que limita o Brasil com o Uruguai. Neste inventário foi reavaliado o potencial hidrelétrico identificado na década de 70 onde se concluiu que o trecho compartilhado entre o Brasil e a Argentina possui um potencial de 2.200 MW, realizável com um conjunto de dois aproveitamentos em cascata: Garabí com reservatório com NA máximo na cota 89,0 m e Panambí na cota 130,0 m.

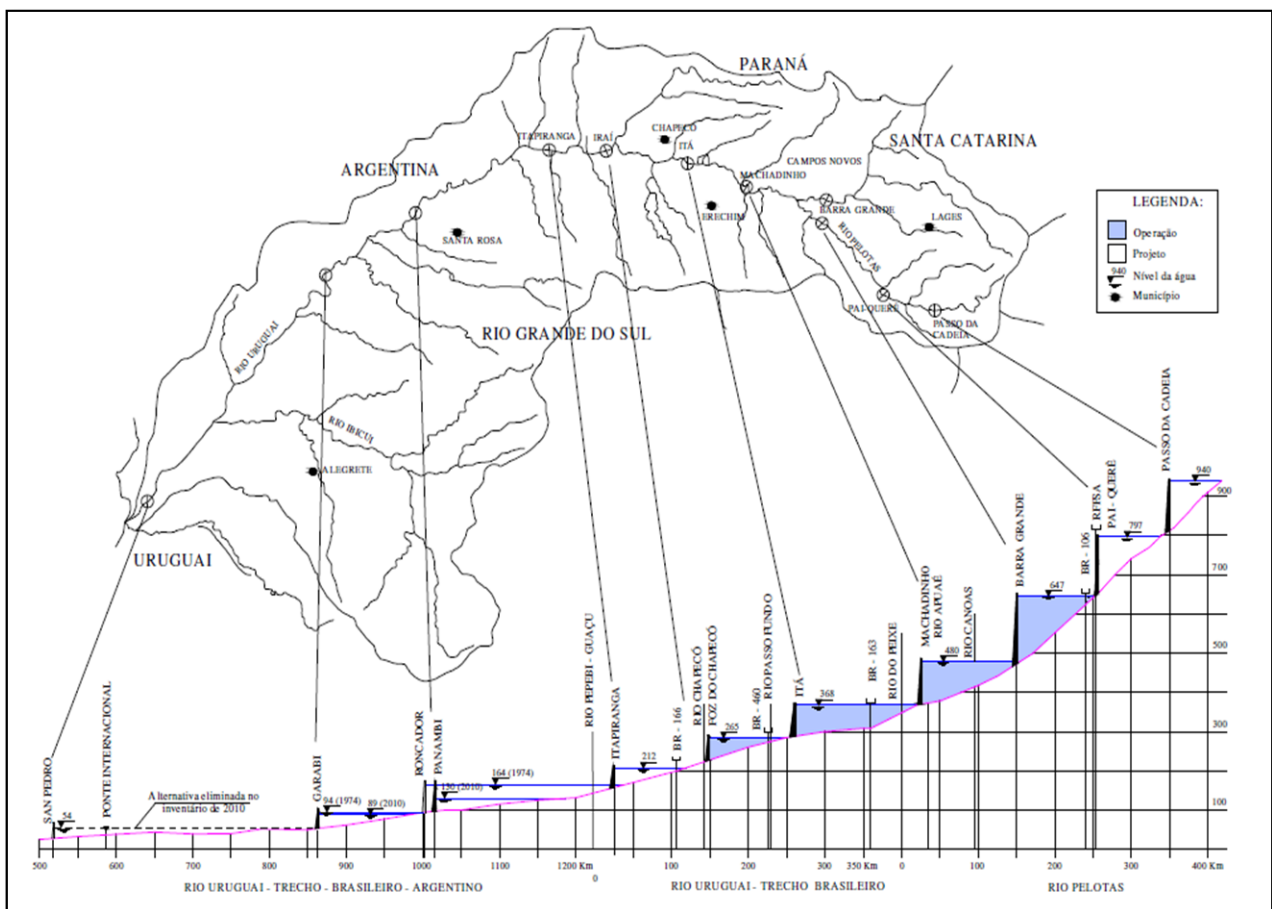
Ainda conforme o relatório FRAG-RIO, em 2010 foi realizado um segundo inventário eliminando, por questões econômicas e socioambientais, o aproveitamento hidrelétrico de San Pedro e adotado como premissa de projeto para as próximas fases (projeto de viabilidade, básico e executivo) a conservação dos Saltos Moconá/Yucumã, isto, com a inclusão do projeto da Hidrelétrica de Panambi com o nível máximo do reservatório na cota 130,0.

Na fase final dos estudos de inventário de 2010 foram selecionados seis aproveitamentos, incluindo Garabi (89,0m), Roncador (130,0), Roncador (120,5 m), Panambi (130,0 m), Panambi (120,5 m) e Porto Mauá (130,0 m). Destas alternativas, foram consideradas

como melhores os aproveitamentos de Panambi e Garabi, respectivamente, com NA máximo nas cotas 130,0 m e 89,0m.

Para facilitar o entendimento das diversas alternativas de melhor divisão de quedas envolvidas nos estudos para o aproveitamento do potencial hidroelétrico do Rio Uruguai o Projeto FRAG-RIO elaborou a Figura 12 que apresenta um perfil longitudinal do Rio Uruguai, com algumas das diversas alternativas de projetos de barragens.

Figura 12 - Alternativas de melhor divisão de quedas do Alto e Médio Rio Uruguai, com a inclusão dos resultados do Inventário 2010.



Fonte: Adaptado de Imaizumi e Sardinha/ELETROSUL (1983) e ELETROBRAS-EBISA (2010).

Tabela 3 - Relação Hidrelétricas x Sub-bacias.

<b>Sub-bacias</b>	<b>Hidrelétricas</b>
Alto Uruguai (SC – RS)	UHE Itá
Rio Pelotas	UHE Foz do Chapecó
Rio Canoas	UHE Barra Grande
Uruguai Nacional	UHE Campos Novos
Rio Ijuí	UHE Passo Fundo
	UHE Machadinho
	UHE Passo São João
	UHE São José

Fonte: Adaptado de FRAG-RIO (2011), por MORAES, 2019.

A Sub-Bacia Uruguai 2 representa um conjunto de Bacias contíguas de afluentes do rio Uruguai, que ocupam uma área de 16.465 km<sup>2</sup>, configurando a maior unidade da Sub-bacia Médio Uruguai. São três os rios principais: Piratinim, Icamaquã e Butuí. Caracteriza-se como uma região de transição entre o planalto e a Campanha. Assim é possível encontrar um rio com potencial de geração de energia, como o Icamaquã. Esta transição no potencial do uso do solo e da água vai acompanhando a mudança no relevo da Bacia. Merece destaque a região do Banhado São Donato, na porção sudoeste da Bacia. Há ainda que se considerar a possibilidade da implantação de duas UHEs no rio Uruguai que alterariam as condições locais, as usinas de Garabi e Panambi.





### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico foi separado em duas temáticas fundamentais para o desenvolvimento desta tese:

- i) Conceitos sobre forma da terra, gravimetria, formas de obtenção de dados gravimétricos, apresentados nesta pesquisa;
- ii) Conceitos fundamentais sobre eventos hidrológicos e levantamento dos eventos de estiagem na bacia do Uruguai no período entre os anos de 2003 a 2015.

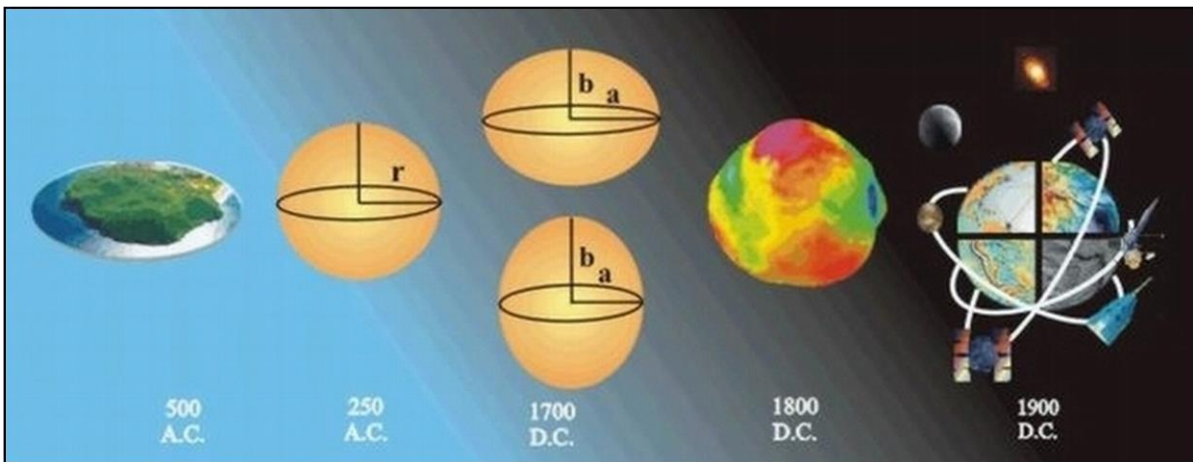
#### 3.1 A GRAVIDADE

No início do século XIX cientistas de renome, como Clairaut (1713 – 1765), Laplace (1749 – 1827), Gauss (1777 – 1855) e Bessel (1784 – 1846) lançaram as bases da nova teoria que atribui à Terra uma forma mais irregular e complexa do que aquela adotada pelo modelo elipsoidal. Inicialmente, surgiu a noção de superfícies equipotenciais e nos trabalhos de Clairaut e Laplace, depois surgiu a superfície equipotencial de nível zero (origem das altitudes) denominada superfície geoidal, proposta por Listing (1872). Os fundamentos teóricos para a apresentação do geóide foram desenvolvidos por STOKES (1819 – 1903) no seu famoso trabalho “On the Variation of Gravity and the Surface of the Earth”, no qual apresenta a fórmula para o cálculo das alturas geoidais a partir de anomalias gravimétricas (SÁ, 2004).

Com o passar do tempo, as triangulações geodésicas se multiplicaram e foram medidos arcos de meridianos e paralelos em várias regiões da Terra, com aumento da precisão.

O objetivo da Geodésia é a determinação da forma e dimensão da Terra. As irregularidades da superfície podem ser negligenciadas reduzindo-se o problema à determinação das dimensões do modelo geométrico considerado mais adequado. A Geodésia do século XIX se concentrou na pesquisa dos parâmetros do “melhor elipsoide” (GEMAEL, 2002). A Figura 13 mostra a evolução da representação da Terra.

Figura 13 - Evolução na representação da Terra.



Fonte: SÁ, 1990.

Para o presente estudo, são importantes os seguintes conceitos: quantidade de matéria e força centrípeta. Quantidade de matéria é a medida de matéria que vem da densidade e do volume conjuntamente já a força centrípeta é a força pela qual os corpos são atraídos por todas as suas partes, são impulsionados, ou, de qualquer modo, tendem a um ponto como se fosse ao centro (CHERMAN, 2010).

A Lei da Gravitação Universal, ou Lei de Newton, da qual se pode deduzir as Leis de Kepler, é um marco na evolução dos conhecimentos humanos. Ambas formam a base da Mecânica Clássica, que proporcionou o conhecimento do movimento dos corpos celestes.

$$F = \frac{GM_1M_2}{r^2} \quad (1)$$

Onde:

$G$  = Constante gravitacional ( $G = 6672 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$ )

$M_1M_2$  = Massas de duas partículas;

$r^2$  = Distância que separa as massas;

$F$  = Resultante das forças que agem sobre o corpo.

A Lei de Newton, entretanto é teórica, porque quando se aplica às partículas, observa-se que o mecanismo dessa ação à distância é desconhecido.

Considere-se uma Terra esférica de raio  $R$ , homogênea de massa  $M$  e sem rotação. Pode-se demonstrar que a massa da esfera atua como se estivesse totalmente concentrada no centro da esfera

$$F = G \frac{Mm}{R^2} = mg \quad (2)$$

A força  $F$  está relacionada com a massa  $m$  através da aceleração e o termo  $g = GM/R^2$  é conhecido por aceleração da gravidade, ou simplesmente gravidade.

O campo gravitacional pode ser definido com mais utilidade se for feito em termos de potencial gravimétrico  $U$

Enquanto que o  $g$  é um vetor, o potencial  $U$  é só um escalar ( $g = \partial U / \partial n$ ), consequentemente a aproximação do potencial fornece flexibilidade computacional.

$$U = G \frac{M}{r} \quad (3)$$

As superfícies equipotenciais são definidas como aquelas em que o  $U$  é constante.

A gravidade de um ponto resulta da composição de outros dois: a força da atração exercida pela massa da Terra sobre a massa unitária, colocada nesse ponto, e a força centrífuga desenvolvida sobre a mesma em consequência da rotação terrestre (GEMAEL, 1999).

$$\bar{g} = \bar{F} + \bar{C} \quad (4)$$

Onde:

$\bar{g}$  = Gravidade

$\bar{F}$  = Força de atração exercida pela massa da Terra sobre a massa unitária;

$\bar{C}$  = Força Centrífuga desenvolvida sobre a mesma em consequência da rotação terrestre.

De acordo com Yirdaw (2010), a força da gravidade é fraca em comparação com outras forças na natureza, como forças elétricas e magnéticas, mas a gravidade é a mais abrangente e significativa. A gravidade controla de fenômenos das marés até a expansão do universo. Portanto, a medida precisa da gravidade é de suma importância para aplicações geodésicas e de vários aspectos importantes para a mudança global.

Xavier (2009) constata que a informação gravimétrica é de primordial importância em diversas áreas: na Geodésia (estudo do geoide e da forma da Terra), na Geologia (investigação de estruturas geológicas) e na Geofísica (prospecção mineral).

Segundo Telford et al. (1990), a prospecção gravimétrica evoluiu a partir do estudo do campo gravitacional da Terra, um assunto de interesse aos geodestas para determinar a forma da Terra. Como a Terra não é uma esfera homogênea perfeita, a aceleração gravitacional não é constante sobre a superfície da Terra.

A magnitude da gravidade depende de cinco fatores: latitude, elevação, orografia do terreno circundante, marés da terra e variações de densidade na superfície.

A gravimetria proporciona o valor médio de  $g = 9,80 \text{ m/s}^2$ . As variações de gravidade, provocadas por variações de densidade, são da ordem de  $100 \mu\text{m/s}^2$  ( $1 \mu\text{m/s}^2 = 1 \text{ gu}$ , “gravity unit”). Nos levantamentos terrestres conseguem-se precisões de mais ou menos 0,1 gu e no mar 10 gu. No Quadro 5, pode-se verificar a equivalências entre as unidades gravimétricas.

Quadro 5 - Equivalência entre unidades.

Nome	Símbolo	Equivalência
Gal	Gal	$10^{-2} \text{ms}^{-2}$
Miligal	mGal	$10^{-5} \text{ms}^{-2}$
Microgal	$\mu\text{Gal}$	$10^{-8} \text{ms}^{-2}$

Fonte: FERREIRA, 2007.

Frequentemente o local onde carecemos do conhecimento da gravidade é distinto de onde pode-se mensurar. A obtenção do valor da gravidade nos pontos de interesse (diferentes dos locais onde foram realizadas as observações) e feita com base em reduções gravimétricas.

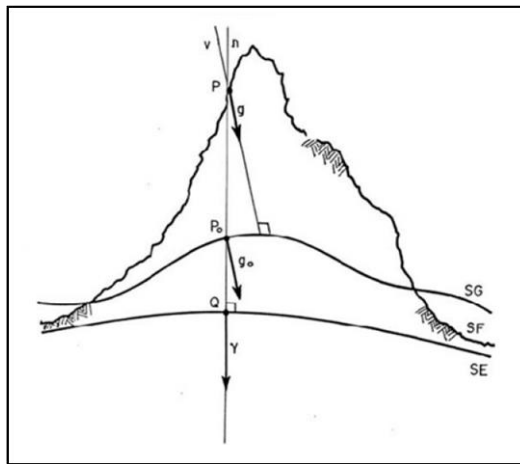
A partir das irregularidades do campo de gravidade medido na superfície identificam-se e caracterizam-se as massas locais de maior ou menor densidade. Essas irregularidades, denominadas anomalias, são interpretadas como resultado das variações laterais na densidade dos materiais da subsuperfície, provocadas por estruturas geológicas ou corpos rochosos (Telford et al., 1990). Os gravímetros só conseguem medir a componente vertical da atração gravitacional devida a uma massa anômala.

- Anomalia da gravidade ( $\Delta g_p$ ) é a diferença entre a gravidade medida na superfície física (S.F.) e reduzida ao geóide ( $g_{p'}$ ) e a gravidade normal sobre o

elipsoide ( $\gamma_{p''}$ ). E relaciona o afastamento entre a superfície geoidal (S.G.) e a superfície elipsoidal (S.E.), como ilustrada na Figura 14, onde a normal de um ponto (n) é a linha de força do campo de gravidade produzida pelo elipsóide e a vertical de um ponto (v) é a linha de força do campo de gravidade da Terra que passa pelo ponto.

$$\Delta g_p = g_{p'} + \gamma_{p''} \quad (5)$$

Figura 14 - Determinação da anomalia da gravidade.



Fonte: Adaptado de HEISKANEN e MORITZ (1967), por MORAES, 2019.

Segundo George Gabriel Stokes (1819-1903), matemático e físico irlandês, a gravidade finalmente pôde ser ligada matematicamente à altura do geóide. Em sua obra intitulada “*On the variation of Gravity at the Surface of the Earth*”, ele formula em 1849 a integral conhecida com o seu nome, que define a forma do geóide, separação geóide-elipsoide, em função das anomalias de gravidade sobre a esfera (ALMEIDA FILHO, 2009). Em sua obra, são tratados dois tópicos:

1. Conhecendo-se a forma de uma superfície equipotencial  $S$ , limitante de um sistema de massas atrativas, dotado de movimento de rotação e do valor da gravidade em um ponto da superfície, determinar o campo externo independentemente de qualquer proposição sobre a distribuição de massas no interior da superfície, e;
2. Inversamente, conhecendo-se o valor da gravidade em todos os pontos de uma superfície equipotencial, determinar a forma dessa superfície.

Interessa nessa pesquisa o segundo problema: o geóide é uma superfície equipotencial e a ele podem ser reduzidos os valores de  $g$  observados na superfície física da Terra. Refere-se a esse geóide a uma superfície conhecida, ou seja, determinar a ondulação geoidal (separação geóide-elipsoide). Esta ondulação pode ser determinada utilizando-se das Fórmulas de Stokes, cujos argumentos são as anomalias da gravidade.

Stokes, em sua dedução original, admitiu a inexistência de massas externas à superfície equipotencial, o que não ocorre com a Terra, pois as massas topográficas são externas ao geóide, ou seja, o geóide não é uma superfície limitante do sistema de massas. Também admitiu uma aproximação esférica, negligenciando quantidades da ordem de  $0,003N$ , sendo  $N < 100$  m, significa negligenciar valores não superiores a 30 cm.

$$N = \frac{R}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \Delta g' S(\Psi) \cos \varphi' d\varphi' d\lambda' \quad (6)$$

Sendo:

$(\varphi', \lambda')$  = as coordenadas do elemento de área;

$\Delta g'$  = anomalia da gravidade no elemento de superfície;

$\Psi$  = distância angular sobre S;

$N$  = ondulação geoidal no ponto.

A supressão de massas topográficas externas ao geóide e das correspondentes de massas de compensação isostática, legitimada a aplicação da integral de STOKES, mas acarreta um novo problema: produz uma Terra fictícia, com a conseqüente alteração do potencial gravífico. Logo, representa a separação entre o elipsoide de referência e um “geóide fictício”, superfície equipotencial limitante da Terra modificada, denominado *co-geóide*.

Stokes desenvolveu a fórmula para o cálculo da ondulação do geóide, reconhecendo que era um trabalho puramente teórico, pois na época (meados do século XIX) a determinação da anomalia da gravidade em todo o globo não podia ser encarada como tarefa exequível. Somente no primeiro quarto do século XX, com o desenvolvimento dos gravímetros (dispositivo tripêndulo de VENING-MEINESZ), possibilitando medidas relativas de gravidade com grande rapidez, foi possível a determinação da gravidade nos oceanos.

A isostasia postula a existência de um estado de equilíbrio na litosfera sob o efeito das ações decorrentes da gravidade. Aos excessos (montanhas) e às deficiências (oceanos) de massa em reação ao geóide, correspondem massas internas de compensação. Tal equilíbrio isostático

pode estar plenamente atingido em certas regiões, por isso ditas compensadas; em outras pode achar-se em fase de processamento (regiões subcompensadas); ou ter sido ultrapassado (regiões supercompensadas), donde um processamento em sentido inverso (GEMAEL, 2002). Uma anomalia isostática quase nula indicaria equilíbrio isostático; as anomalias fortemente negativas corresponderiam regiões supercompensadas e às positivas, regiões subcompensadas.

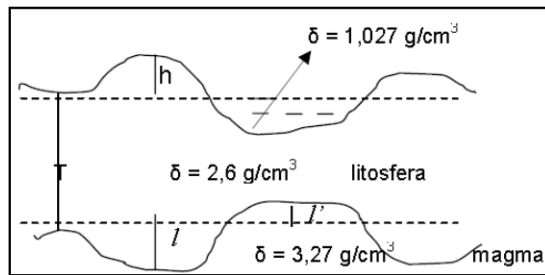
Não há uma prova real que a isostasia exista. Mas por serem as anomalias de Bouguer sistematicamente negativas, nos continentes, e positivas nas regiões oceânicas, sugere a existência de irregularidades internas da densidade, positiva no primeiro caso e negativa no segundo, assim como postula a isostasia. Aceitando o equilíbrio isostático entre as massas topográficas e as de compensação, facilita a compreensão da isostasia, legitimando a aplicação da fórmula de STOKES com a simples transferência das massas topográficas para o interior do geóide.

Acredita-se que a Índia foi o berço da isostasia. A diferença entre as latitudes geodésicas dos vértices Kaliana, no sopé do Himalaia, e Kalianpur, distanciado do primeiro cerca de 6700 km, superava em 5" a correspondente diferença entre as latitudes astronômicas, discrepância inadmissível face ao grau de precisão admitido para a triangulação indiana.

São três os principais sistemas utilizados para a correção isostática:

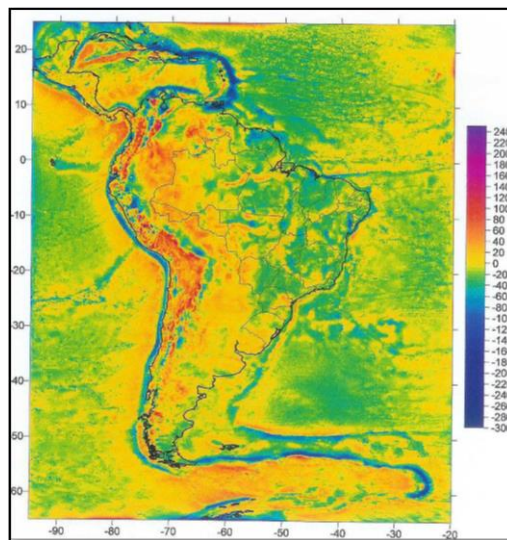
- Sistema AIRY-HEISKANEN – O sistema proposto por AIRY em 1855, com as modificações introduzidas por HEISKANEN preconiza um equilíbrio isostático baseado na igualdade das massas topográficas e de compensação que seria atingida de maneira diferente daquela de PRATT. A densidade da litosfera varia e a profundidade de compensação é constante em PRATT. Porém, no sistema de AIRY a densidade é constante e varia a profundidade de compensação. Além disso, o magma, “flutua” na litosfera, seria de densidade constante. Entende-se que quanto mais saliente a irregularidade topográfica, tanto maior a sua “raiz”, ou seja, maior a parte que mergulha no magma como ocorre em corpos flutuantes em equilíbrio hidrostático. Sob os oceanos é a “*antirraiz*” que ocupa lugar de material mais leve compensando as deficiências oceânicas. Pode-se observar Figura 15 apresenta a anomalia isostática para a América do Sul e a Figura 16 que representa o sistema citado acima.

Figura 15 - Sistema AIRY-HEISKANEN.



Fonte: ARANA, 2009.

Figura 16 - Anomalia isostática para a América do Sul – modelo de AIRY-HEISKANEN.



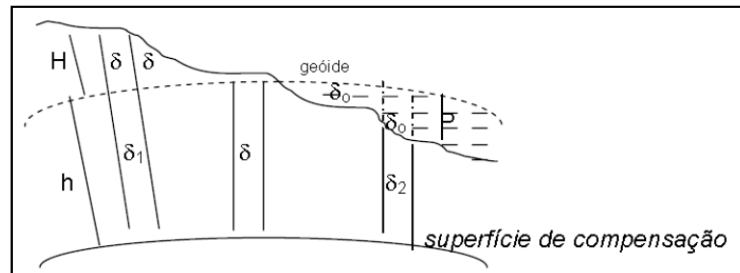
Fonte: SÁ, 2004.

- Sistema PRATT-HAYFORD – Postula a igualdade entre as massas topográficas e as massas de compensação que se estendem do geóide até uma determinada profundidade denominada “profundidade de compensação”. O equilíbrio isostático é balizado pela variação de densidade do material subjacente ao geóide (sob as montanhas – excessos de massa em relação ao geóide – haveria uma deficiência de densidade e sob o leito dos oceanos – as águas oceânicas representariam uma deficiência de densidade, onde haveria um excesso em



relação ao valor médio atribuído às massas superficiais), como podemos observar na Figura 17.

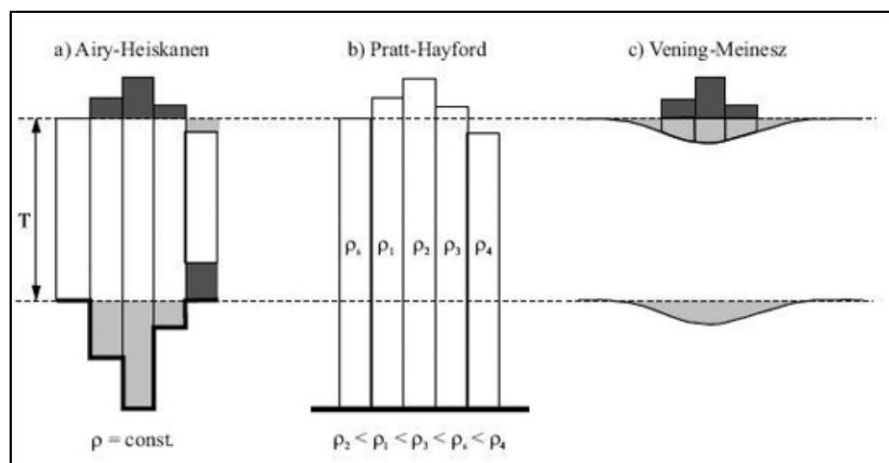
Figura 17 - Sistema isostático de PRATT-HAYFORD.



Fonte: ARANA, 2009.

- Sistema regional de VENING-MEINESZ – Em ambos sistemas citados acima, a compensação é local. Entretanto, o sistema de VERNING-MEINESZ é de compensação regional, pois a ação de uma carga em um determinado ponto influencia uma região ao longo da placa. Admite-se que a crosta é uma placa elástica fina, com uma rigidez finita, capaz de suportar esforços de certa magnitude, deformando-se para cargas de maior magnitude (Figura 18).

Figura 18 - Diagramas apresentando os mecanismos de compensação isostática. As linhas pontilhadas apresentam a crosta de referência com espessura T.



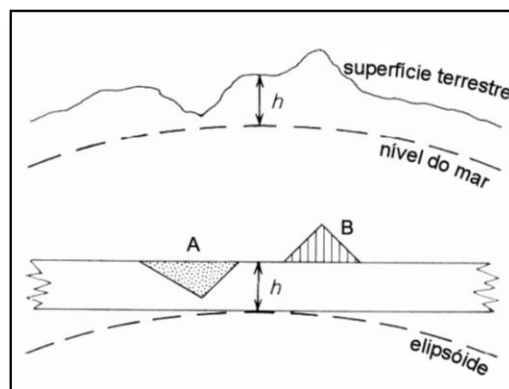
Fonte: CHAPIN (1996) adaptado por DE OLIVEIRA et al. (2008).

O valor da gravidade normal aumenta à medida que nos distanciamos do equador em direção aos polos ao longo dos meridianos. Assim, a aceleração centrífuga devida à rotação terrestre é máxima no equador e nula nos polos, o que se contrapõe à aceleração gravitacional, porque o achatamento polar torna a terra mais próxima do centro de massas. Por conseguinte, valores obtidos em latitudes diferentes não podem ser comparados, sem que sejam corrigidos, o que é a correção da latitude.

Segundo Xavier (2009), para “reduzir ao nível médio do mar” a gravidade observada na superfície física da Terra, introduz-se a chamada “correção ar-livre” (*free-air correction*). Essa correção é empregada para compensar apenas os efeitos da diferença de altitude das estações em relação ao geóide (altitude ortométrica,  $h$ ) ou a um nível de referência arbitrário. A massa de material que existir entre as estações e o geóide não é considerada.

Já a anomalia de Bouguer parte do princípio de que a topografia em redor do ponto de observação é plana. Isto, no entanto, raramente é verdade e por isso é preciso proceder mais uma correção. Esta correção é sempre positiva (Figura 19) porque a parte A da figura é levada em consideração quando na verdade é inexistente, logo é necessário repô-la. Quanto à parte B, ela é excluída da correção, mas exerce uma atração para cima (no ponto de observação) e provoca uma diminuição da gravidade.

Figura 19 - Correção Topográfica da anomalia de Bouguer.



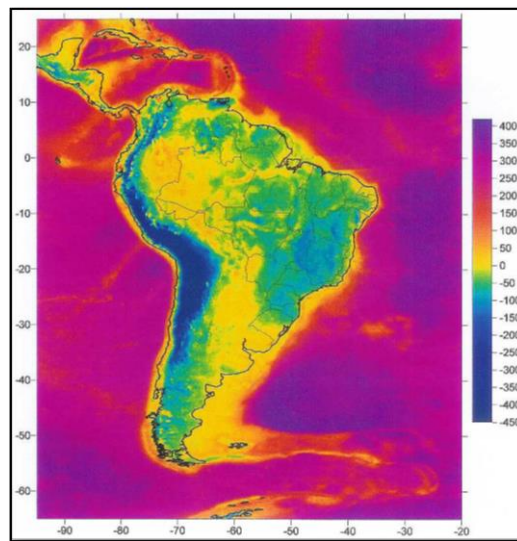
Fonte: Adaptado de XAVIER (2009), por MORAES, 2019.

A anomalia ar-livre e a gravidade teórica desconsideram as massas que possam existir entre a superfície física da Terra e o nível do mar (geóide). A correção simples de Bouguer remove este efeito e torna homogênea todas as massas sobre o nível do mar (camada de rochas

abaixo do ponto de observação), ampliando um planalto de espessura igual à altura do ponto de observação. A remoção dessas massas dá-se, conforme:

- a) *Redução modificada de Bouguer*: onde é considerada as massas da região próxima à estação, zonas literais de Hayford, é formada por uma calota esférica sendo o polo a estação e cujo raio é de 166,7 Km. Na Figura 20, pode-se observar a distribuição da anomalia de Bouguer na América do Sul.

Figura 20 - Anomalia Bouguer da América do Sul.

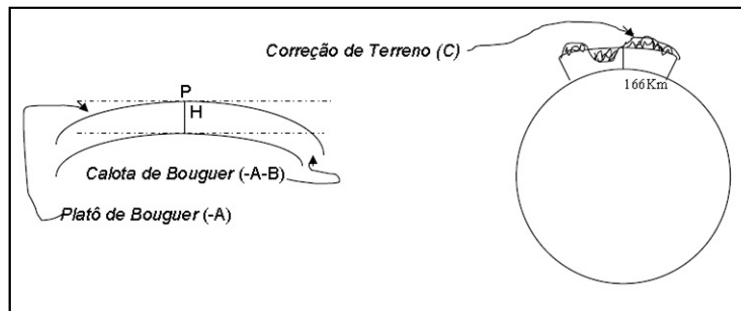


Fonte: SÁ, 2004.

- b) *Redução topo-isostática*: considera as massas topográficas das regiões distantes, que se estende até o ponto antípoda da estação.

A correção topográfica considera as irregularidades da topografia em relação à calota, como podemos observar na Figura 21.

Figura 21 - Platô de Bouguer.



Fonte: ARANA, 2009.

Segundo Arana (2009), a correção do terreno é responsável pela “eliminação” das massas topográficas irregulares em relação à calota. Seu cálculo é executado a partir de cartas altimétricas da região vizinha à estação.

### 3.1.1 Mensuração da Gravidade

Segundo Telford (1976), Gravimetria é a denominação dada à técnica que objetiva a medição da aceleração da gravidade de forma absoluta ou relativa.

Atualmente a determinação do campo da gravidade terrestre pode ser realizada através de três tipos de mensurações: análise das órbitas dos satélites, altimetria por satélite e medida gravimétrica de superfície. A mensuração pela análise das órbitas dos satélites baseia-se na observação das perturbações orbitais provocadas pelo campo gravitacional. A altimetria por satélite permite determinações precisas do campo da gravidade marinha, desde que os erros orbitais e as variações não-geoidais da superfície do mar sejam adequadamente modeladas. A medição gravimétrica de superfície é a mais direta e mais precisa, apesar da maior dificuldade de se obter uma distribuição global uniforme, em comparação com as outras duas soluções

As determinações gravimétricas na superfície da Terra têm encontrado diversas aplicações, tanto na geodésia quanto na geofísica. De acordo com o método de mensuração, os instrumentos utilizados nas determinações gravimétricas de superfície normalmente são divididos em dois grupos: gravímetros absolutos e gravímetros diferenciais ou relativos.

### 3.1.1.1 Gravímetros Absolutos

A medida da gravidade absoluta determina a gravidade  $g$  na mensuração das quantidades fundamentais da aceleração, distância e tempo. São utilizados o pêndulo e o método queda livre, ambos introduzidos por Galileo Galilei (1564 - 1642), Torge (1980), Faller e Marson (1988). As mensurações absolutas da gravidade estão relacionadas diretamente com padrões de comprimento (distância) e de tempo.

O método pendular é considerado um método clássico de obtenção de  $g$ , atualmente está em desuso, mas foi empregado na gravimetria por cerca de 300 anos. Os resultados obtidos a partir deste método ainda pertencem a redes gravimétricas existentes.

Nos últimos anos desenvolveu-se uma avançada tecnologia objetivando a determinação absoluta através da queda livre de um corpo. O método queda livre (*free-fall*) é baseado na equação do movimento de um corpo caindo livremente. Pode-se observar o gravímetro absoluto na Figura 22.

Figura 22 - Gravímetro FG5.



Fonte: <http://www.tigo.cl/es/sistemas-de-medicion/gravimetria.html>

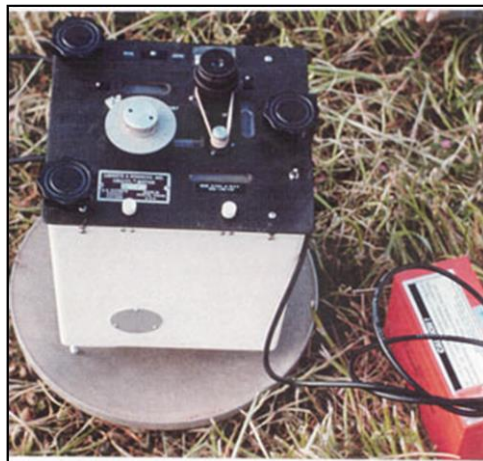
### 3.1.1.2 Gravímetros Relativos

Usualmente no gravímetro, tem-se o peso de uma esfera suspensa por uma mola sendo contrabalançado pela força elástica da mola. A variação da posição de equilíbrio do sistema em função da variação da gravidade permite a avaliação desta última (GEMAEL, 1999).

A mensuração da gravidade "relativa" resulta da diferença de gravidade entre duas estações ou variações de gravidade com o tempo. O tempo ou comprimento é medido, mantendo a outra quantidade fixa. Como consequência, as medidas relativas podem ser realizadas com mais facilidade do que as medidas absolutas (TORGE, 1980).

Os medidores de gravidade relativos (Figura 23) usam uma força antagônica para manter uma massa de teste em equilíbrio com a gravidade. As mudanças de gravidade no espaço ou no tempo são monitoradas por alterações correspondentes da força antagônica, que são transformadas na unidade de gravidade em função de calibração. Uma força de contração elástica é usada quase que exclusivamente, mas as contraforças magnéticas também são empregadas em instrumentos que operam em plataformas móveis e no modo estacionário.

Figura 23 - Gravímetro Lacoste & Romberg D-74.



Fonte: <http://www.geytex.com/graviy.html>

Nos últimos anos, a grande contribuição do conhecimento gravimétrico provém de observações de satélites (XAVIER, 2009 apud KAHN, 1983). Estudos mostram a importância da utilização de dados satelitais, especialmente em locais onde não há dados suficientes ou não existem estações.

Uma das mais importantes realizações da missão GRACE é permitir que os cientistas monitorem continuamente as variações do campo gravitacional da Terra. Medições realizadas com a utilização de equipamentos muito sensíveis, chamados gravímetros, revelam pequenas variações que ocorrem no valor da aceleração da gravidade. As razões para estas variações e de que modo isto atua sobre o planeta podem ser respondidas por meio da medição com alta

precisão da gravidade através de dados satelitais como a missão GRACE. Os resultados de suas medições da variação do campo gravitacional da Terra ajudam a esclarecer inúmeros fenômenos que ocorrem no planeta.

### 3.1.2 Satélites Geodésicos

Desde o início da era espacial, os cientistas perceberam que os satélites artificiais poderiam fornecer uma ferramenta poderosa para pesquisadores interessados no mapeamento do campo de gravitacional e da forma da Terra. Observando a Terra a partir do espaço nos últimos 50 anos resultou em avanços espetaculares em várias áreas das geociências.

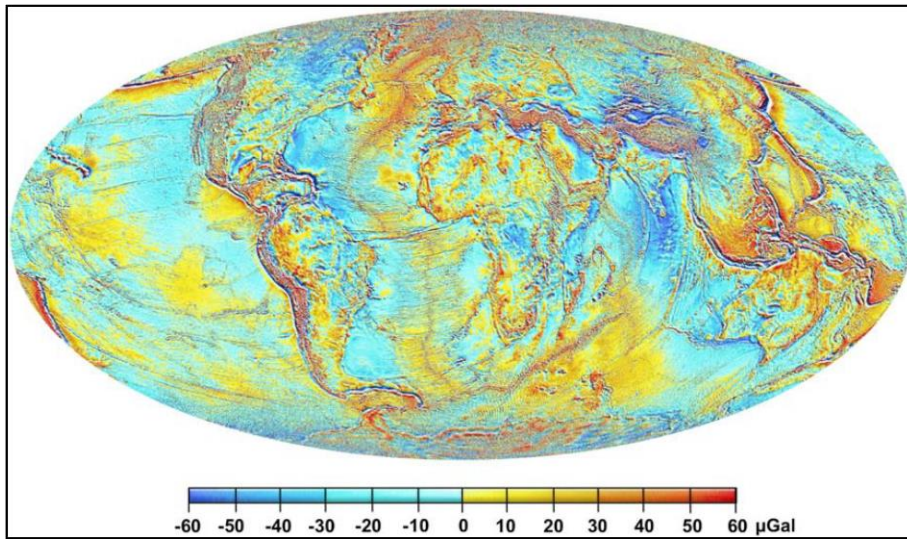
De acordo com Dicati (2017), a primeira ideia de usar satélites geodésicos foi o cientista planetário JA O'Keefe, em 1955, como parte da proposta para Space Foundation “*On the Utility of an Artificial Unmanned Earth Satellite*”. O'Keefe havia proposto um satélite inflado para ser iluminado por projetores ou radar. O rastreamento dessa nave espacial permitiria uma medição precisa das distâncias intercontinentais e do mapeamento do campo gravitacional da Terra.

Um satélite pode, de fato, ser considerado como um alvo móvel em alta altitude e com a técnica de triangulação, ser usado para posicionamento. Como a sua órbita é afetada pelo campo gravitacional terrestre, o satélite também pode servir como sensor para gravitação. Portanto, como o lançamento do *Sputnik 1*, os satélites artificiais da Terra foram usados para definir o tamanho e a forma da Terra e determinar seus parâmetros de gravidade e rotação. Assim, nasceu a Geodésia Celeste, a geodesia baseada no uso de satélites artificiais.

A partir deste ponto, os satélites foram enviados em órbita exclusivamente para aplicações geodésicas que, além de determinar mais precisamente as dimensões da Terra, também permitiu medir a localização dos pontos na superfície terrestre com excelente precisão, atuar como referência para mapeamento e o monitoramento de fenômenos geodinâmicos, como o movimento da crosta, a rotação da Terra e o movimento polar.

A acumulação de décadas de rastreamento de dados de um grande número de satélites geodésicos em diferentes configurações orbitais levou a uma sucessão de soluções de campo de gravidade de maior precisão e resolução. Além disso, a combinação dessas soluções "somente para satélite" com medidas de superfície e anomalias gravitacionais baseadas em altimetria (a partir de medidas de altura do geóide oceânico) proporcionou soluções de campos de gravidade globais de qualidade e resolução cada vez melhores. A Figura 24 mostra mapa do campo gravitacional estático de uma das soluções mais recentes, o *Earth Gravity Model 2008* (EGM08).

Figura 24 - Anomalias gravitacionais em  $\mu\text{Gal}$  do componente estático (médio do campo de gravidade da Terra). Modelo EGM08, de Pavlis et al., 2008.



Fonte: Bureau Gravimetrique International.

Os satélites geodésicos são equipados com vários dispositivos que facilitam sua localização: transmissores de sinais de rádio com frequência estável que são rastreados através do efeito Doppler, fontes de luz que emitem flashes de luz de grande intensidade, refletores de canto ou prismas de quartzo polido que refletem feixes de luz laser enviada da Terra, altímetros dos radares usados para medir a distância entre o satélite e a superfície do solo, e também acelerômetros para medir a gravidade.

Serão apresentadas de forma resumida algumas missões espaciais coordenadas pelas agências *Smithsonian Astrophysical Observatory*, *Goddard Space Flight Center* e de forma mais detalhada, a missão GRACE de onde serão obtidos os dados para os estudos desta tese.

### 3.1.2.1 *Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO)*

Partindo-se das primeiras modelagens pela técnica das perturbações orbitais, surge a fase contemporânea dos modelos do campo gravitacional da Terra, sobretudo no âmbito do projeto Standard Earth do *Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO)* e no *Goddard Space Flight Center (GSFC/NASA)*.

A *Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO)* é uma agência de investigação da Instituição *Smithsonian*, que foi criado pelo Congresso Americano em 1846 para realizar o



legado do inglês James Smithson "para fundar em Washington... um estabelecimento para o aumento e a difusão do conhecimento...". Em 1890, o SAO foi fundado por Samuel Pierpont Langley, o terceiro Secretário da Instituição, principalmente para estudos do Sol. Langley é lembrado hoje como um pioneiro aeronáutico, mas foi treinado como um astrônomo e foi o primeiro cientista americano a perceber a "astrofísica" como um campo distinto. Langley inventou o bolômetro e estudou a radiação infravermelha do Sol. Ele prefigurou as preocupações modernas sobre a mudança climática, buscando ligações entre fenômenos solares e terrestres.

A priori instalado em Washington, D.C., mudou-se para Cambridge, Massachusetts, em 1955. Afiliou-se com o Harvard College Observatory e expandiu sua equipe, instalações e, mais importante, seu escopo científico. Fred Whipple, o primeiro diretor da SAO nesta nova era, aceitou um desafio nacional para criar uma rede mundial de localização por satélite, uma decisão que estabeleceu a SAO como a pioneira e líder de uma pesquisa de ciência. Em 1966, a SAO lançou a primeira de uma série de publicações, organizadas por Charles A. Lundquist e George Veis do Satellite Geodesy Program, sobre modelos geopotenciais completos de até grau e ordem 8, com alguns coeficientes de ordem superior (Lundquist; Veis, 1966). Em 1973, os laços entre o Smithsonian e Harvard foram reforçados e formalizados pela criação do Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA). Como um estabelecimento de confiança independente do governo dos Estados Unidos, a agência hoje realiza pesquisas científicas e acadêmicas, administra coleções nacionais e fornece o serviço público, educação e programas de extensão suportados por concessões do Congresso de dotações, doações de confiança e receitas e contratos privados e presentes.

Por James Smithson ser um cientista, naturalmente imaginou uma instituição para o "aumento", bem como a "difusão" de conhecimento. Embora o testamento de Smithson tenha especificado um foco de investigação particular, antigo presidente John Quincy Adams buscou em 1838 obter fundos de Smithson aplicados à criação de um Observatório Astronômico Nacional, ou o que ele chamou de "um farol dos céus." Outros interesses prevaleceram naquela época, e a instituição acabou se tornando um leque diversificado de museus e laboratórios.

Hoje a SAO faz parte do que é indiscutivelmente a maior e mais diversificada instituição astrofísica do mundo, onde a equipe com mais de 300 cientistas, realiza um amplo programa de pesquisa em astronomia, astrofísica e ciências da terra e do espaço.

Os esforços pioneiros da SAO no desenvolvimento de observatórios em órbita e grandes telescópios terrestres, a aplicação de computadores a problemas astrofísicos e a integração de medidas laboratoriais, astrofísica teórica e observações em todo o espectro eletromagnético

contribuíram muito para revelar os segredos do universo. Mensurando a lenta derivação dos continentes da Terra para traçar a recessão de milhares de quilômetros por segundo de galáxias, os cientistas da SAO continuam dedicados ao aumento do conhecimento sobre os processos físicos que moldam o mundo natural e à difusão deste conhecimento para a comunidade científica, para professores e alunos, e para o público em geral.

### 3.1.2.2 *Goddard Space Flight Center (GSFC/NASA)*

O *Goddard Space Flight Center* da NASA em Greenbelt, Maryland, desempenha um papel fundamental em todos os aspectos das missões da agência, desde o desenvolvimento até a órbita.

Mais de 50 naves espaciais Goddard exploram a Terra e sobem através do sistema solar, coletando observações para serem analisadas e estudadas por cientistas de todo o mundo. As missões de Goddard apoiam múltiplas disciplinas científicas, incluindo ciências da Terra, ciências solares e ambiente Sol-Terra, estudos planetários e astrofísica.

Goddard é o lar operacional do Telescópio Espacial Hubble venerável. Goddard estuda a atmosfera tênue de Marte com MAVEN e a superfície do Planeta Vermelho com instrumentos a bordo do rover Curiosity. Goddard examina a lua com LRO e observa nosso sol com o Solar Dynamics Observatory. GPM, Landsat e uma série de outros satélites monitoram a Terra e nosso clima em mudança.

Explorer 6, lançado em 7 de agosto de 1959, de Cabo Canaveral, na Flórida, foi o primeiro satélite científico sob a direção do projeto *Goddard Space Flight Center* da NASA. O pequeno e esférico Explorer 6 foi projetado para estudar radiação, geomagnetismo e propagação de rádio na atmosfera superior. Além disso, ele testou um dispositivo de varredura projetado para fotografar a cobertura de nuvem da Terra.

Desde então, Goddard tem desempenhado um papel integral em centenas de missões da NASA. Antes da construção do que é agora o Centro Espacial Johnson da NASA em Houston, Goddard gerenciou os primórdios do projeto Mercury. Goddard operou as redes de rastreamento e comunicação para as missões espaciais tripuladas da NASA durante os programas Mercury, Gemini, Apollo e de transporte espacial até hoje. Goddard também gerenciou o Thor-Delta projeto de veículo de lançamento no início dos anos 1960.

As missões gerenciadas por Goddard ou com uma contribuição significativa do centro estão resumidas no Quadro 6.

Quadro 6 - Missões gerenciadas por Goddard.

Nome da Missão	Objetivo
<i>ACE: Advanced Composition Explorer</i>	estuda partículas provenientes do Sol, interestelares e fontes galácticas para contribuir para a nossa compreensão da formação e evolução do sistema solar.
<i>AQUA</i>	projetado para coletar sobre o ciclo da água da Terra, incluindo a evaporação dos oceanos, vapor de água no ar, nuvens, precipitação, umidade do solo, gelo e muito mais.
<i>CALIPSO</i>	fornece uma visão do papel que as nuvens e os aerossóis atmosféricos desempenham na regulação do clima e qualidade do ar da Terra.
<i>CATS</i>	estenderá as medições de perfil de aerossóis atmosféricos e nuvens da Estação Espacial Internacional (ISS). A carga útil CATS melhorará nossa compreensão das propriedades e interações de aerossóis e nuvens, além de melhorar os modelos de mudança climática.
<i>Curiosity (MSL)</i>	foi projetado para avaliar se Marte já teve um ambiente capaz de suportar pequenas formas de vida chamado micróbios. Em outras palavras, sua missão é determinar a "habitabilidade" do planeta
GPM Science Objectives	estabelecerá um novo padrão para as medições de precipitação a partir do espaço, fornecendo observações de chuva e neve em todo o mundo a cada três horas.
GRACE	mapear com precisão as variações no campo de gravidade da Terra.
TERRA	Coletar dados sobre as mudanças climáticas da Terra.

Fonte: <https://www.nasa.gov/content/goddard-missions-present>.

### 3.1.2.3 Modelos GRIM

De acordo com Almeida Filho (2009), no início da década de 70 do século XX, a Alemanha e a França deram início a esforços conjuntos para a obtenção do modelo gravitacional global que ficou conhecido pelas iniciais do *Groupe de Recherches et Institut de Munich* – GRIM (Biancale, 2002). Estes empenhos foram realizados pelo grupo *Astronomische und Physikalische Geodäsie der Technische Universität München*, formado pelos pesquisadores Georges Balmino, Christoph Reigber e Bernard Moynot. Fruto deste trabalho a primeira edição GRIM1 (Balmino et al., 1976a) foi apresentada em 1974 e limitava-se ao grau 10, mais alguns termos zonais de grau 21 e ordens 12 a 15 para o grau 31. Em 1976 o grupo publica a segunda versão chamada GRIM2 (Balmino et al., 1976b), onde foram obtidos os coeficientes zonais das

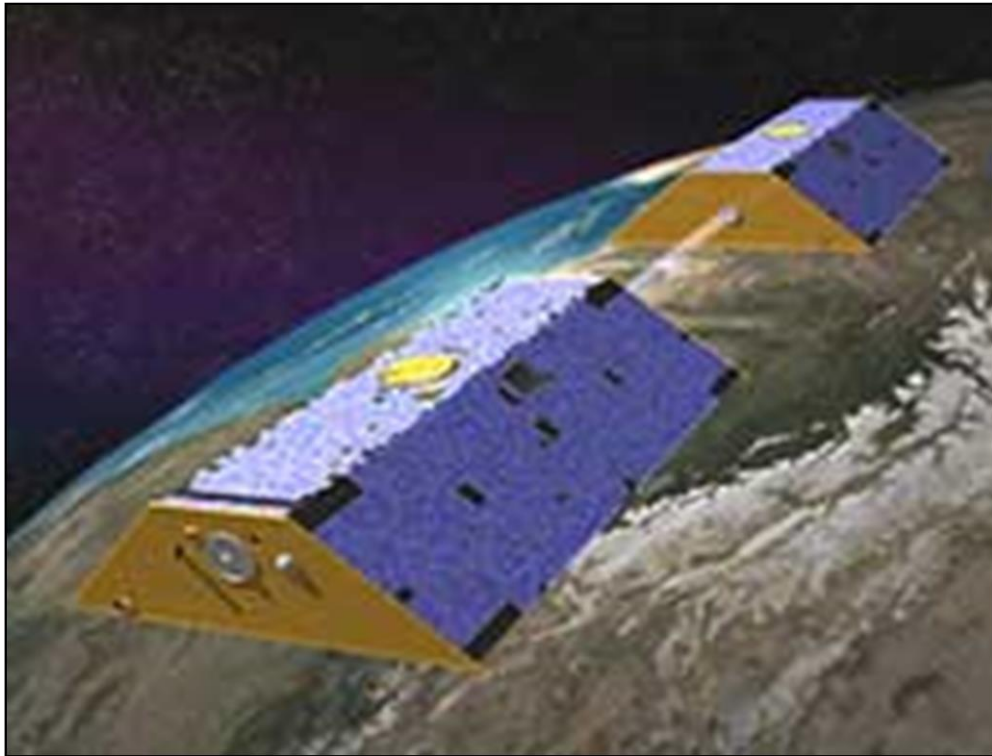
funções harmônicas esféricas de graus 2 a 23, assim como os coeficientes tesserais até o grau 30. A precisão era de aproximadamente 10 metros de altura para o geóide limitado ao grau 20.

### 3.2 MISSÃO GRACE

Em 17 de março de 2002, na base de lançamentos de Plesetsk, Rússia (62,7°N, 40,3°E), foi dado mais um passo na continuidade das missões espaciais modernas com o lançamento dos satélites gêmeos GRACE - *Gravity Recovery & Climate Experiment*. Esta missão é gerenciada conjuntamente pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) nos Estados Unidos e *Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt* (DLR) na Alemanha. A missão GRACE mapeia com precisão as variações no campo gravitacional da Terra. Projetado para uma vida útil de cinco anos, a missão GRACE operou em uma fase estendida, completando 15 anos em 2017 e encerrando sua missão científica em 12 de outubro de 2017.

A missão GRACE consiste em dois satélites idênticos que estão a uma distância de 220 km entre si em uma órbita circular polar (inclinação de 89°) a uma altitude inicial aproximadamente de 500 km da Terra e com período de 62 a 95 minutos, o que permite 15 revoluções por dia em média. Ambos satélites são dotados de distanciômetros para medições contínuas do afastamento intersatelital, como pode-se observar na Figura 25. Como os dados da missão GRACE são utilizados nesta tese, optou-se por tratar exclusivamente desta missão em um item separado e descrito em detalhes a seguir.

Figura 25 - Representação dos satélites da missão GRACE.



Fonte: <https://www.csr.utexas.edu/missions/>

A missão GRACE mapeou o campo gravitacional da Terra realizando mensurações precisas da distância entre os dois satélites, usando GPS e um sistema de micro-ondas, com resolução temporal de 30 dias. As variações gravitacionais no tempo, estimadas a partir das perturbações orbitais dos satélites, permitiam detectar as grandes mudanças na distribuição de massa da Terra e poderiam ser inferidas pela missão GRACE nas soluções com períodos adequados (ALMEIDA FILHO, 2009). Os resultados desta missão forneceram informações sobre a distribuição e fluxo de massa da Terra.

As variações de gravidade estudadas pela missão GRACE incluem: mudanças devido a correntes superficiais e profundas no oceano; escoamento e armazenamento de águas subterrâneas em massas terrestres; mudança de massa oceânica; e variações de massa dentro da Terra. Outro objetivo da missão foi criar um melhor perfil da atmosfera terrestre. Os resultados da GRACE estão contribuindo de forma importante para os objetivos da Direção da Missão de Ciência da NASA, do Sistema de Observação da Terra (EOS) e dos estudos sobre mudanças climáticas globais. As medições de gravidade obtidas através da missão GRACE fornecem um meio para estimar o equivalente à altura d'água (EqW) através do monitoramento direto das

mudanças da massa de água. Observações de gravidade missão GRACE tempo-variável são capazes de monitorar mudanças de massa com uma precisão de aproximadamente 1,5cm de mudança de EqW (WAHR et al., 2004, 2006). Em 2011, a técnica da mensuração gravitacional da missão GRACE foi utilizada para estudar as forças gravitacionais da lua na Terra.

Estudos iniciais aplicaram dados da missão GRACE a uma variedade de problemas incluindo mudança de EqW (WAHR et al., 2004; TAPLEY et al., 2004; STRASSBERG et al., 2009, LONGUEVERGNE et al., 2010), balanço de massa polar (VELICOGNA e WAHR, 2006; CHEN et al., 2006), e mudança de massa oceânica.

Em 15 anos de operações, a missão satelital GRACE revolucionou os estudos de como a água se move e é armazenada na Terra. A missão GRACE mede mudanças na força da gravidade local como mudanças de água ao redor da Terra, devido à mudança das estações, clima e processos climáticos. Entre outras inovações, a missão GRACE nos deu a primeira visão espacial da água sob a superfície da Terra, dando uma visão de onde os aquíferos podem estar diminuindo ou os solos contribuindo para a seca. A missão GRACE permitiu um eficiente modo de medir variações mensais no campo gravitacional terrestre com precisão de aproximadamente 1 cm na altura do geóide e resolução espacial entre 200 e 400 km.

O *Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale* (GRGS) realiza o ajustamento, pelo método dos mínimos quadrados, das observações realizadas pelo sistema GPS a bordo da missão GRACE e das informações dos distanciômetros visando a obtenção dos parâmetros orbitais. Para tanto, os parâmetros perturbadores da órbita são obtidos através das estimativas dos resíduos a partir do modelo básico de força. Os receptores GPS podem receber dados de até 10 satélites e prover dados de navegação e medidas de distância e de variação de distância no modo alta-baixa (*high-low*). As soluções das equações de perturbação orbital permitem a obtenção dos modelos mensais do potencial gravitacional. Estes estão representados através dos coeficientes das funções harmônicas esféricas para o modelo do potencial gravitacional, também conhecidos como coeficientes de STOKES (ALMEIDA FILHO, 2009).

Como adotado anteriormente na missão CHAMP, um acelerômetro é utilizado na separação dos efeitos não-gravitacionais. Os refletores laser (LRR) são utilizados para a determinação precisa das órbitas satelitais, e as câmeras STAR, para o alinhamento dos dois satélites. O instrumento fundamental da missão é o KBR (BALMINO, 2003); cada satélite transmite sinais para o outro em dupla frequências (24 e 32 GHz), permitindo a correção ionosférica. São obtidas, assim, duas medidas de distância entre os satélites, pela diferença de fase entre os sinais emitidos e recebidos por cada um (XAVIER, 2012).

Após o processamento, as soluções mensais da missão GRACE são fornecidas pelos três centros de processamento dos dados *Science Data System* (SDS): CSR (*Center for Space Research*), GFZ (*GeoForschungs Zentrum*) e o JPL (*Jet Propulsion Laboratory*). Periodicamente, novas soluções da missão GRACE são calculadas pelos centros de processamento.

As soluções da missão GRACE são distribuídas pelos websites <http://podaac.jpl.nasa.gov/grace/> e <http://grace.jpl.nasa.gov/>. Outros grupos externos aos três centros de processamento (SDS) também oferecem soluções da missão GRACE, tais como o *Bureau Gravimétrique Internationale* (BGI) do Centro Espacial Francês, a GSFC, o *Institute of Earth Observation and Space Systems de Delft* (DEOS), o GRGS, o *Institute of Theoretical Geodesy* (ITG) da Universidade de Bonn, entre outros. Alguns desses grupos fornecem soluções na resolução de 10 dias (XAVIER, 2012).

Existem meses em que não há dados da missão devido a alguns fatores. No ano de 2002, os equipamentos estavam em ajustes acarretando meses sem dados, além de existirem meses em que a órbita dos satélites possui um padrão de quase repetição ou sobreposição de outra órbita já percorrida e isto causa erros nos coeficientes das funções harmônicas esféricas maiores (ROSENHAIM, 2017). A partir de 2011, com o envelhecimento das baterias, foi preciso fazer o ajuste das mesmas com uma maior frequência. Na tabela abaixo, pode-se observar os meses onde que não tiveram mensurações gravitacionais.

Tabela 4 - Meses sem mensuração de dados da Missão GRACE.

Ano	Meses sem dados
2002	Junho e julho
2003	Junho
2011	Janeiro, junho e novembro
2012	Maio e outubro
2013	Março, agosto e setembro
2014	Fevereiro, julho e dezembro
2015	Maio, junho, outubro e novembro

Fonte: Adaptado de ROSENHAIM (2017), por MORAES, 2019.

As soluções temporais da missão GRACE são geralmente expressas sob a forma de coeficientes harmônicos esféricos do geóide, até um grau máximo (caracteristicamente entre 60 e 100, correspondendo a comprimentos de onda de aproximadamente 400 a 700 km). Estas

soluções são obtidas através de uma "abordagem dinâmica" (SCHMIDT et al., 2008). A redistribuição da massa atmosférica, barotrópica e oceânica e os efeitos das marés são removidos durante processamento de dados da missão GRACE reanalizando modelos de circulação atmosféricas, oceânicas e de marés (BETTADPUR, 2007; FLECHTNER, 2007). Pequenas diferenças nos métodos de processamento de dados e nas estratégias de pós-processamento levam a algumas diferenças nas várias soluções. Desde o início da missão, as diferentes soluções da missão GRACE foram lançadas pelos grupos SDS. Cada lançamento incluiu dados reprocessados desde o início da missão, mostrando qualidade melhorada ao longo do tempo. Os dados do geóide da missão GRACE melhores expressados na mudança de massa superficial (geralmente na EqW), assumindo que a redistribuição em massa ocorre nas finas camadas de superfície em comparação com as dimensões da Terra (SWENSON E WAHR, 2002).

- 1) Avaliar os erros das soluções mensais da missão GRACE é um grande desafio. São reconhecidas duas categorias de erros (SCHMIDT ET AL., 2008; CHAMBERS, 2006): erros introduzidos pelo processamento de dados (erros das medidas da missão GRACE e modelos usados para remover outros sinais geofísicos) e;
- 2) Erros de pós-processamento (por exemplo, suavização espacial das soluções da missão GRACE para remover erros de ruído e vazamento (*leakage*) de alta frequência devido à contaminação do sinal de regiões fora da área estudada).

Dentre os erros na categoria (1), os erros correlacionados devido a efeitos não modificados e a contaminação de outros sinais geofísicos durante o processamento de dados são altamente problemáticos. Devido à amostragem espacial-temporal limitada fornecida pelos satélites da missão GRACE, esses erros são suavizados nos coeficientes harmônicos esféricos estimados, dando origem a listras norte-sul evidentes nos mapas de geóide da missão GRACE. Para reduzir este ruído espacial foram propostos diferentes métodos de suavização (SWENSON e WAHR, 2002; SWENSON et al., 2003; HAN et al., 2005; CHEN et al., 2006; SWENSON e WAHR, 2006). O uso de tais filtros espaciais ou métodos de suavização (erros da categoria 2) afeta significativamente as estimativas da missão GRACE da mudança de massa superficial reduzindo a amplitude do sinal nos graus mais altos e as ordens suprimidas por esses filtros. Outro erro pós-processamento decorre da gama limitada de harmônicos esféricos utilizados na solução. Isso resulta em contaminação das regiões circundantes ("*leakage*"). A configuração orbital da missão GRACE (altitude e distância entre satélites) e a necessidade de filtragem



espacial são as principais limitações à resolução espacial, estimada na ordem de 300-400 km (WAHR et al., 2004; WAHR et al., 2006; CHEN et al., 2006a, b; SCHMIDT et al., 2008).

Além das soluções harmônicas esféricas, uma alternativa de abordagem é usar a taxa de alcance e outros dados para estimar diretamente as mudanças de massa de superfície representadas como massas pontuais ou concentradas - a abordagem “mascons” (CHEN et al., 2010, LEMOINE et al., 2005; LUTHCKE, et al., 2006; KLEES et al., 2008). Em princípio, as soluções mascons melhoram a resolução espacial, mas dependem, em certa medida, de restrições aplicadas e correlações impostas entre mudanças de massa regionais (LUTHCKE et al., 2008a, b).

A modelagem direta é outra abordagem que pode aumentar a resolução espacial efetiva das estimativas da missão GRACE e foi aplicada com êxito em uma série de estudos de mudanças na massa de gelo em escala regional e continental (CHEN et al., 2006a,b, 2008, 2009a,b, 2010; WOUTERS et al., 2008). As redes são baseadas nos coeficientes Release-04 (RL04) (BETTADPUR, 2007) e são pós-processados para reduzir erros correlatos que aparecem como faixas no sentido norte-sul nos dados (SWENSON e WAHR, 2006), usando um algoritmo de correção do efeito de “*stripping*” e suavizados com o filtro gaussiano que foi otimizado para dados oceânicos (CHAMBERS, 2006), ou projetando dados da missão GRACE para a decomposição em funções ortogonais empíricas (EOF) de um modelo oceânico (CHAMBERS e WILLIS, 2010). Até 2017, a quinta versão das soluções da missão GRACE (Release 05 – RL05) havia sido disponibilizadas para a comunidade científica. As principais mudanças entre Release 04 (RL04) e RL05 incluem melhorias conhecimento de alinhamentos entre a câmera estrela, acelerômetro, e sistema de alcance da banda K para dados do Nível 1B, e o campo de gravidade médio atualizado, os efeitos das marés e os modelos de suavização para o processamento de nível 2.

O RL05 é importante para reduzir os ruídos nos coeficientes de gravidade da missão GRACE. As soluções RL05 podem ser demonstradas como séries de variações de massa de água, usualmente em EqW (WAHR et al., 1998). Em 2019, foi lançado a sexta versão das soluções da missão GRACE (Release 06 – RL06), que usam uma grade recém-definida em comparação com a versão RL05. Nesta nova grade, as malhas hexagonais que se estendem ao longo do litoral são divididos em duas grades ao longo do litoral para minimizar o vazamento entre os sinais terrestres e oceânicos. Os dados são representados numa malha de  $\frac{1}{4}^\circ$  de latitude-longitude, mas representando a malha geodésica de área igual a  $1^\circ \times 1^\circ$  na linha equador, que é a resolução original das soluções mascons CSR RL06, entretanto, a resolução de  $\frac{1}{4}^\circ$ , invés de  $\frac{1}{2}^\circ$  da RL05, é para representar adequadamente as linhas costeiras.

A missão GRACE fornece dados quantitativos das variações continentais dos armazenamentos de água terrestre (*Terrestrial Water Storage – TWS*). O monitoramento e a quantificação da extensão e intensidade espacial da seca são limitados por recursos de dados convencionais (observações meteorológicas e hidrológicas *in situ* com escassa amostragem espacial e temporal). Os défices no TWS são particularmente difíceis de estimar a partir desses dados. Índices de seca, de umidade do solo e mudança de vegetação a partir de sensoriamento remoto têm sido usados para monitorar extensão e intensidade de seca (SIMS et al., 2002; WANG e QU, 2007). Os modelos numéricos de clima e superfície terrestre são valiosos na análise e diagnóstico da variabilidade climática, mas são imperfeitos na quantificação de eventos climáticos extremos, incluindo secas e cheias (CHEN et al., 2009).

### 3.2.1 Soluções MASCON

Os blocos de concentração de massa (*Mass Concentration blocks - mascons*) são outra forma de se calcular as variações do campo gravitacional, desenvolvidas em uma grade geodésica com resolução espacial de aproximadamente  $1^\circ$  no equador, com uma área de aproximadamente  $12.400 \text{ km}^2$ , porém são reamostradas para  $0,5^\circ$  para facilitar a análise dos dados (SAVE et al., 2016). Em reação aos harmônicos esféricos, é utilizado como função da base radial, fornecendo resultados semelhantes aos das soluções globais por harmônicos esféricos, não precisando de filtros adicionais, como a suavização e a retirada de listras (AWANGE et al., 2011).

A distribuição e o fluxo de massa da missão GRACE são tradicionalmente estimados a partir das mudanças no potencial gravitacional da Terra, que normalmente são representadas pela expansão dos harmônicos esféricos (TAPLEY et al., 2004). O efeito dos coeficientes harmônicos de alto grau na órbita do satélite é pequeno em comparação com os coeficientes harmônicos de baixo grau. À medida que a altitude aumenta, há uma rápida atenuação da contribuição dos harmônicos de alto grau para o potencial da Terra em comparação com os harmônicos de baixo grau.

Com a existência de erros de modelagem e de equipamento e devido à menor observabilidade na direção leste-oeste, as estimativas dos coeficientes harmônicos de alto grau aumentam os erros no procedimento de estimativa dos coeficientes de Stokes (TAPLEY et al., 2004). Devido ao erro de modelagem e de equipamento combinado com o problema dos inversos mal colocados, os mapas das anomalias obtidos das soluções harmônicas esféricas

irrestritas da missão GRACE mostram falsas faixas norte-sul (SAVE et al., 2016). Esses erros foram reduzidos pela aplicação de um filtro de correção de linha ruidosa.

Há 3 tipos diferentes de abordagens das soluções mascons. Watkins et al. (2015) usaram derivadas parciais explícitas com expressão analítica para concentração de massa, relacionando as medições do intervalo entre satélites e as mascons individuais. Na segunda abordagem, as mascons estão relacionadas aos dados da taxa de variação ou dados da taxa de aceleração por meio de uma expansão dos harmônicos esféricos que é truncada em ordem e grau finitos como demonstrado por LUTHCKE et al., (2006, 2008, 2013); SABAKA ETAL (2010); ROWLANDS et al., (2010); SAVE et al., (2016). Na terceira abordagem, as soluções mascons são ajustadas aos coeficientes dos harmônicos esféricos obtidos pela missão GRACE. Este método é essencialmente uma forma de pós-processamento desde o processamento computacional das estimativas da anomalia de massa não conhecidas diretamente das observações dos dados da taxa de alcance da missão GRACE.

Save et al. (2016), utilizaram a segunda abordagem, definindo cada bloco de massa como uma representação dos harmônicos esféricos truncado e graus finitos até a ordem de 120 que estão relacionados a observação da taxa de variação por meio de suas derivadas parciais. Embora seja necessário  $n=179$  para representar  $1^\circ$  da grade equiangular, esta abordagem utiliza uma grade geodésica que tem aproximadamente no equador ou 120 km de largura. Além disso, a escolha de usar  $n = 120$  para o truncamento derivadas parciais foi feita para manter os requisitos computacionais gerenciáveis durante a experimentação.

Save et al. (2016), distribuíram a massa da Terra em uma grade geodésica, que é uma coleção de ladrilhos hexagonais (e 12 pentagonais) distribuídos sobre a superfície terrestre para se encaixarem. O tamanho de cada ladrilho é de aproximadamente  $1^\circ$  de distância longitudinal equatorial. A anomalia de massa para cada bloco de massa é estimada usando as observações de taxa de intervalo KBR e associadas as derivadas parciais harmônicas esféricas. O processo de estimativa singular é estabilizado usando a regularização de Tikhonov (SAVE et al., 2012) com uma matriz de regularização variável no tempo.

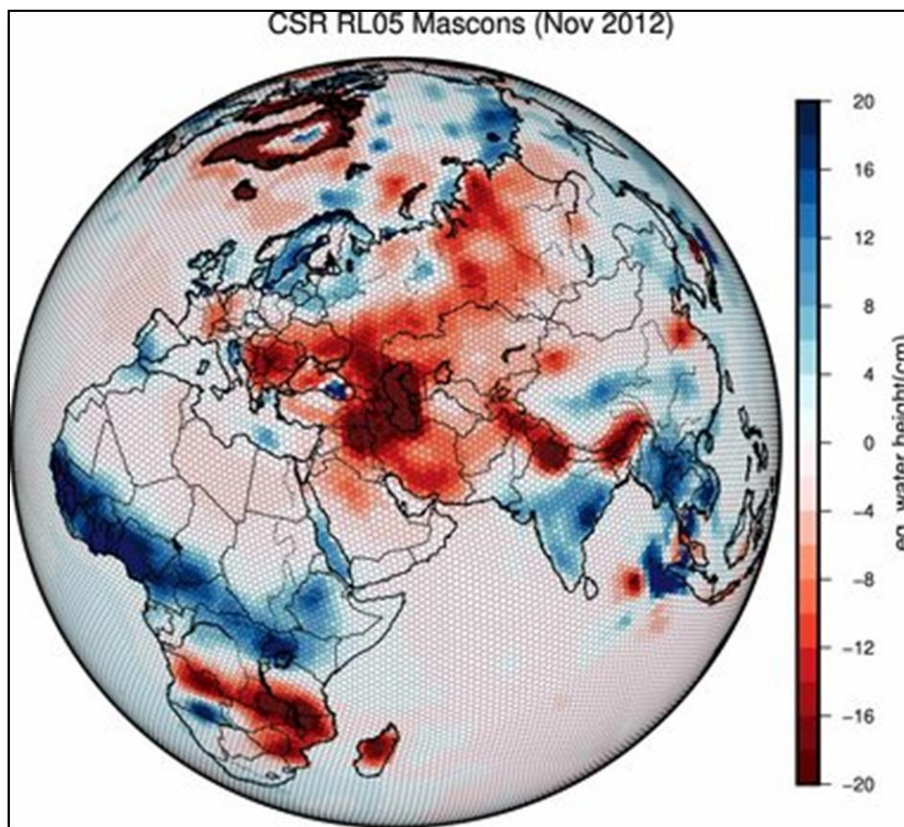
A substituição dos valores C20 nas estimativas da mascons com as estimativas da análise SLR (CHENG e TAPLEY, 2004), e a contribuição da correção dos geocentros de acordo com as estimativas de SWENSON et al. (2008) garantem consistência nos resultados obtidos em diferentes estudos com a missão GRACE.

Com as mascons, consegue-se implementar restrições geofísicas mais facilmente, pois as restrições a priori ajudam a filtrar o ruído das observações da missão GRACE na etapa de

processamento do Nível 2, onde ocorre a filtragem empírica de pós-processamento das derivadas dos harmônicos esféricos aplicada às redes terrestres e oceânicas.

O benefício das soluções mascons é que não é mais necessário aplicar o pós-processamento aos harmônicos esféricos ou fatores de escala empíricos da missão GRACE, podendo ser usadas para as aplicações da missão GRACE. As soluções mascons do CSR, como os mascons do JPL (WATKINSETAL., 2015) e os mascons do GSFC (LUTHCKEETAL., 2013), são globais e não adaptadas a uma aplicação específica, sendo aplicável a todas as áreas científicas de interesse, por exemplo, oceanografia, hidrologia da superfície terrestre e criosfera. A Figura 26 apresenta a 5ª versão das soluções mascons (Release 05 – RL05).

Figura 26 - Quinta versão das soluções mascons da missão GRACE (Release 05 – RL05).



Fonte: [http://www2.csr.utexas.edu/grace/RL05\\_mascons.html](http://www2.csr.utexas.edu/grace/RL05_mascons.html).

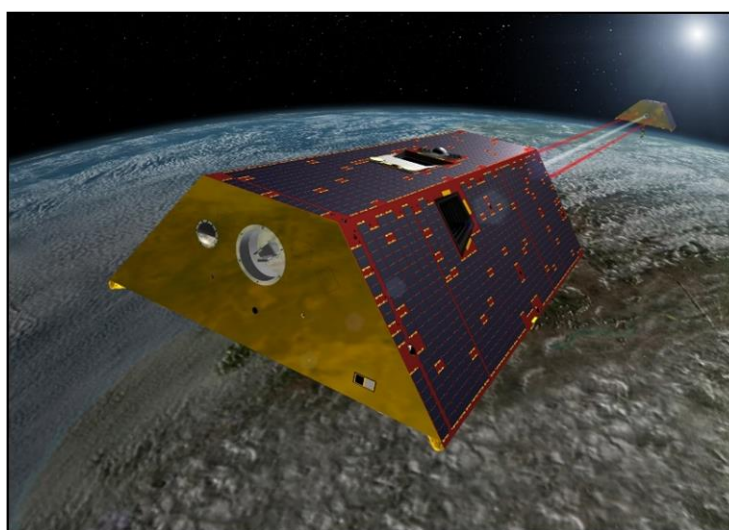
### 3.2.1.1 GRACE-FO

A missão *Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On* (GRACE-FO), é uma parceria entre a NASA e o Centro Alemão de Pesquisa em Geociências (*Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt-DLR*), lançada em 22 de maio de 2018. Utiliza satélites gêmeos para mapear com precisão as variações do campo gravitacional da Terra e a distribuição de massa na superfície. Foi concebido como sucessor da missão GRACE.

Conceitualmente semelhante à missão original do GRACE (2002 - 2017), o GRACE-FO (Figura 27) consiste em dois satélites idênticos orbitando ao redor da Terra a uma altitude inicial de aproximadamente 490 km, perto da órbita polar circular como muitos dos satélites do Sistema de Observação da Terra da NASA, se movendo ao redor da Terra de um polo a outro, levando cerca de 99 minutos para completar uma órbita, e separados a uma distância variando entre 220 a 50 km.

A GRACE-FO possui sensores que mensuram com precisão as mudanças na distância entre eles devido a perturbações orbitais causadas por variações geográficas e temporais no campo gravitacional da Terra. Essas medidas são devidas a duas tecnologias avançadas: um sistema de alcance de micro-ondas baseado na tecnologia GPS (*Global Positioning System*) e um acelerômetro muito sensível - um instrumento que mede as forças nos satélites além da gravidade como arrasto atmosférico. Utilizando o sistema de faixa de micro-ondas, a missão GRACE pode medir a distância entre os satélites na escala do micrômetro.

Figura 27 - Satélites gêmeos GRACE-FO vistos a partir da renderização de um artista.



Fonte: <https://podaac.jpl.nasa.gov/GRACE-FO>. Créditos: NASA.

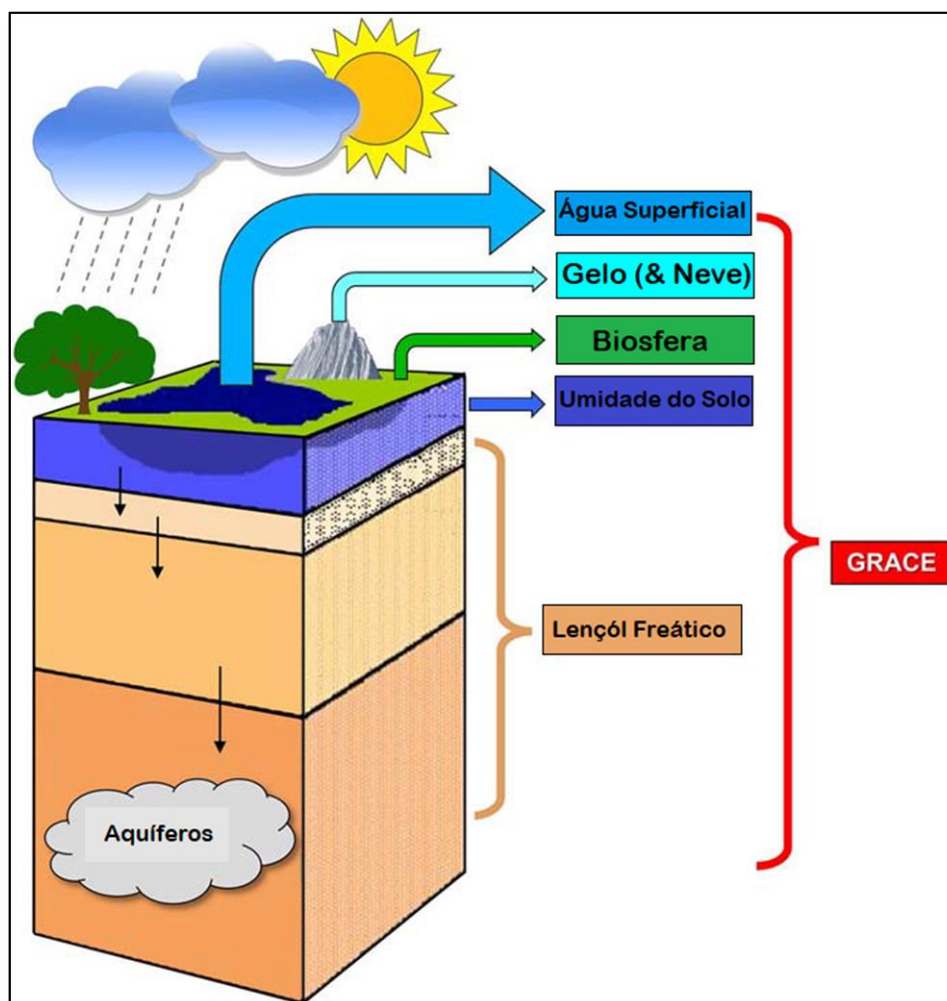
### 3.2.1.2 Armazenamento de Água Terrestre (*Terrestrial Water Storage – TWS*)

O ciclo global da água, que troca água entre os oceanos, atmosfera e terra, desempenha um papel fundamental no plano físico e processos químicos que influenciam o clima da Terra e sua mudança de temperatura. A redistribuição de massa de água e transformações de estado (por exemplo, precipitação, evapotranspiração e derretimento da neve/gelo) alteram o aquecimento e o resfriamento da superfície e da atmosfera da Terra que, por sua vez, afetam circulação atmosférica e oceânica global e eventualmente precipitação e padrões de evapotranspiração.

Há evidências crescentes que o sistema climático da Terra está sofrendo mudanças significativas com consequências observáveis para uma variedade de processos (IPCC, 2007). Há evidências de mudanças na intensidade de eventos climáticos, como El Niño e La Niña, secas extremas e inundações, inverno severo, tempestades de verão e grandes furacões (IPCC, 2007). O melhoramento do monitoramento e a compreensão do ciclo global da água fornecem informações críticas que servem para entender melhor o clima da Terra e seu ecossistemas (CAZENAVE et al., 2010).

A missão GRACE é geralmente considerada como um avanço revolucionário na medição do TWS global, apesar da resolução espacial. A missão GRACE mede a mudança do armazenamento do nível água verticalmente e não pode separar as contribuições individuais (ou seja, reservatórios de água na superfície, solo, gelo e águas subterrâneas) sem outros dados independentes, vide Figura 28 e Equação 8.

Figura 28 - Diagrama esquemático do armazenamento integrado de água conforme mensurado pela missão GRACE.



Fonte: Adaptado de CAZENAVE et al. (2010), por MORAES, 2019.

Sob o ponto de vista hidrológico, por exemplo, a determinação dos volumes totais de água em uma região (TWS), por meio de dados da missão GRACE, adquiridos em escalas de resolução espacial de 400 km e de resolução temporal de 1 mês, corresponde a um conjunto independente de dados do equivalente à altura d'água com o propósito de efetuar procedimento complementar de calibração e de validação de modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão, operação que é, geralmente, realizada a partir de dados de precipitação, evaporação potencial e vazão.

Com a base de dados da missão GRACE, pode-se prospectar sobre a representatividade espaço-temporal de volumes armazenados de água em uma bacia hidrográfica, associando-se esses aspectos com o balanço hídrico e a natureza dos escoamentos superficiais e subterrâneos

associados, na escala da bacia, com os processos físicos de chuva e evaporação (MOREIRA, 2016).

A mudança de TWS, como componente principal do ciclo global da água, reflete nas mudanças na água armazenada no solo, na neve sobre terra e reservatórios de água subterrânea, e está intimamente conectada à precipitação acumulada (P), evaporação (E) escoamento superficial e subterrânea (Q) dentro de uma determinada área ou bacia, através da equação do balanço hídrico relativo a uma mudança no armazenamento de água (dS) unidade de tempo (dt):

$$\frac{dS_1}{dt} = P_1 - E_1 - Q \quad (8)$$

E sobre os oceanos,

$$\frac{dS_0}{dt} = P_0 - E_0 + Q \quad (9)$$

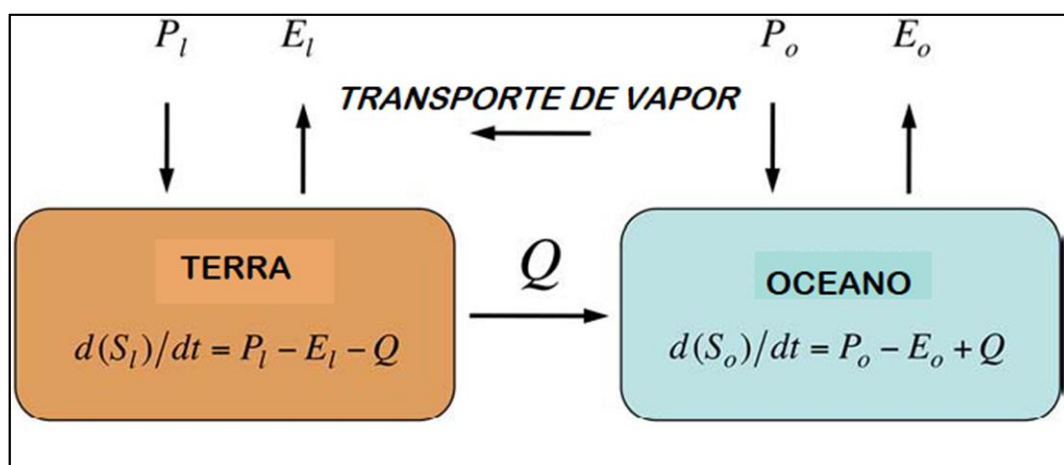
em que os índices 1 e 0 se referem à terra e ao oceano, respectivamente. Para muitas áreas terrestres, o TWS é praticamente uma medida do conteúdo de água total em reservas na superfície, camadas do solo, gelo (incluindo neve), reservatórios de água subterrânea (lençol freático) e biomassa (o que é desconsiderado na maioria dos casos) e também é um bom indicador de condições climáticas anormais, como estiagens e inundações. S1 pode ser expresso como (Equação 10):

$$S_1 = S_{solo} + S_{\text{água subterrânea}} + S_{\text{gelo}} + S_{\text{biomassa}} \quad (10)$$

A Figura 29 mostra um diagrama simplificado para representar o ciclo da água entre a superfície terrestre e a dos oceanos. As variações do armazenamento de água terrestre e oceânica são equilibradas por precipitação, evaporação (evapotranspiração para terra) e descarga de água doce da superfície terrestre para o oceano. É importante notar que Q está ligado à terra e aos oceanos como pia e torneira, respectivamente. Assim, em escalas de tempo mensais, Q pode ser estimado através da equação do balanço hídrico sobre o oceano (SEO et al., 2009).



Figura 29 - Diagrama esquemático do ciclo global da água.



Fonte: Adaptado de SEO et al. (2009), por MORAES, 2019.

A alteração TWS com quantificação precisa (em relação ao TWS médio durante um certo período de tempo) fornece uma medida-chave do ciclo da água continental e dos recursos hídricos disponíveis em uma determinada região ou bacia hidrográfica. No entanto, estimar a mudança TWS é difícil porque existem observações limitadas (especialmente para a água subterrânea e a umidade do solo) nas bacias menores

### 3.3 SECA E ESTIAGEM

A seca é o mais complexo e menos compreendido de todos os fenômenos naturais, afetando mais pessoas do que qualquer outro fenômeno (HAGMAN, 1984). A seca é um fenômeno climático lento, tornando difícil uma determinação precisa do seu começo e fim. Por afetar setores econômicos e sociais, há uma grande variação na sua definição (WILHITE et al, 1993). Segundo Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2009), a seca é um dos fenômenos climáticos que ocorre em uma região quando a precipitação, num período de tempo, apresenta valores abaixo da normal climatológica.

De acordo com a EMBRAPA (2009), a seca pode ser classificada em 4 tipos, como podemos observar no Quadro 7:

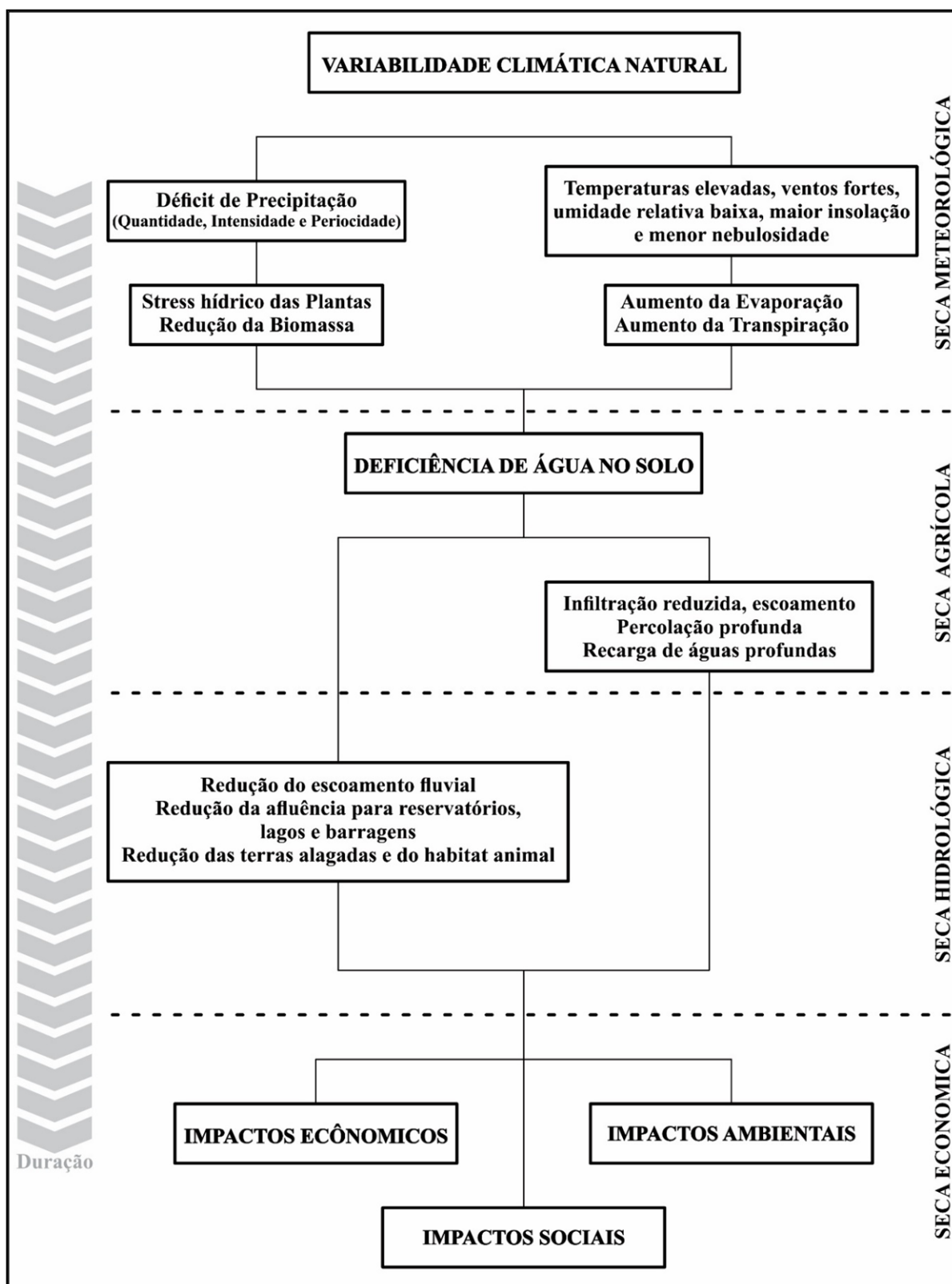
Quadro 7 - Classificação da seca.

Seca Meteorológica	É definida como déficit da precipitação em relação ao valor normal. Caracteriza-se pela falta de água induzida pelo desequilíbrio entre a precipitação e a evaporação, a qual depende de outros elementos como a velocidade do vento, temperatura, umidade do ar e insolação. Esse tipo de seca ocorre quando há precipitações abaixo dos 70% a 75% do valor normal durante um período prolongado.
Seca Hidrológica	Esse tipo de seca está relacionado com a redução dos níveis médios de água em reservatórios de superfície e subterrâneos por um determinado período de tempo, podendo ser de dias, semanas, meses ou anos sucessivos. Geralmente ocorre no fim de um período muito longo de seca meteorológica e como consequência ocasiona redução de abastecimento de água nos centros urbanos, industriais, nos sistemas de irrigação e na produção de energia elétrica.
Seca Agrícola	Essa seca está relacionada à disponibilidade de água no solo para suportar o crescimento e desenvolvimento das plantas. A seca agrícola geralmente manifesta-se após a seca meteorológica, mas antes da seca hidrológica (PIRES, 2003).
Seca Socioeconômica	Este tipo de seca se relaciona com o impacto da seca sobre as atividades humanas, incluindo os impactos diretos e indiretos na produção agrícola e outras atividades econômicas. Ocorre quando o déficit de água induz a falta de bens ou serviços (energia elétrica, alimentos, entre outros) devido a um volume de água inadequado, resultante de uma má distribuição das chuvas, de um aumento no consumo, ou ainda de um mau gerenciamento dos recursos hídricos.

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2009), por MORAES, 2019.

A estiagem é um dos desastres de maior ocorrência e impacto no mundo, justamente pelo longo período de ocorrência e a abrangência de grandes áreas (GONÇALVES et al., 2006). É considerado estiagem quando há um atraso superior a 15 dias do início da temporada chuvosa e também quando as médias de precipitação mensais dos meses chuvosos se mantêm inferiores a 60% das médias mensais ao longo do período (CASTRO, 2003). A Figura 30 apresenta a sucessão e evolução temporal dos fenômenos resultantes da seca, passando pelos tipos de seca mostrado no quadro acima.

Figura 30 - Evolução das secas em função da duração e dos impactos.



Fonte: SILVA et al. (2005) adaptado por MORAES, 2019.

Os desastres relativos aos fenômenos de estiagens e secas pertencem ao grupo 4 classificados como desastres naturais climatológicos, conforme a nova Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE), onde seca é definida como uma estiagem prolongada durante tempo suficiente, para que a falta de precipitação provoque grave desequilíbrio hidrológico. Já a estiagem é um período prolongado de baixa pluviosidade ou sua ausência, em que a perda de umidade do solo é superior à sua reposição. Logo, seca é a forma crônica do evento de estiagem (KOBAYAMA et al., 2006). O presente estudo usará a definição de estiagem do COBRADE para definir o evento, entendendo que o evento que ocorre na bacia estudada é um período prolongado de baixa precipitação.

Os maiores períodos de estiagens na Bacia do Uruguai estão associados aos períodos de pouca ocorrência de precipitações de forma muito instantânea. Isso quer dizer que, devido à baixa capacidade de armazenamento da Bacia e a grande profundidade dos mananciais subterrâneos mais volumosos, o regime de vazões é muito dependente do regime de chuvas.

De acordo com CEPED (2013b, 2013c), ao analisar os desastres naturais que aconteceram nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina ao longo do intervalo tempo entre 1991 a 2012, as estiagens, diretamente relacionadas à redução das precipitações pluviométricas, apresentam-se como o desastre mais recorrente, e correspondem a 3.100 registros, equivalente a 53,6% dos desastres naturais do RS, e 1.518 registros oficiais do estado de SC equivalente a 30% dos desastres naturais, sendo o segundo evento mais recorrente no estado, atrás apenas das enxurradas.

Nos eventos de estiagens registrados entre os anos de 2003 a 2005, mostram o nível d'água na Bacia, muito abaixo do normal para a época e operam com elevado índice de risco. No verão de 2004/2005 praticamente a totalidade dos Municípios da Bacia decretaram em situação de emergência devido à estiagem (MMA, 2006).

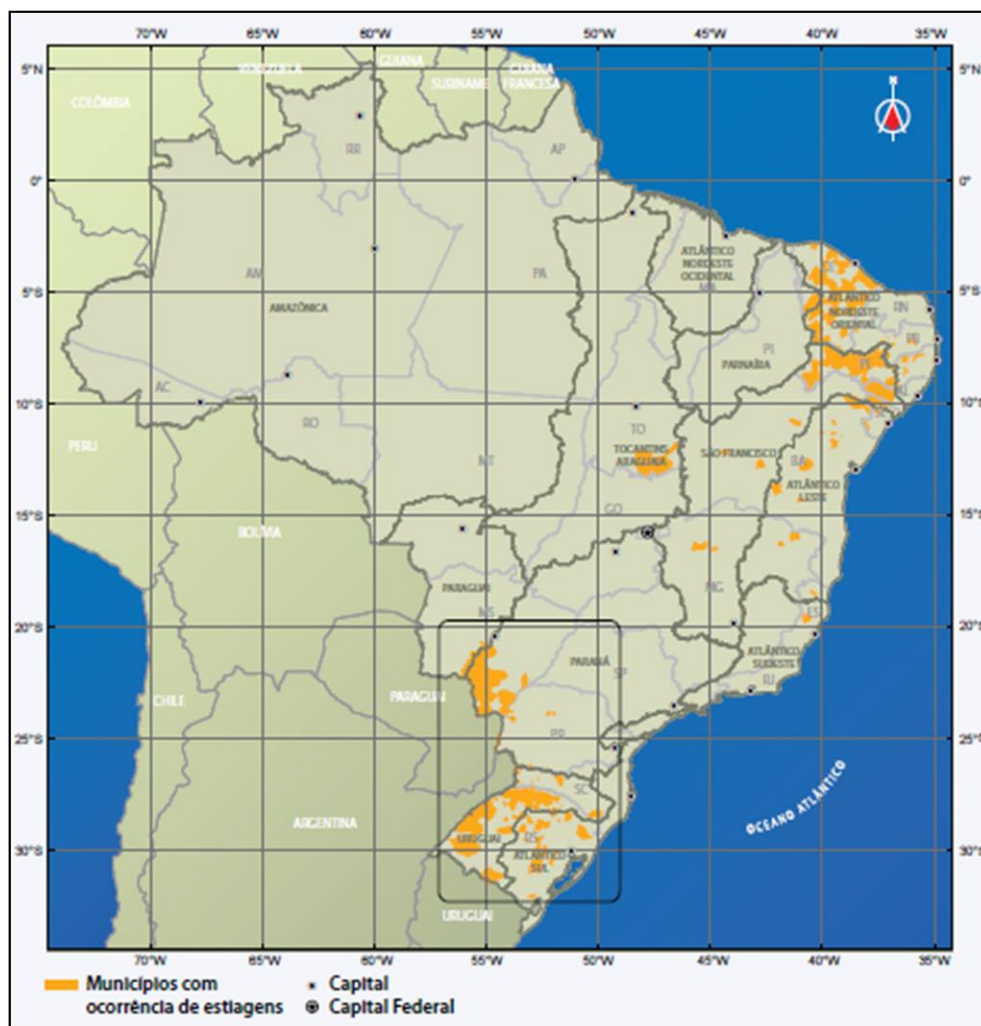
No trecho médio da Bacia, onde ocorre a irrigação do arroz, o mesmo apresentou grandes perdas na safra. Nas áreas de plantio de soja não irrigada houve uma perda maior do que a do arroz, e o mais grave, foram os problemas de abastecimento na região norte da Bacia, onde houve sério e intenso racionamento.

Além disso, são frequentes os relatos que elevada exploração dos cursos de água da Bacia, principalmente na área de concentração rizícola, de modo a rebaixar os níveis dos rios a cotas inferiores às que podem ser registradas nas estações fluviométricas (MMA, 2006).

Os registros de estiagem na bacia entre os anos 2008 e 2009, podem ser explicados, em parte, pela baixa quantidade de chuva ocorrida nessas regiões, nos meses de dezembro de 2008

e abril de 2009. Na figura 31, pode-se observar a distribuição dos decretos de SE devido à estiagem entre 2008 e 2009.

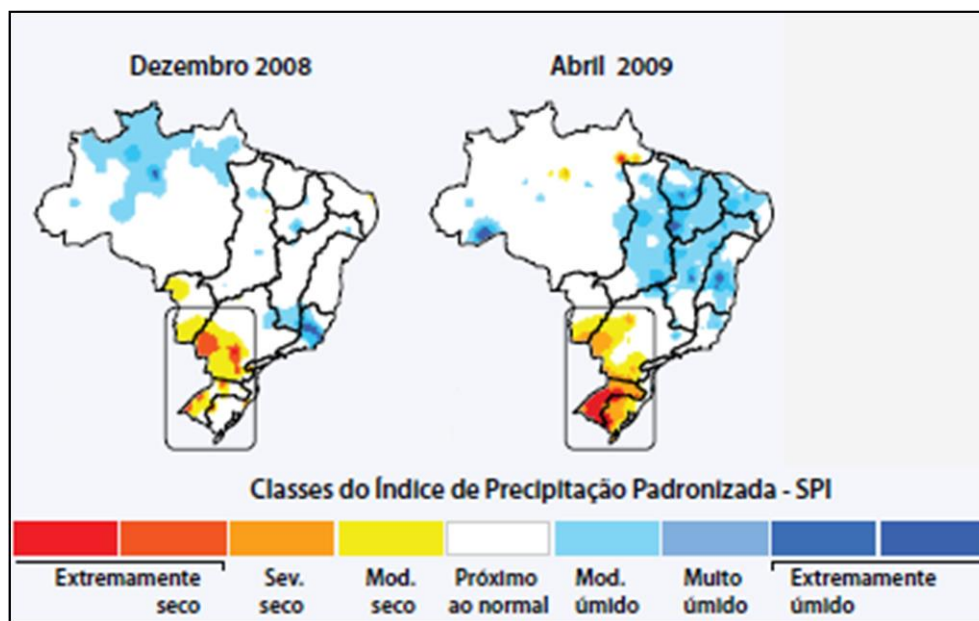
Figura 31 - Distribuição dos decretos SE no devido à estiagem em 2009 no território brasileiro.



Fonte: ANA, 2010b.

Pode-se, também, observar a distribuição espacial das classes do Índice de Precipitação Padronizada (SPI) na Região Hidrográfica do Rio Uruguai (Figura 32).

Figura 32 - Distribuição do SPI nas bacias hidrográficas do território brasileiro.

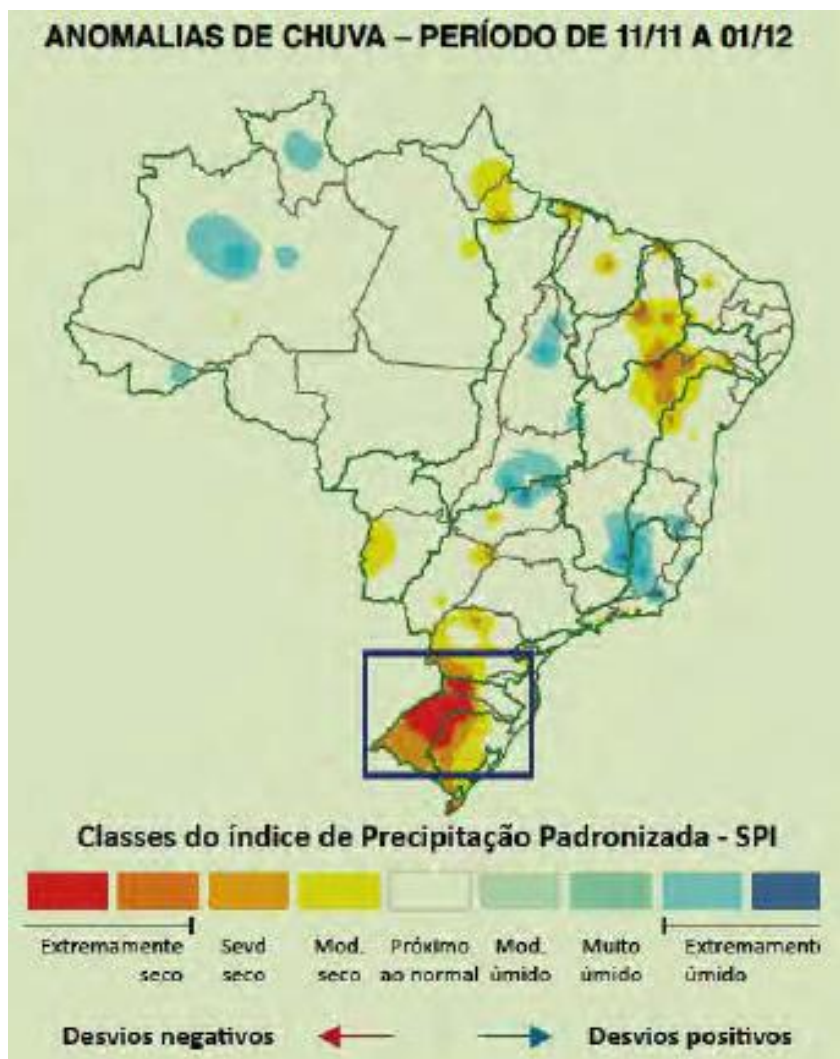


Fonte: Adaptado de ANA (2010b), por MORAES, 2019.

O número de decretos de SE ou ECP, ocorridos entre 2003 e 2012, no Brasil, relação aos eventos críticos de seca/estiagem, foram 10.272, distribuídos por 8.610 municípios, sendo que no ano de 2012, 91% dos municípios inseridos da bacia do Rio Uruguai decretaram SE ou ECP devido a eventos críticos de estiagem (ANA, 2012).

No mês de janeiro de 2012, a ANA priorizou o acompanhamento das estações de Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul em função da estiagem na região. Intensificou-se o monitoramento do nível, vazão e qualidade da água dos rios da região. Nos primeiros dias do ano, os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul totalizavam 82 municípios em Situação de Emergência. A Figura 33 mostra a anomalia de chuva no trimestre de novembro/ 2011 a janeiro de 2012, com destaque para a região dos estados do Rio Grande do Sul, Paraná e Santa Catarina (ANA, 2013).

Figura 33 - Anomalias de chuva no período entre novembro/11 a janeiro/12.



Fonte: ANA (2013).

### 3.3.1 Obtenção do Equivalente à Altura d'Água (EqW) por meio da Missão GRACE

A componente estática do campo gravitacional da Terra corresponde a aproximadamente 99% do campo total devido à predominância das contribuições de massas não variáveis no tempo (RAMILLIEN, 2005). Essas componentes podem ser facilmente estimadas calculando-se a média temporal de uma série suficientemente longa de modelos mensais do geopotencial obtidas com o uso dos dados da GRACE ou considerando um único modelo calculado sobre um longo período de observações dos satélites. As componentes variáveis, por sua vez, correspondem principalmente ao transporte de massa na camada

superficial, como os grandes descolamentos d'água e a dinâmica atmosférica (ALMEIDA FILHO, 2009).

As mudanças mensais observadas na gravidade são causadas por mudanças mensais na massa. As alterações de massa podem ser consideradas como concentradas em uma camada muito fina de mudanças de espessura da água perto da superfície da Terra (ou seja, em uma camada de até vários quilômetros de espessura).

Na realidade, a maioria das mudanças de gravidade mensais são realmente causadas por mudanças no armazenamento de água em reservatórios hidrológicos, movendo as massas de oceânicas, atmosféricas e polares e suas trocas entre esses compartimentos do sistema terrestre. Sua extensão vertical é medida em centímetros de espessura do equivalente à altura d'água, muito menor do que o raio da Terra ou as escalas horizontais das mudanças, que são medidas em quilômetros (<https://grace.jpl.nasa.gov/data/monthly-mass-grids/>).

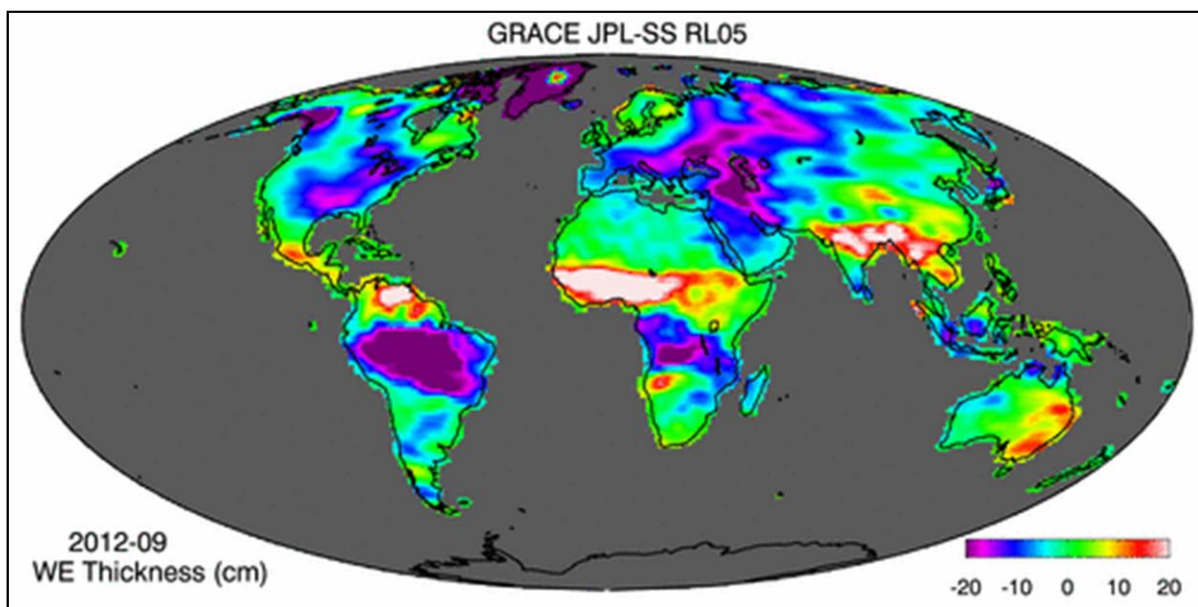
Algumas mudanças na gravidade são causadas pela redistribuição de massa na Terra "sólida", como aquelas que seguem de um grande terremoto ou aquelas devido ao ajuste isostático glacial. Nesses casos, a interpretação das mudanças de gravidade em termos de "equivalente à altura d'água" não é correta, embora ainda seja possível calcular essa quantidade (ou seja, removendo os efeitos de Terra "sólida" para isolar as mudanças de massa relacionadas à água) (<https://grace.jpl.nasa.gov/data/monthly-mass-grids/>).

A massa da atmosfera é removida durante o processamento usando os campos de pressão atmosférica do ECMWF, de modo que as grades de massa da superfície GRACE Tellus não contêm variabilidade da massa atmosférica em áreas de glacial ou continental como a Groenlândia e a Antártica (exceto, é claro, erros em ECMWF). Um modelo oceânico é usado para remover movimentos oceânicos de alta frequência (6 horas a submensais) e movimentos orientados pela pressão que de outra forma poderiam ser aliados nas soluções mensais de gravidade. Os campos de gravidade resultantes não refletem a variabilidade do oceano se o modelo fosse perfeito (<https://grace.jpl.nasa.gov/data/monthly-mass-grids/>).

Para usar esses resultados sobre os oceanos, os campos de pressão do fundo do oceano GRACE Tellus têm as redes de modelo de oceano mensalmente mensuradas adicionadas de volta. Esta é uma das razões pelas quais os dados oceânicos e terrestres são disponibilizados separadamente, como podemos observar nas Figuras 34 e 35. (<https://grace.jpl.nasa.gov/data/monthly-mass-grids/>).

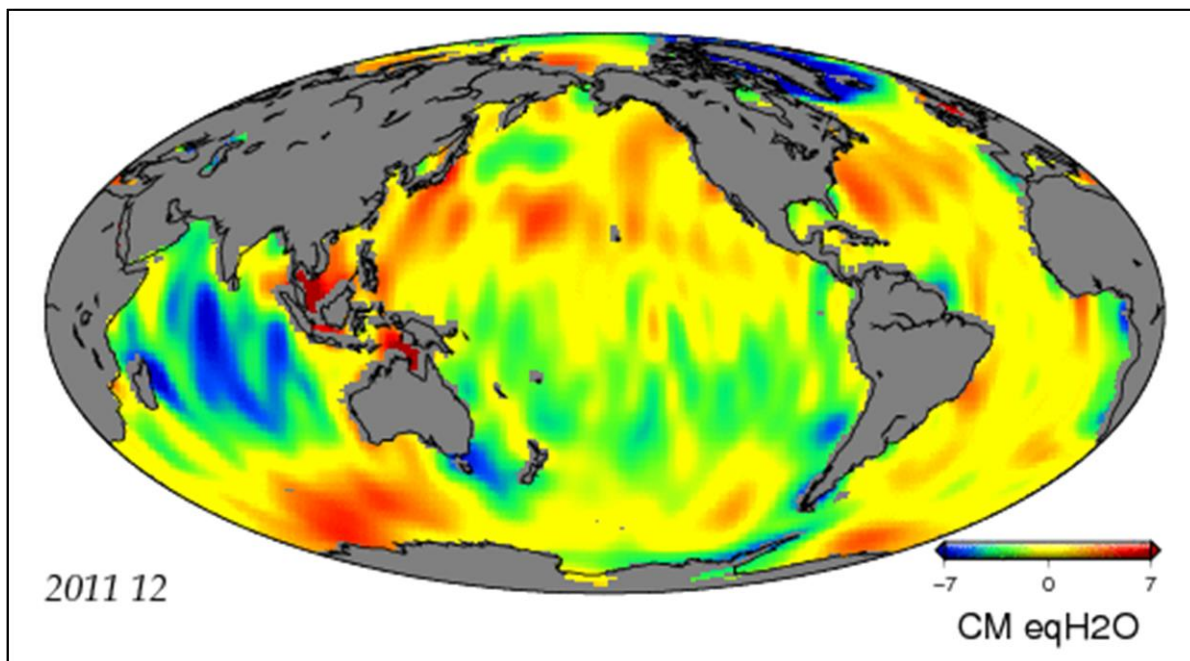


Figura 34 - Equivalente à altura d'água terrestre.



Fonte: <https://grace.jpl.nasa.gov/data/monthly-mass-grids/>

Figura 35 - Equivalente à altura d'água oceânica.



Fonte: <https://grace.jpl.nasa.gov/data/monthly-mass-grids/>

O procedimento teórico de obtenção da estimativa da EqW esbarrava no problema da não abundância de observações de passagens do satélite GRACE no início da missão. Assim, este processo foi dividido em três etapas. Na primeira, é introduzido o procedimento de obtenção da carga de superfície a partir dos modelos do geopotencial. Na etapa seguinte, apresenta-se a metodologia utilizada somente nos primeiros meses da missão onde, devido à não quantidade suficiente de passagens, foi feita uma aproximação inicial dos deslocamentos de massa d'água a partir dos modelos climáticos globais com o objetivo fornecer informações a priori e assim tornar o sistema possível. A terceira e última apresenta a aplicação do filtro de expansão isotrópica com o objetivo de converter a carga de superfície na EqW. Atualmente, devido à superabundância de observações, apenas as etapas primeira e terceira precisam ser aplicadas para se estimar a EqW (ALMEIDA FILHO, 2009).

Nesta pesquisa, utiliza-se o Índice de Vegetação Normalizado adquirido a partir do sensor MODIS no período do estudo para correlacionar com o EqW obtido pelas soluções mascons da missão GRACE.

### 3.4 MODIS

O sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) é um sensor a bordo dos satélites da TERRA (originalmente conhecidos como EOS AM-1) e AQUA (originalmente conhecidos como EOS PM-1), lançados, respectivamente, em dezembro de 1999 e em maio de 2002. Tanto o satélite TERRA quanto o AQUA têm coletado dados sobre a mudança climática na Terra. A órbita do TERRA ao redor da Terra é cronometrada de modo que aconteça de norte a sul através do equador pela manhã, enquanto AQUA passa do sul para o norte ao longo da linha do equador à tarde (<https://modis.gsfc.nasa.gov>). O Quadro 8 apresenta algumas características do MODIS.

Quadro 8 - Características do sensor MODIS.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Resolução Radiométrica	Área Imageada
MODIS	1	620-670 nm	250 m	1 a 2 dias	12 bits	2330x5000 km
	2	841-876 nm				
	3	459-479 nm	500 m	1 a 2 dias	12 bits	2330x5000 km
	4	545-565 nm				
	5	1230-1250 nm				

6	1628-1652 nm				
7	2105-2155 nm				
8	405-420 nm				
9	438-448 nm				
10	483-493 nm				
11	526-536 nm				
12	546-556 nm				
13	662-672 nm				
14	673-683 nm				
15	743-753 nm				
16	862-877 nm				
17	890-920 nm				
18	931- 941 nm				
19	915-965 nm				
20	3660-3840 nm				
21	3929-3989 nm				
22	3929-3989 nm	1.000 m	1 a 2 dias	12 bits	2330x5000 km
23	4020-4080 nm				
24	4433-4498 nm				
25	4482-4549 nm				
26	1360-1390 nm				
27	6535-6895 nm				
28	7175-7475 nm				
29	8400-8700 nm				
30	9580-9880 nm				
31	10780-11280 nm				
32	11770-12270 nm				
33	13185-13485 nm				
34	13485-13785 nm				
35	13785-14085 nm				
36	14085-14385 nm				

(conclusão)

Fonte: Adaptado de EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE (2013), por MORAES, 2019.

O sensor MODIS desempenha um papel vital no desenvolvimento de modelos de sistemas terrestres interativos, globais e validados, capazes de prever mudanças globais com precisão suficiente para ajudar os formuladores de políticas a tomar decisões acertadas sobre a proteção de nosso meio ambiente. O sensor MODIS a bordo do satélite TERRA capturou uma imagem colorida da fumaça dos incêndios que queimam a Floresta Amazônica, principalmente no Brasil, e se estendeu pelo norte da América do Sul, como pode-se observar na Figura 36.

Figura 36 - Imagem colorida da fumaça no Peru e Bolívia, no dia 16 e agosto de 2019.



Fonte: *MODIS Land Rapid Response Team*, NASA GSFC. Disponível em: [https://modis.gsfc.nasa.gov/gallery/individual.php?db\\_date=2019-08-24](https://modis.gsfc.nasa.gov/gallery/individual.php?db_date=2019-08-24).

### 3.4.1 Índices de Vegetação do MODIS

Os índices de vegetação (IV's) do sensor MODIS, com resolução temporal de 16 dias e em múltiplas resoluções espaciais, fornecem comparações espaciais e temporais consistentes do esverdeamento ou vigor da vegetação (*greenness*) da copa da vegetação, uma propriedade composta da área foliar, clorofila e estrutura da copa. Dois índices de vegetação são derivados da reflectância atmosférica nas faixas de onda vermelha, infravermelha próxima e azul.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI), é utilizado em estudos ambientais, permitindo realizar análises, em diferentes escalas, sobre a cobertura vegetal de determinada região. O NDVI (Rouse et al., 1974) é a relação entre as medidas espectrais de duas bandas, a infravermelho próximo e a vermelha.

O Índice de Vegetação Melhorado (*Enhanced Vegetation Index* – EVI) é um índice desenvolvido para reduzir as influências atmosféricas e do solo de fundo do dossel no monitoramento da vegetação (Justice et al., 1998), além de realçar o sinal da vegetação com melhor sensibilidade em regiões com alta biomassa. Peters et. al. (2002) desenvolveram o SVI (*Standardized Vegetation Index* - Índice de Vegetação Normalizada) usando a mesma padronização descrita no SPI (*Standardized Precipitation Index* - Índice de Precipitação Normalizada).

O NDVI MODIS fornece continuidade com o registro de séries temporais AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) NDVI da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) para aplicações históricas e climáticas, e o índice de vegetação melhorado (EVI), que minimiza as variações de cobertura do solo e melhora a sensibilidade em condições de vegetação densa. Os dois produtos caracterizam eficazmente os processos de vegetação.

Os índices de vegetação são obtidos a partir da refletância bidirecional diária da superfície, corrigida pela atmosfera. Os VI's usam um método de composição específico do MODIS baseado em medidas de garantia de qualidade do produto para remover pixels de baixa qualidade. A partir dos valores dos VI's com boa qualidade, uma restrita abordagem de um ângulo de vista, em seguida, seleciona um pixel para representar o período de composição (a partir dos dois valores maiores de NDVI, seleciona o pixel mais próximo do nadir). Como os sensores MODIS a bordo dos satélites TERRA e AQUA são idênticos, o algoritmo VI gera cada composto de 16 dias composto por intervalo de oito dias (produtos em fases) para permitir um produto de com maior resolução temporal combinando ambos os registros de dados. O conjunto de produtos MODIS VI's é usado com sucesso em todos os ecossistemas, estudos climatológicos, de gestão de recursos naturais e pesquisa operacional, como demonstrado com o número crescente de publicações (<https://modis.gsfc.nasa.gov>).

De acordo com Sousa Junior et al. (2011), as imagens EVI/MODIS por suas características podem ser utilizadas para estudos sobre estiagens uma vez que permite identificar as mudanças no vigor da vegetação causadas por eventos climáticos.

Com as imagens obtidas pelo sensor MODIS pode-se identificar mudanças expressivas na vegetação e principalmente as áreas mais afetadas pela estiagem uma vez que, conforme observado por Huete et al. (1999), a variação ocorrida no índice de vegetação melhorado (EVI) tem uma boa correlação com o conteúdo de biomassa verde, e esses valores adquiridos por sensores remotos mostram ser bons indicadores do stress hídrico nas plantas (excesso ou falta de água na vegetação) (SOUSA JUNIOR et al., 2011).

### 3.5 PESQUISAS SOBRE A TEMÁTICA

A observação da Terra a partir do espaço nos últimos 50 anos resultou em avanços em várias áreas das geociências. Isto é o caso, em particular, da mensuração da forma precisa da Terra e sua estrutura interna em larga escala a partir da medição detalhada do campo gravitacional do planeta. Desde o início da década de 1970, rastreando as órbitas de dezenas de

satélites em diferentes altitudes e inclinações, aumentando o conhecimento do campo de gravidade (estático) da Terra. Tradicionalmente, a recuperação do campo de gravidade dos dados de rastreamento foi uma abordagem iterativa, que compara uma órbita numericamente integrada de um campo gravitacional inicial e outros modelos de força com observações do movimento pelo satélite (geralmente a partir de estações terrestres).

Décadas de rastreamento de dados de um grande número de satélites geodésicos em diferentes configurações orbitais levaram a um campo de sucessão de soluções gravimétricas de maior precisão e resolução. Além disso, a combinação destas soluções "apenas para satélite" com medidas de superfície e anomalias gravitacionais baseadas em altimetria (a partir de medidas de altura do geóide oceânico) proporcionou soluções de campos de gravidade globais com qualidade e resolução melhores (CAZENAVE, 2010).

### **3.5.1 Aplicação Hidrológica**

Nos últimos anos, os dados da missão GRACE foram aplicados com sucesso em estudos de mudanças de TWS globais e de escala de bacia. Os primeiros estudos foram focados no ciclo sazonal e mostraram uma boa relação com o modelo hidrológico global.

Rodell et al. (2004), mostrou a evolução TWS desde 2002 em algumas bacias hidrográficas selecionadas estimando a partir de GRAGRIA (usando soluções CSR RL04) e simulando pelo Modelo hidrológico GLDAS, que não inclui a simulação de reserva de águas subterrâneas e de águas superficiais. Em geral, modelos hidrológicos tem bom desempenho em escalas de tempo sazonais (na maioria das bacias, o sinal sazonal é a contribuição dominante, representando 70-80% do sinal total).

Na bacia amazônica, porém, a reserva de águas superficiais e subterrâneas, que estão ausentes das estimativas GLDAS, podem contribuir significativamente para mudanças de TWS e provavelmente são responsáveis pela grande discrepância entre as observações da missão GRACE e as estimativas GLDAS (CHEN et al., 2009).

Segundo Guentner (2008), as várias comparações realizadas mostram que, para o ciclo anual, as diferenças entre os modelos hidrológicos são da mesma ordem de magnitude dos erros da missão GRACE. No entanto, no modelo hidrológico-GRACE, as comparações destacam os limites de resolução espacial desta missão quando se considera pequenas bacias (< 1 milhão de km<sup>2</sup>).

A pesquisa de Klees et al. (2008) investigou diferentes padrões globais (harmônicos esféricos) e regionais (soluções Mascons-GRACE) de vários centros de processamento sobre

um grande número de bacias hidrográficas e não encontrou melhor desempenho consistente de um tipo de solução ou outro, e nenhuma relação entre precisão e tamanho da bacia ( $< 1$  milhão de  $\text{km}^2$ ). Eles estimaram a precisão das soluções da missão GRACE mensais para  $\sim 2$  cm de camada de água equivalente sobre as bacias hidrográficas superior a 1 milhão de  $\text{km}^2$ .

Em 2009, os pesquisadores do IAG-USP, Molina e Bomfim, publicaram um estudo na Revista Brasileira de Geofísica que visou estimar e analisar a variação dos elementos do campo de gravidade na região do Aquífero Guarani no período de dois anos e três meses – abril de 2002 a julho de 2004 – usando os dados da missão GRACE. Esta variação englobava todas as mudanças gravitacionais causadas por variações na distribuição de massa da superfície da Terra e pela deformação da Terra Sólida em resposta a estas variações de massa, estimadas pelos coeficientes de STOKES fornecidos pela missão GRACE.

As soluções foram obtidas somente a partir de perturbações de órbita de satélites independentemente de dados gravimétricos da superfície oceânica e continental. As soluções mensais do campo gravitacional da Terra fornecidas pela missão GRACE foram processadas e forneceram os valores da altura geoidal e anomalia ar-livre para cada conjunto de soluções mensais, juntamente com os erros associados. Uma inversão linear 3-D da altura geoidal residual foi realizada para obter a distribuição de densidades associadas a estas variações, verificando a viabilidade do uso dos dados da missão GRACE na investigação da variação das massas d'água do Aquífero Guarani.

Em 2009, Almeida Filho desenvolveu uma metodologia para as estimativas das cotas d'água em áreas inundáveis não monitoradas ou de difícil acesso. Para isso, os coeficientes de STOKES, disponibilizados pelo GRGS de Toulouse, foram convertidos, por um processo denominado inversão, no EqW para o período de aproximadamente 4 anos (julho de 2002 a maio de 2006) e os valores comparados às cotas do nível d'água in-situ obtidas pela ANA.

A escolha da bacia Amazônica estava relacionada ao fato de a mesma apresentar, próximo ao centro, amplitudes de aproximadamente 1250 mm no nível do EqW, sendo as maiores do mundo. A regionalização dos modelos globais das variações deste campo pôde ser aplicada para uma boa estimativa nas cotas d'água in-situ. Assim, foram estimados os erros desta metodologia, que são da ordem de aproximadamente 160 mm para o EqW, oriundos dos erros nos coeficientes de STOKES, truncamento do espectro e erros de vazamento de informações hidrológicas das bacias vizinhas.

A metodologia tratou de estimar as cotas onde não existam estações de monitoramento, avaliando a ordem de grandeza dos erros. Por fim, foram apresentadas cartas que relacionam hidrogeologicamente as defasagens apresentadas nos ciclos semianuais e as áreas onde a

metodologia poderá ser melhor aplicada com estimativas mais precisas do EqW e com maior coerência entre os dados satelitais e terrestres.

Chen et al. (2010), estudaram os dados da missão GRACE que mostram uma queda significativa no TWS na bacia hidrográfica La Plata (parte inferior sul), na América do Sul, no período de 2002 a 2009, consistente com as condições de seca reconhecidas na região. Os dados da missão GRACE revelam um quadro detalhado da evolução temporal e espacial da seca severa, o que sugere que a seca começou no baixo La Plata em torno da Primavera austral 2008 e depois se espalhou por toda a bacia do Plata e atingiu o pico no outono austral de 2009. Os dados mostram que no pico da seca, houve um déficit médio do TWS de aproximadamente 12 cm (espessura da camada de água equivalente) abaixo da média de 7 anos, em uma ampla região no baixo La Plata.

As medições da missão GRACE são consistentes com os dados de precipitação acumulados provenientes da detecção remota por satélite e com as alterações do índice de vegetação derivadas das observações de satélite Terra. O modelo do *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS) capta o evento de seca, mas subestima sua intensidade. Os dados limitados disponíveis sobre o nível da água subterrânea no sul de La Plata mostram um significativo esgotamento das águas subterrâneas, provavelmente associado à seca nessa região. Observou-se que a variação do TWS observada pela missão GRACE e as anomalias de precipitação na região estudada parecem estar estreitamente correlacionadas com o índice climático ENSO, com as estações de seca e cheia correspondentes aos eventos La Niña e El Niño, respectivamente.

Xavier (2012) discutiu a adequação do uso das séries de armazenamento total de água derivadas da missão GRACE na modelagem hidrológica de grandes bacias. Os resultados obtidos mostraram que as séries obtidas dos dados da missão GRACE são capazes de representar as principais características do ciclo hidrológico nas escalas sazonal e interanual. Posteriormente, a adequação da integração dos dados da missão GRACE em modelos hidrológicos foi analisada por meio de um arcabouço simplificado aplicado à bacia do rio Negro. Os resultados obtidos permitiram a discussão das limitações do uso desses dados para fins de modelagem hidrológica e a proposição de um novo referencial de análise.

Getirana (2015) usou dados derivados da missão GRACE para detectar e quantificar uma grande seca estendida no leste do Brasil e fornecer estimativas de áreas impactadas e déficits de água específicos da região. Dois métodos estruturais de detecção de pontos de interrupção foram aplicados no tempo série de anomalias de armazenamento em águas terrestres (TWSA) baseadas em GRACE, determinando quando ocorreram duas mudanças bruscas. Um,



em particular, definiu o início da atual seca. Utilizando o TWSA, foi detectada uma taxa de perda de água de 26,1 cm ao longo do sudeste do Brasil de 2012 a 2015. Com base na análise dos resultados do Sistema Global de Assimilação de Dados Terrestres (GLDAS), a seca extrema está principalmente relacionada a taxas de precipitação abaixo do normal, resultando em alta depleção de umidade no solo e taxas de evapotranspiração abaixo do normal. Uma redução de 20% a 23% da precipitação em um período prolongado de 3 anos foi suficiente para elevar as sérias condições de escassez de água no país. As correlações entre as séries temporais mensais das medidas de armazenamento de água no solo e em TWSA baseadas em rede em 16 reservatórios localizados no sudeste do Brasil variaram de 0,42 a 0,82. As diferenças foram explicadas principalmente pelos tamanhos dos reservatórios e proximidade com o núcleo da seca.

Em 2016, Medeiros fundamentou seu estudo na avaliação do emprego de dados geodésicos para o monitoramento e na modelagem dos recursos hídricos da bacia Amazônica, a partir da hipótese de que os princípios da Geodésia permitem ampliar, em quantidade e em qualidade, o conjunto de informações observacionais hidrológicas disponíveis nessa importante região hidrográfica. O autor delimitou como principal objetivo, o levantamento de altitudes ortométricas do zero das estações fluviométricas da rede convencional e a obtenção de perfis de declividade da linha de água dos principais rios Amazônicos em uma escala inédita. Para isso, identificou-se que o emprego de dados de réguas e de perfis da linha de água definidos por receptores no Sistema de Navegação Global por Satélite (*Global Navigation Satellite System – GNSS*) que permitiu avaliar, de forma inovadora e rigorosa, a precisão de dados altimétricos dos satélites Jason-2, ENVISAT e ICESAT, com potencial e abrangente uso em estudos hidráulico-hidrológicos de monitoramento e de modelagem em diversas escalas espaço-temporais.

Sun et al. (2016), usaram campos de armazenamento terrestre de água (TWS), invertidos das medidas da missão GRACE, para avaliar e quantificar a seca em curso sobre a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Encontraram uma taxa de perda de água de 3,30 km<sup>3</sup>/ano no período de abril de 2002 a março de 2015. Além disso, o índice de seca da TWS (TWSDI) mostrou a extensão da seca recente que prejudica a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco desde janeiro de 2012 e que atingiu seu máximo em julho de 2015 (final da série temporal do TWS). Nesse sentido, parece haver uma ligação entre o TWSDI (umidade/seca) e a oscilação sul do El Niño (ENSO), em termos de leve ondulação da coerência, nas faixas semestrais e bienais, sugerindo uma relação entre os dois. Embora tenham reconhecido que é necessária mais investigação, acreditaram que as descobertas devem contribuir para as políticas de gerenciamento da água, quantificando o impacto desse evento de seca sobre a Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.

Em 2016, Scanlon et al. compararam a amplitude das anomalias de armazenamento total de água terrestre (TWSA) de abril de 2002 a março de 2015 de (1) mascons GRACE recém-lançados do *Center for Space Research* (CSR-M) com (2) mascons da NASA JPL (JPL-M) e com (3) CSR Tellus harmônicos esféricos em grade redimensionados (sf) (CSRT-GSH.sf) em 176 bacias hidrográficas, 60% da área terrestre global. Tempo séries em mascons TWSA (CSR-M e JPL-M) e harmônicas esféricas são altamente correlacionadas (correlação de classificação coeficientes principalmente > 0,9). O sinal de tendências de longo prazo (até 620 mm / ano) é muito menor que o de amplitudes sazonais (até 250 mm). As tendências líquidas de longo prazo, somadas em todas as 176 bacias, são semelhantes para RSE e JPL mascons (66–69 km<sup>3</sup>/ano), mas são mais baixos para harmônicos esféricos (14 km<sup>3</sup>/ano). Os declínios do TWSA a longo prazo são encontrados principalmente em bacias irrigadas (241 a 269 km<sup>3</sup>/ano). Amplitudes sazonais concordam entre as soluções GRACE, aumentando a confiança nas flutuações sazonais baseadas no GRACE. O redimensionamento de harmônicos esféricos aumenta significativamente a concordância com os mascons para flutuações sazonais, mas menos para tendências de longo prazo.

Conforme Scanlon et al.(2016), as soluções mascons fornecem vantagens em relação aos harmônicos esféricos, incluindo (1) vazamento reduzido da terra para o oceano, aumentando a amplitude do sinal e (2) aplicação de restrições de dados geofísicos durante o processamento com poucos requisitos empíricos de pós-processamento, facilitando para usuários não-geodésicos. Os resultados da intercomparação deste produto devem permitir aos hidrologistas selecionar melhor as soluções GRACE adequadas para aplicações hidrológicas.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 ABORDAGEM METODOLÓGICA

No desenvolvimento desta pesquisa utilizou-se a proposta metodológica de Libault (1971) que distingue os quatro níveis de pesquisa, denominando-os de compilatório, correlatório, semântico e normativo.

De acordo com a proposta, no nível compilatório realizou-se a coleta de dados e das informações de diferentes naturezas para construção do referencial teórico e metodológico da pesquisa. Nesta etapa definiu-se a área de estudo, o período de análise e os materiais a serem utilizados. Área definida para o estudo foi a Bacia do Rio Uruguai (parte Nacional), utilizando dados de gravimetria da missão GRACE e das séries históricas de estiagem da Defesa Civil (S2iD) para um período de 12 anos, entre os anos de 2003 e 2015.

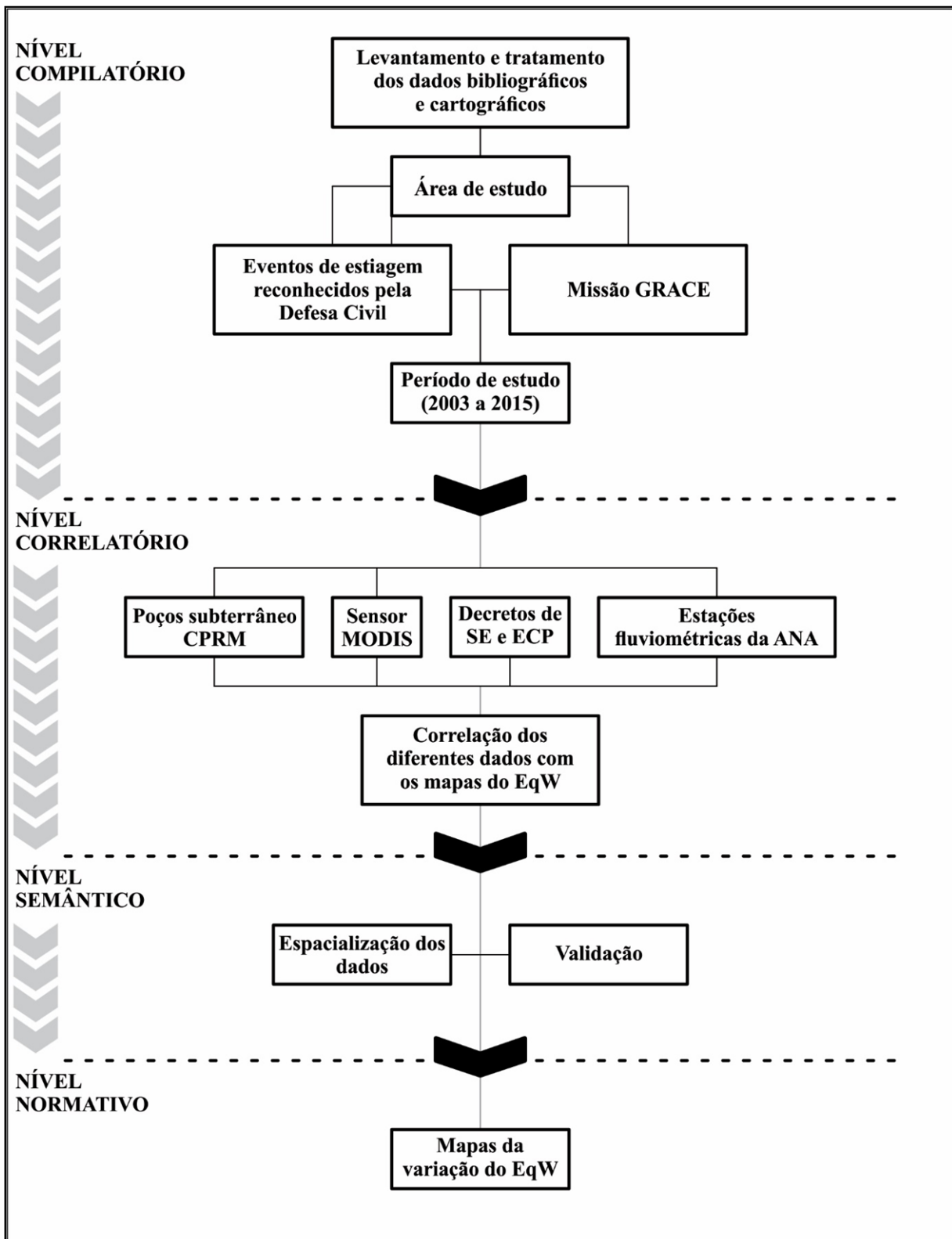
A caracterização da bacia do Uruguai, bem como o conhecimento das metodologias aplicadas por diferentes autores na correlação de dados gravimétricos obtidos da missão GRACE com equivalentes de nível de água, foi importante para a construção dos procedimentos metodológicos que serão aplicados nesta tese.

No segundo nível, o correlatório, conforme o próprio nome indica, é a fase de correlacionar os dados e posteriormente estabelecer a interpretação dos mesmos. Nesta etapa foram avaliados os dados obtidos da missão GRACE com relação a variação do campo gravimétrico da Bacia e comparados com dados das estações fluviométricas da ANA, da Defesa Civil, dados do sensor MODIS e dados dos poços subterrâneos da CPRM. Nesta etapa foram estabelecidas relações de equivalente de nível de água para o período proposto.

No nível semântico, foram realizadas as espacializações dos dados obtidos procurando representar e dar significados as correlações obtidas no nível de pesquisa anterior. No último nível, o normativo, foi elaborado o produto final da pesquisa como um modelo representado, por meio de um mapa que traduz, de maneira simplificada, o resultado final.

As etapas metodológicas desenvolvidas durante a pesquisa estão representadas no fluxograma (Figura 37) e detalhadas nos próximos itens.

Figura 37 - Fluxograma com a síntese das etapas da pesquisa.



Fonte: Adaptado de LIBAULT (1971), organizado por MORAES, 2019.

## 4.2 DELIMITAÇÃO DA ÁREA E DO PERÍODO DA PESQUISA

Vários estudos foram feitos na Bacia Amazônica (MEDEIROS, 2016; XAVIER, 2012; CHEN et al., 2009b; ALMEIDA FILHO, 2009; SYED et al., 2005;) utilizando a missão GRACE, porém houve uma discrepância entre as observações da missão GRACE e as estimativas do modelo hidrológico GLDAS, pois a reserva de águas superficiais e subterrâneas, que estão ausentes das estimativas do modelo hidrológico, o que contribuem com as mudanças de TWS.

A Bacia do Uruguai possui domínios hidrogeológicos diferentes da Amazônica, e devido a esse fator, espera-se encontrar resultados divergentes dos já apresentados em estudos anteriores que utilizaram a missão GRACE.

Além de diferentes domínios hidrogeológicos, contribuiu para a escolha da Bacia do Rio Uruguai, a área da mesma, pois a missão GRACE necessita aproximadamente de 200.000 km<sup>2</sup> para estimar variações do nível d'água com precisão de alguns milímetros, e a bacia possui 174.500 km<sup>2</sup>. Da mesma forma, na bacia há disponibilidade de um grande número de estações fluviométricas da ANA com longas e completas séries históricas de cota d'água, dados in-situ e também por ser uma bacia que tem sido estudada com relação aos processos de inundação e estiagem, ao seu comportamento hidráulico devido ao seu potencial hidrelétrico e, principalmente, economia das grandes áreas de cultivo.

A época da definição desta pesquisa, o período de 12 anos, de 2003 a 2015, foi escolhido devido as ocorrências de estiagens na Bacia do Rio Uruguai e que coincidem com a missão GRACE.

## 4.3 SERVIÇO GEOLÓGICO BRASILEIRO

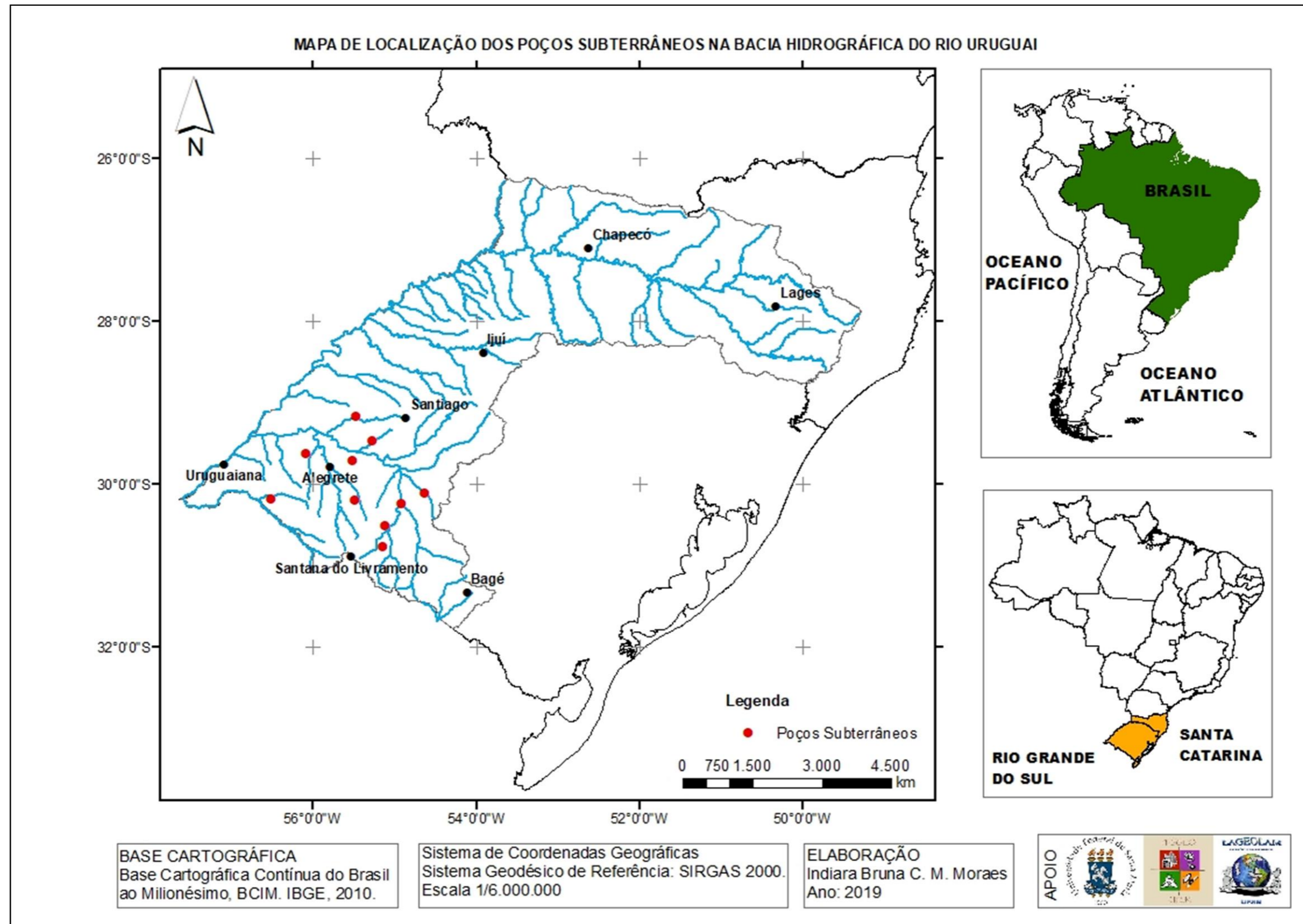
O Serviço Geológico do Brasil – CPRM/SGB é empresa pública vinculada ao Ministério de Minas e Energia, atuando em diversas áreas das geociências. De acordo com suas atribuições estabelecidas na Lei nº 8.970 de 28/12/1994, ele atua planejando, coordenando e operando a rede integrada de monitoramento das águas subterrâneas.

Desde 2009 a CPRM está implantando em todo o território brasileiro a Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMA), com o objetivo de ampliar o conhecimento hidrogeológico dos principais aquíferos brasileiros e monitorar as alterações espaciais e temporais na quantidade e qualidade das águas subterrâneas, afim de fornecer dados básicos como subsídio à gestão integrada dos recursos hídricos. Para tanto estão sendo construídos

poços de monitoramento em vários aquíferos brasileiros. No caso da bacia do Rio Uruguai, o aquífero Guarani foi selecionado como primordial ao monitoramento, que proporciona a identificação de impactos às águas subterrâneas em decorrência da exploração ou das formas de uso e ocupação dos terrenos, a estimativa da disponibilidade do recurso hídrico subterrâneo, dentre outras informações.

A CPRM construiu, nas áreas de recarga do sistema Aquífero Guarani (SAG), onze poços de 4 polegadas dedicados ao monitoramento de níveis (Figura 38). A partir dos dados obtidos com o monitoramento ao longo dos anos muitos estudos serão possíveis, como, por exemplo, verificar a flutuação dos níveis nas áreas de recarga de acordo com as variações pluviométricas, relações com os cursos d'água superficiais, mudanças na qualidade das águas, etc.

Figura 38 - Mapa de localização dos poços subterrâneos na Bacia do Rio Uruguai.



Com o objetivo de validar os dados da missão GRACE buscou-se comparar os dados do monitoramento do nível d'água dos poços em aquíferos livres localizados na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai no período analisado nesta pesquisa. O Quadro 9 apresentado contém os no sistema Aquífero Guarani (SAG) – região sul (CPRM, 2012). Os dados dos poços subterrâneos estão disponíveis no site <http://rimasweb.cprm.gov.br>.

Quadro 9 - Principais características dos poços de monitoramento no aquífero Guarani.

UF	Poço	Cota do terreno	Localização	Município	Situação	Natureza
RS	4300020119	107,06	Puita	Itaqui	Poço RIMAS equipado com medidor automático de nível	Poço de monitoramento
RS	4300020120	145,69	Três Capões	Alegrete	Poço RIMAS equipado com medidor automático de nível	Poço de monitoramento
RS	4300020121	162,34	São Carlos	Rosário do sul	Poço RIMAS equipado com medidor automático de nível	Poço de monitoramento
RS	4300020122	187,31	Cerro Jarau	Quarai	Poço RIMAS equipado com medidor automático de nível	Poço de monitoramento
RS	4300020123	193,22	Estância Santa Rita	Santana do Livramento	Poço RIMAS equipado com medidor automático de nível	Poço de monitoramento
RS	4300020124	161,19	Miracatu	São Francisco de Assis	Poço RIMAS equipado com medidor automático de nível	Poço de monitoramento
RS	4300020125	109,43	Azevedo Sodre	Rosário do Sul	Poço RIMAS equipado com medidor automático de nível	Poço de monitoramento
RS	4300020126	186,76	Assentamento Torrão	Santana do Livramento	Poço RIMAS equipado com medidor	Poço de monitoramento

(continua)



					automático de nível	
RS	4300020532	162,34	ETA Centro	Rosário do Sul	Poço RIMAS equipado com medidor automático de nível	Poço de monitoramento
RS	4300020534	117,1	Escola Agrícola Federal	Alegrete	Poço RIMAS equipado com medidor automático de nível	Poço de monitoramento

(conclusão)

Fonte: Adaptado de CPRM (2012), por MORAES, 2019.

Nesta pesquisa, foram comparadas as séries temporais da missão GRACE com os poços. Foi aplicada a média ponderada considerando todos os poços da região, com base na área de influência de cada poço determinado pelos polígonos de Thiessen. Foram construídos gráficos de variação do nível d'água dos poços e suas respectivas áreas de influências.

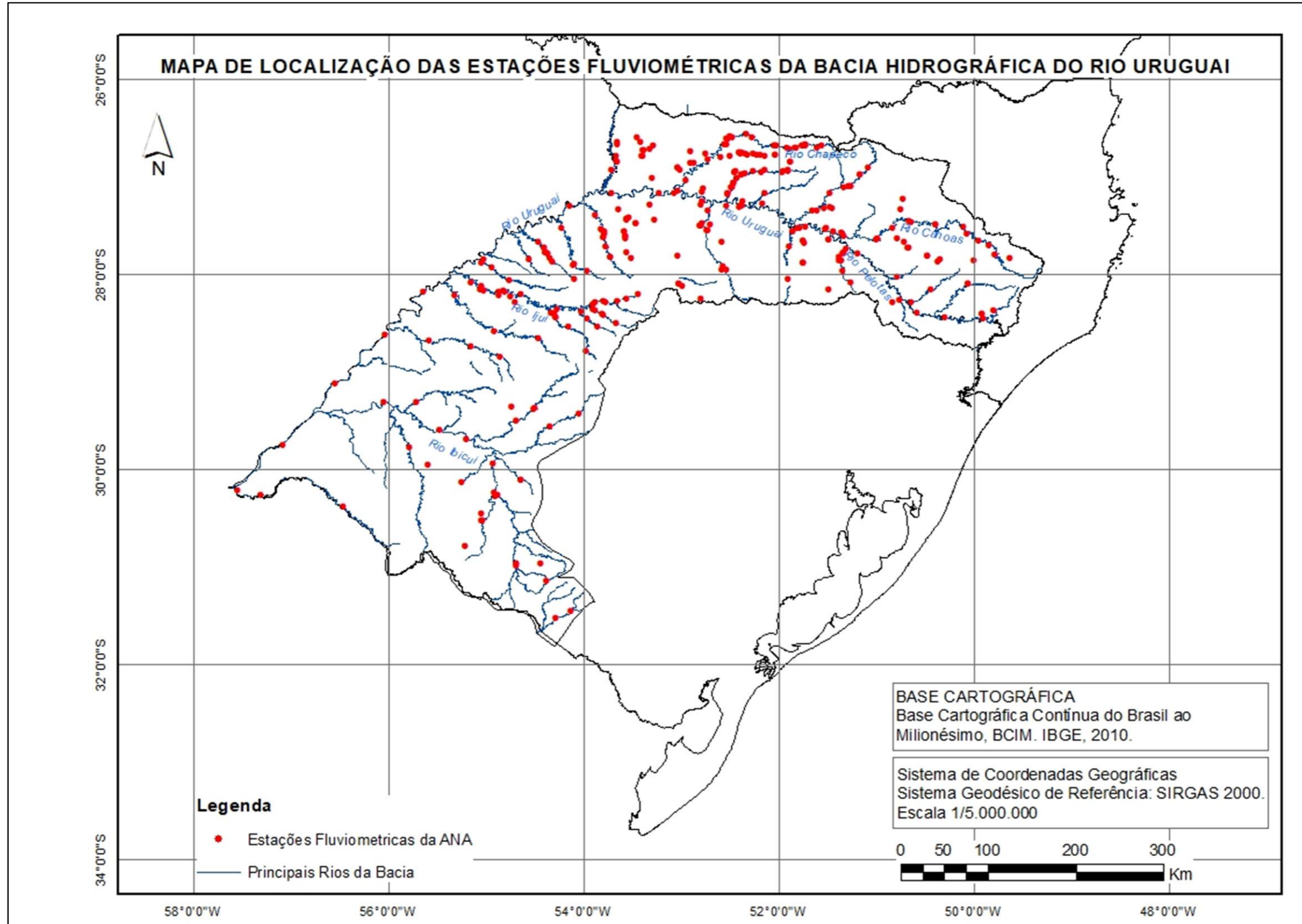
#### 4.4 ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS

A Agência Nacional de Águas (ANA) foi criada em julho de 2000 pelo decreto de Lei n. 9.984 (2000) e está ligada ao Ministério do Meio Ambiente. A ANA tem como missão implementar e coordenar a gestão compartilhada e integrada dos recursos hídricos e regular o acesso a água, promovendo seu uso sustentável em benefício das atuais e futuras gerações. A agência é responsável por disciplinar a implementação, a operacionalização, o controle e a avaliação dos instrumentos de gestão criados pela Política Nacional de Recursos Hídricos. Dessa forma, seu espectro de regulação ultrapassa os limites das bacias hidrográficas com rios de domínio da União, pois alcança aspectos institucionais relacionados à regulação dos recursos hídricos no âmbito nacional (ANA, 2017). Cabe à ANA o monitoramento hidrometeorológico no Brasil operando as cerca de 4.543 estações de monitoramento das 14.822 existentes em todo o país. Com essas estações, é possível mensurar o volume de chuvas, a evaporação da água, o nível e a vazão dos rios, a quantidade de sedimentos e a qualidade das águas em estações respectivamente relacionadas: pluviométricas, evaporimétricas, fluviométricas, sedimentométricas e de qualidade da água. As informações oriundas desse monitoramento

encontram-se disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas - HidroWeb e no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos - SNIRH.

Na bacia do Rio Uruguai, há 651 estações fluviométricas, onde 319 estações estão sob a responsabilidade da ANA (Figura 39). Os dados de todas as estações estão disponíveis em <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>.

Figura 39 - Mapa de localização das estações fluviométricas da Bacia do Rio Uruguai.



Fonte: MORAES, 2019.

As estações fluviométricas operadas pela ANA são construídas na margem dos rios e são equipadas com réguas limnimétricas para a medição do nível d'água e com Referências de Nível (RN) (ALMEIDA FILHO, 2009). A Figura 40 mostra exemplo de seções de réguas instaladas segundo os padrões mencionados acima. No caso das estações limnimétricas localizadas em barragens, a preferência é para que as réguas sejam construídas ou fixadas diretamente na estrutura da barragem (ANA, 2011).

Figura 40 - Réguas limnimétricas.



Fonte: ANA, 2011.

A CPRM instala, opera e dá manutenção à rede básica nacional da ANA, nela incluídas redes telemétricas para inventário e previsão de cheias, redes de monitoramento da qualidade das águas e de sedimentometria e estações convencionais fluviométricas, pluviométricas e climatológicas. Os dados coletados a cada mês são remetidos para o Sistema de Informações Hidrológicas da ANA, para serem disponibilizados ao usuário final (<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Apresentacao/Rede-Hidrometeorologica-Nacional---RHN-304.html>).

Nesta pesquisa, primeiramente, foram selecionadas as estações fluviométricas nos mesmos municípios que possuem monitoramento dos poços de águas subterrâneas. Calculou-

se as médias mensais sobre as informações de cotas d'água obtidas das leituras das réguas, pois a resolução temporal da missão GRACE é mensal. A partir das medias calculadas, comparou o comportamento dos níveis d'água com o EqW e os níveis dos poços subterrâneos.

#### 4.5 DECRETOS DE SITUAÇÃO DE EMERGÊNCIA E ESTADO DE CALAMIDADE PÚBLICA

Os registros de estiagens foram obtidos a partir de decretos de SE (Situação de Emergência) e ECP (Estado de Calamidade Pública) no site do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD), onde foram filtrados os eventos de estiagens dos estados do RS e SC, nos municípios que compõem a Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai durante o período de estudo.

Os dados foram divididos em números de municípios atingidos por ano e número de eventos por ano, pois há municípios com registro de mais de um evento por ano. Foram verificados o nº do decreto, a data do decreto, nº da portaria, a data da portaria, nº do DOU (Diário Oficial da União) e data de publicação no DOU. Posteriormente, foi feita uma tabela usando o *software* Microsoft Excel® onde os eventos foram separados por ano, além de gráfico com números.

#### 4.6 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NORMALIZADO

Nesta pesquisa, usa-se o EVI obtido a partir do sensor MODIS no período do estudo para correlacionar com o EqW obtido pelas soluções mascons da missão GRACE.

Os dados MODIS para a região de estudo foram adquiridos no site <https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appears/>, onde selecionou-se o EVI do satélite TERRA com resolução espacial de 1 km (MOD13A3).

O período de estudo foi dividido em grupo de meses, onde todos os meses de janeiro foram agrupados em uma pasta (DOY) e analisados entre si. O mesmo aconteceu com os demais meses.

O SVI foi calculado a partir da Equação 11, com o auxílio do software R 3.6.0, onde o código está disponível em <http://www.un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practicedrought-monitoring-svi/step-by-step/R>, e também no Anexo B.

$$SVI = \frac{EVI - EVI_{m\u00e9dio}}{EVI_{\sigma}} \quad (11)$$

Onde:

$SVI$  = \u00cdndice de Vegeta\u00e7\u00e3o Normalizado;

$EVI$  = \u00cdndice de Vegeta\u00e7\u00e3o Melhorado;

$EVI_{m\u00e9dio}$  = M\u00e9dia dos valores de  $EVI$ ;

$EVI_{\sigma}$  = Desvio padr\u00e3o do  $EVI$ .

O  $SVI$  (*Standardized Vegetation Index* – \u00cdndice de Vegeta\u00e7\u00e3o Normalizado) varia de 4 a -4, onde 4 corresponde ao maior vigor da vegeta\u00e7\u00e3o (*greenness*) e -4 com um menor vigor. Foram gerados 156 mapas do  $SVI$  que posteriormente foram comparados com os mapas do EqW.

#### 4.7 SOLU\u00c7\u00d5ES MASCONS CSR GRACE RL05

Nesta pesquisa foram utilizadas as solu\u00e7\u00f5es mascons CSR GRACE RL05, com resolu\u00e7\u00e3o espacial 0,5\u00b0, adquiridas gratuitamente atrav\u00e9s do Centro de Pesquisas Espaciais da Universidade do Texas ( *CSR – Center for Space Research*) no site <http://www.csr.utexas.edu/grace/>, no formato NetCDF (*Network Common Data Form*). Estas solu\u00e7\u00f5es foram processadas no *software* MATLAB\u2122, usando o c\u00f3digo (FERREIRA, 2017) que se encontra no ANEXO A, obtendo o equivalente \u00e0 altura d\u2019\u00e1gua em cm.

Os EqW foram gerados a n\u00edvel global e posteriormente, recortou-se somente na \u00e1rea da Bacia Hidrogr\u00e1fica do Rio Uruguai, gerando em sua totalidade, 141 mapas mensais do EqW da bacia, pois foram retirados da an\u00e1lise, os meses que n\u00e3o houveram dados da miss\u00e3o GRACE para o per\u00edodo estudado. O equivalente \u00e0 altura d\u2019\u00e1gua que foi calculado para a \u00e1rea de estudo \u00e9 composta por 58 pixels das solu\u00e7\u00f5es *mascons*.

Os pixels foram reamostrados no *software* ArcGIS\u2122 10.5 de 0,5\u00b0 para 0,0083333333\u00b0, a partir do m\u00e9todo *Nearest* que al\u00e9m de ser o mais r\u00e1pido para a reamostragem, minimiza as altera\u00e7\u00f5es nos valores dos pixels, onde nenhum novo valor de EqW \u00e9 criado, mantendo os valores originais, totalizando 656.696 pixels. Os pixels foram reamostrados para o valor de 0,0083333333\u00b0, pois o mesmo \u00e9 utilizado no MODIS e, tamb\u00e9m, o que melhor se adequa ao limite da bacia. Esta reamostragem foi realizada para uma melhor representa\u00e7\u00e3o na linha lim\u00edtrofe da bacia.

Os valores do EqW foram normalizados utilizando a equação:

$$EqW_{Normalizado} = \frac{(EqW - EqW_{m\u00e9dio})}{EqW_{\sigma}} \quad (12)$$

Onde:

$EqW$  = \u00e9 a imagem com os valores do EqW gerada com resolu\u00e7\u00e3o temporal de 30 dias;

$EqW_{m\u00e9dio}$  = M\u00e9dia dos valores do EqW na imagem;

$EqW_{\sigma}$  = Desvio padr\u00e3o do EqW para a imagem em quest\u00e3o.

Ap\u00f3s a normaliza\u00e7\u00e3o dos valores de EqW, foi realizado correla\u00e7\u00f5es entre os valores de EqW e SVI para determinar os coeficientes de determina\u00e7\u00e3o.





## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O processamento das soluções mascons foram realizadas para os 156 meses, entre os anos 2003 a 2015 gerando dados estatísticos contendo os valores máximos, mínimos, média aritmética e desvio padrão de equivalente à altura d'água em cm, contemplados no apêndice A.

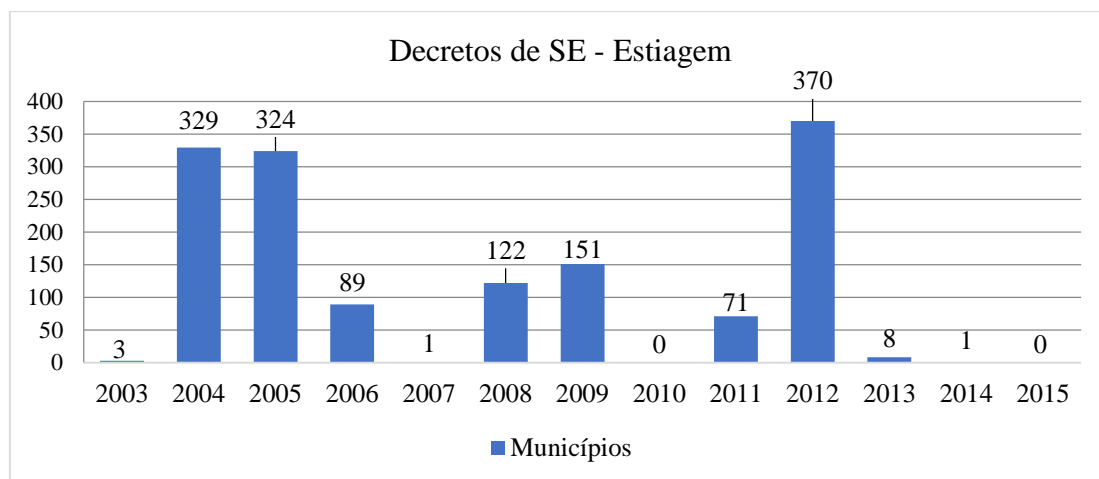
O subitem 5.1 mostra os eventos de estiagens reconhecido pela Defesa Civil e os compara com a dinâmica do EqW na bacia. No item 5.2, são apresentadas as análises confrontando os dados dos poços subterrâneos da CPRM com o valor médio do EqW para o ano de 2012. O subitem 5.3 apresenta compara os EqW da bacia Hidrográfica do Rio Uruguai com os índices de vegetação da mesma.

### 5.1 EVENTOS DE ESTIAGENS RECONHECIDOS PELA DEFESA CIVIL

Conforme os dados da Defesa Civil, há registros de estiagens (SE) nos anos de 2003 a 2009 e de 2011 a 2014. O maior número de decretos corresponde aos anos de 2012 em primeiro lugar, seguido dos anos de 2004-2005 e em menor número nos anos de 2008-2009. O ano de 2006 parece fazer parte do evento de estiagem que ocorreu nos anos de 2004-2005, tendo havido somente uma demora nos decretos de SE, pois os decretos de SE dependem de questões políticas, econômicas e sociais.

Pode-se observar no Gráfico 1, o quantitativo de decretos de SE - estiagem na bacia ao longo do período entre 2003 a 2015.

Gráfico 1 - Número de decretos de SE entre o período de 2003 a 2015.



Segundo estes dados, em 2003, 3 municípios: Vargem, Palma Sola e Piratuba em Santa Catarina, na Bacia do Alto Uruguai decretaram situação de emergência (SE) ou estado de calamidade pública (ECP) devido aos eventos de estiagem.

Em 2004, 329 municípios decretaram SE ou ECP devido aos eventos de estiagens na região. Porém neste mesmo ano, alguns municípios decretaram SE ou ECP mais de uma vez, totalizando 359 registros de SE ou ECP. Podemos observar o município de Machadinho/RS que decretou SE em 18/06/2004 e 30/12/2004. No mês de janeiro, 6 municípios decretaram SE. Em fevereiro, o número de municípios aumentou para 32. Em março foram 82 decretos de SE devido à estiagem. No mês de abril foram 6 decretos. Em junho houve 202 decretos de SE. Os meses de setembro e outubro tiveram 1 decreto cada um. E em dezembro, houve 29 decretos.

Em 2005, 324 municípios decretaram SE ou ECP devido aos eventos de estiagens na região. Houve também mais de um decreto por município totalizando 328 registros de SE ou ECP, como é o caso do município de Correia Pinto/SC, que decretou SE em 09/03/2005 e 23/05/2005. O mês de fevereiro teve 166 decretos de SE por causa da estiagem, seguido pelos meses de janeiro com 121 decretos, março com 30 decretos, maio com 2 decretos e abril com 1.

Em 2006, 87 municípios decretaram SE ou ECP devido aos eventos de estiagens na região. No entanto, há municípios com mais de um decreto totalizando 89 registros de SE ou ECP, como é o caso do município de Quilombo/SC, que decretou SE em 23/05/2006 e 19/12/2006. Neste ano, ocorreu o decreto que continha quase que a totalidade dos municípios que tinham solicitado a SE ou ECP, entretanto, todos saíram com a mesma data (23/05/2006), dificultando a identificação do período que ocorreu o evento de estiagem. Os demais decretos foram entre os meses de janeiro a março. Os meses de junho e dezembro contém um AVADAN (Avaliação de Danos) cada um.

Em 2007, apenas o município de Bagé/RS decretou SE em 29/01/09, que dá a entender que o evento começou em 2006.

Em 2008, 112 municípios pertencentes a bacia, decretaram SE ou ECP devido aos eventos de estiagens. Porém, a totalidade de 152 decretos, justificado por mais de um evento por município, como é o caso de Boa Vista das Missões/RS que decretou SE em 29/02/2008 e 12/12/2008. O mês de fevereiro registrou 45 decretos, o maior número do ano, seguido por dezembro com 41 decretos, abril com 32, março com 30, maio com 2 e janeiro com apenas 1 decreto de SE.

Em 2009, 151 municípios que compõem a bacia decretaram SE ou ECP por causa dos eventos de estiagens. Entretanto, a totalidade de eventos reconhecidos na bacia é de 153,

ocasionado por mais de um decreto por município. No caso 2 municípios: Planalto Alegre/SC com decretos em 05/01/2009 e 03/04/2009, e Xaxim com decretos em 02/01/2009 e 22/05/2009. Os meses de abril e maio concentraram a maioria dos decretos, sendo 92 e 40 respectivamente. No ano de 2010, não houve decreto de SE ou ECP para estiagem.

No ano de 2011, teve-se 72 registros de SE ou ECP em 71 municípios. O município que teve mais de um evento reconhecido foram: Guaraciaba/SC com AVADAN em 21/03/2011 e 23/12/2011. A maioria dos decretos, 61, ocorreram no mês de dezembro, sendo o restante distribuídos entre os meses de janeiro, fevereiro, março e novembro.

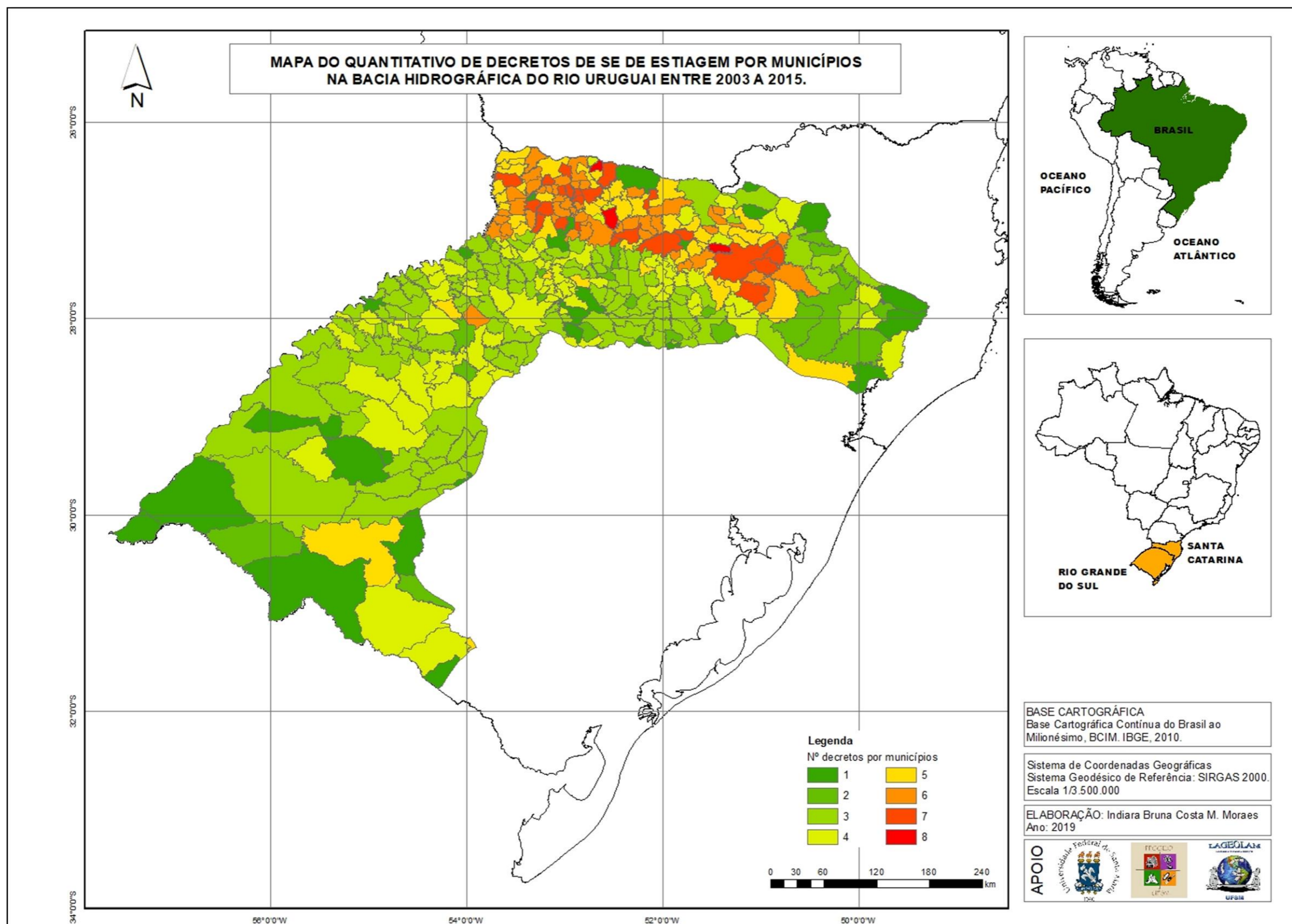
Em 2012, houve 370 registros de SE e ECP em 339 municípios e 370 decretos. Há, novamente, município com mais de um decreto como o município de Anita Garibaldi/SC com decretos de SE em 25/04/2012 e 10/12/2012. O mês de janeiro registrou o maior número de decretos, com 238, seguido pelos meses de fevereiro, com 65 decretos e março com 19 decretos. Apenas entre o período de junho a agosto, não houve registro de decretos de estiagem na bacia.

No ano de 2013, 8 municípios entraram em SE ocasionado pela estiagem, sendo a maior parte entre os meses de janeiro e fevereiro. Em 2014, somente o município de Nicolau Vergueiro/RS entrou em SE provocado pela estiagem. No ano de 2015, não houve eventos de estiagem registrado na Defesa Civil na bacia do Rio Uruguai.

Os municípios que mais decretaram situação de emergência devido aos eventos de estiagem foram: Erval Velho/SC, Galvão/SC e Xaxim/SC, com 8 decretos, seguidos pelos municípios: Água de Chapecó/SC, Anita Garibaldi/SC, Brunópolis/SC, Caibi/SC, Campos Novos/SC, Quilombo/SC, entre outros, com 7 decretos de SE.

A Figura 41 apresenta o quantitativo de decretos por município no período do estudo.

Figura 41 - Mapa do quantitativo de eventos de estiagem por municípios.



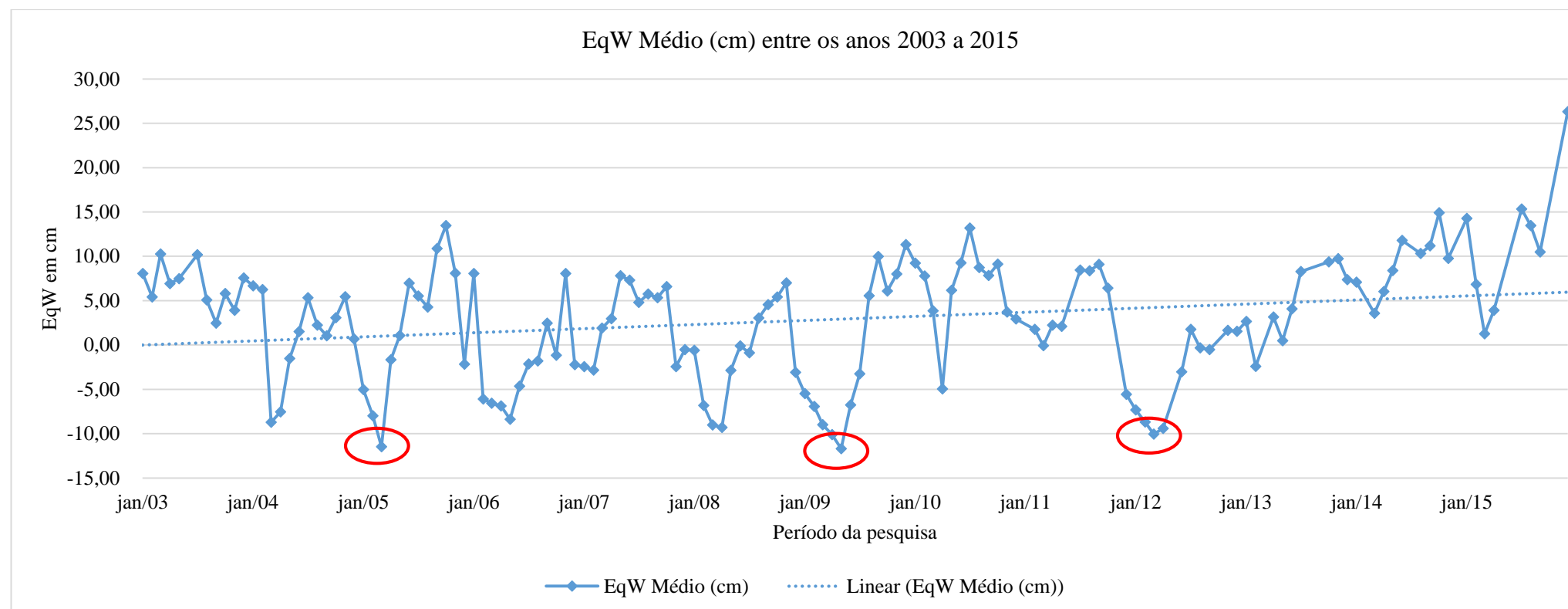
Fonte: MORAES, 2019.

## 5.2 VARIAÇÃO DO EQW (EQUIVALENTE DO NÍVEL D'ÁGUA) CALCULADO PARA O PERÍODO

O Gráfico 2 apresenta todos os meses da série temporal (2003-2015) considerando a média de EqW, em cm, dos pixels da Bacia do Rio Uruguai. Os Gráficos (3, 4 e 5) apresentam a variação do EqW na Bacia ao longo de 5 anos, buscando uma melhor visualização das séries.

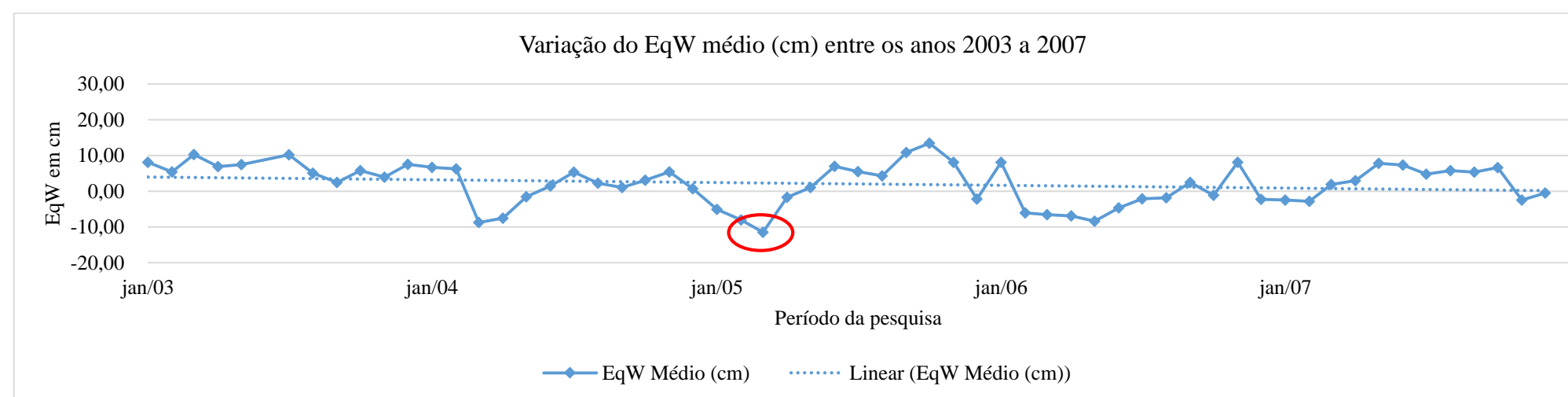
O Gráfico 2 mostra que, de forma geral, há uma tendência de aumento do EqW na bacia, no período analisado. Da mesma maneira, percebe-se que há três períodos bastante críticos onde o EqW atinge valores mínimos que são: -11,47 cm em março/05, -11,46 cm em maio/09 e -10,04 cm em mar/12.

Gráfico 2 - Variação de EqW em cm durante o período de estudo.?



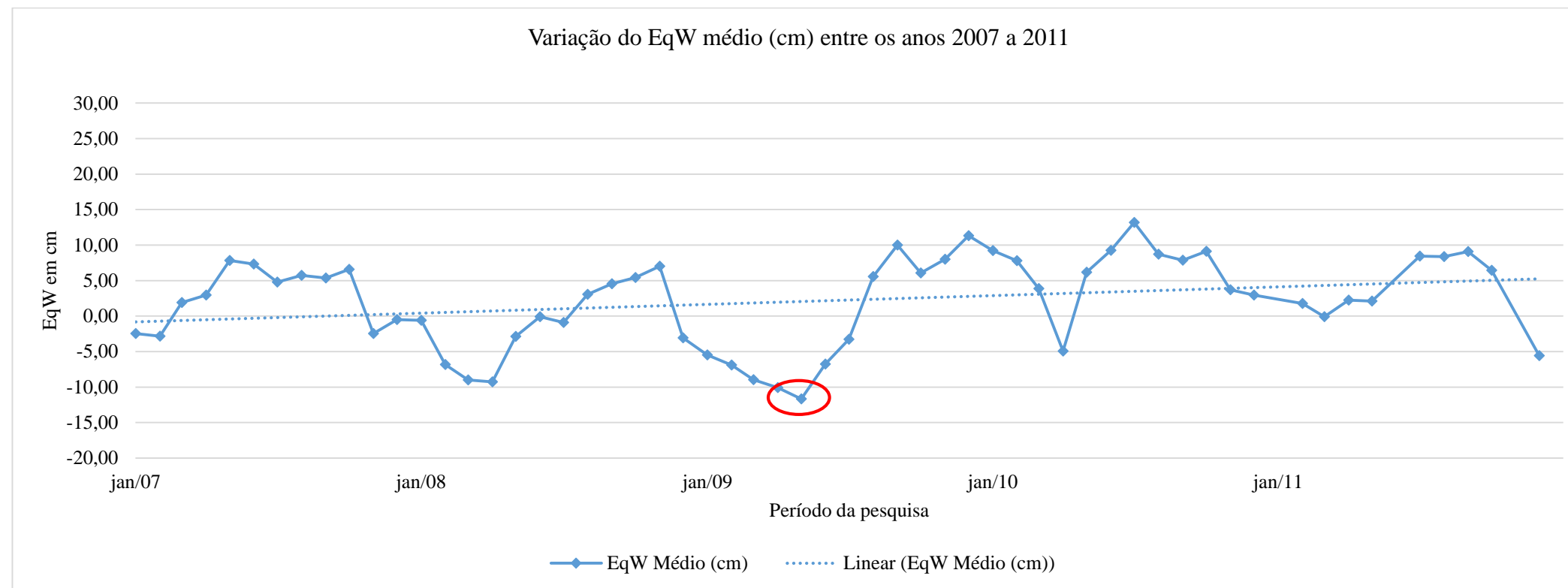
Fonte: MORAES, 2019.

Gráfico 3 - Variação de EqW em cm entre os anos 2003 a 2007.



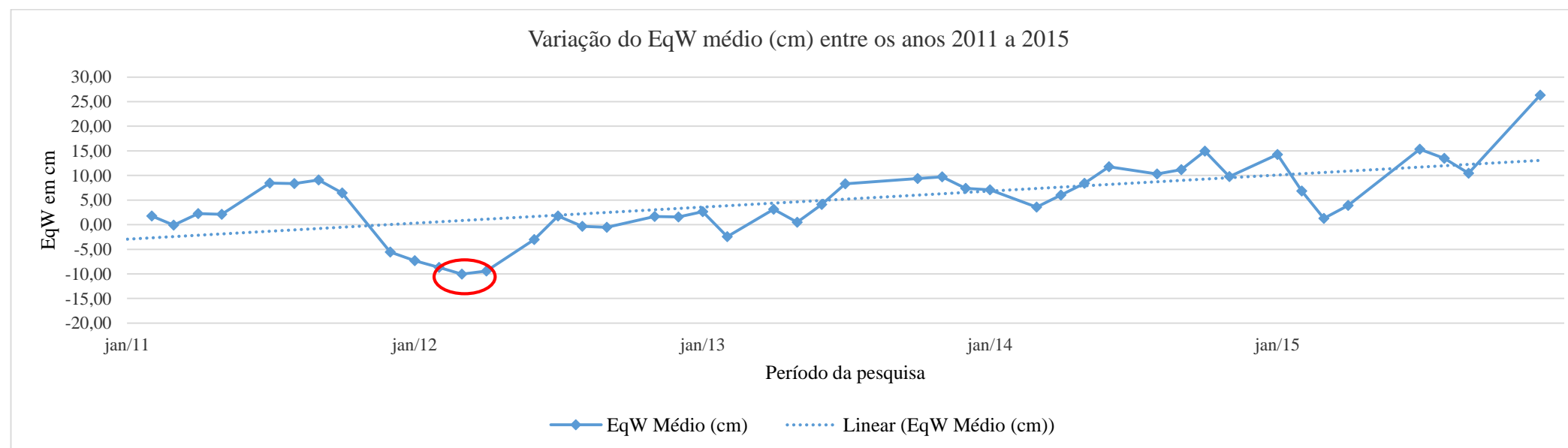
Fonte: MORAES, 2019.

Gráfico 4 - Variação de EqW em cm entre os anos 2007 a 2011.



Fonte: MORAES, 2019.

Gráfico 5 - Variação de EqW em cm entre os anos 2011 a 2015.



Fonte: MORAES, 2019.

Como pode se observar no Gráfico 3, há uma queda acentuada no nível do EqW a partir do mês de julho de 2003, chegando ao nível mais baixo do ano no mês de setembro, com EqW de 2,47 cm. Há uma breve recuperação nos meses seguintes, mas voltando a cair em dezembro de 2003 (7,56 cm), chegando ao nível mais baixo em março de 2004 (-8,72 cm).

A partir de março de 2004 há uma recuperação no EqW, chegando a julho de 2004 com 5,34 cm, sendo este valor quase metade do valor do EqW (10,18 cm) no mesmo mês do ano anterior. Nos meses seguintes, o EqW continua diminuindo chegando a 1,04 cm no mês de setembro. Há uma breve recuperação até o mês de novembro de 2004, atingindo a cota de 5,44 cm, porém começa a decair novamente nos meses seguintes, alcançando o menor valor EqW entre os anos de 2003 a 2007, com cota de -11,47cm em março de 2005. Há uma recuperação nos meses seguintes, alcançando o ápice em outubro de 2005, com cota de 13,46 cm. Todavia, o EqW volta a decair nos meses subsequentes, chegando ao nível de -8,36 cm em maio de 2006. A datar de junho de 2006, o EqW começa a se recuperar, chegando ao nível de 6,59 cm em outubro de 2007, onde posteriormente, volta a diminuir.

Analisando a movimentação do EqW durante o período de 2003 a 2007, observa-se que houve uma época de estiagem a partir de julho de 2003, com o auge no mês de março de 2005. O EqW volta a se normalizar a partir do mês de setembro de 2006.

Observando o Gráfico 4, o EqW se mantém positivo do mês de março de 2007 até outubro do mesmo ano, começando a diminuir a datar de novembro de 2007 até abril de 2008, alcançando a cota de -9,28 cm. O EqW começa a se recuperar maio de 2008, alcançando o nível de -0,89 cm de julho de 2008. Quando se compara com o mesmo período no ano anterior, existe uma discrepância de 3,91cm, demonstrando que houve uma estiagem durante esse período. Ocorre uma recuperação no nível do EqW com início em agosto de 2008, durando até o mês de novembro de 2008, chegando a 7,01cm. Do mês de dezembro em diante, há uma redução brusca no nível do EqW, onde no mês de maio de 2009, o EqW atinge sua menor cota (-11,68 cm) entre os anos de 2007 e 2011. Apenas em agosto de 2009, o valor do EqW volta a ser positivo novamente, onde se mantém até março de 2010. Em abril de 2010, ocorre uma queda brusca no EqW, atingindo -4,94 cm, mas retorna a crescer no mês posterior. Em julho de 2010, o EqW atinge o valor mais alto entre 2007 e 2010, com cota de 13,18 cm, voltando a decair no mês seguinte, porém, se mantendo com cota positiva até o mês de outubro de 2011, com 6,43 cm.

Com a variação do EqW durante o período de 2007 a 2011, nota-se que há uma estiagem entre outubro de 2007 a abril de 2008, retornando a partir de dezembro de 2008 a maio de 2009.

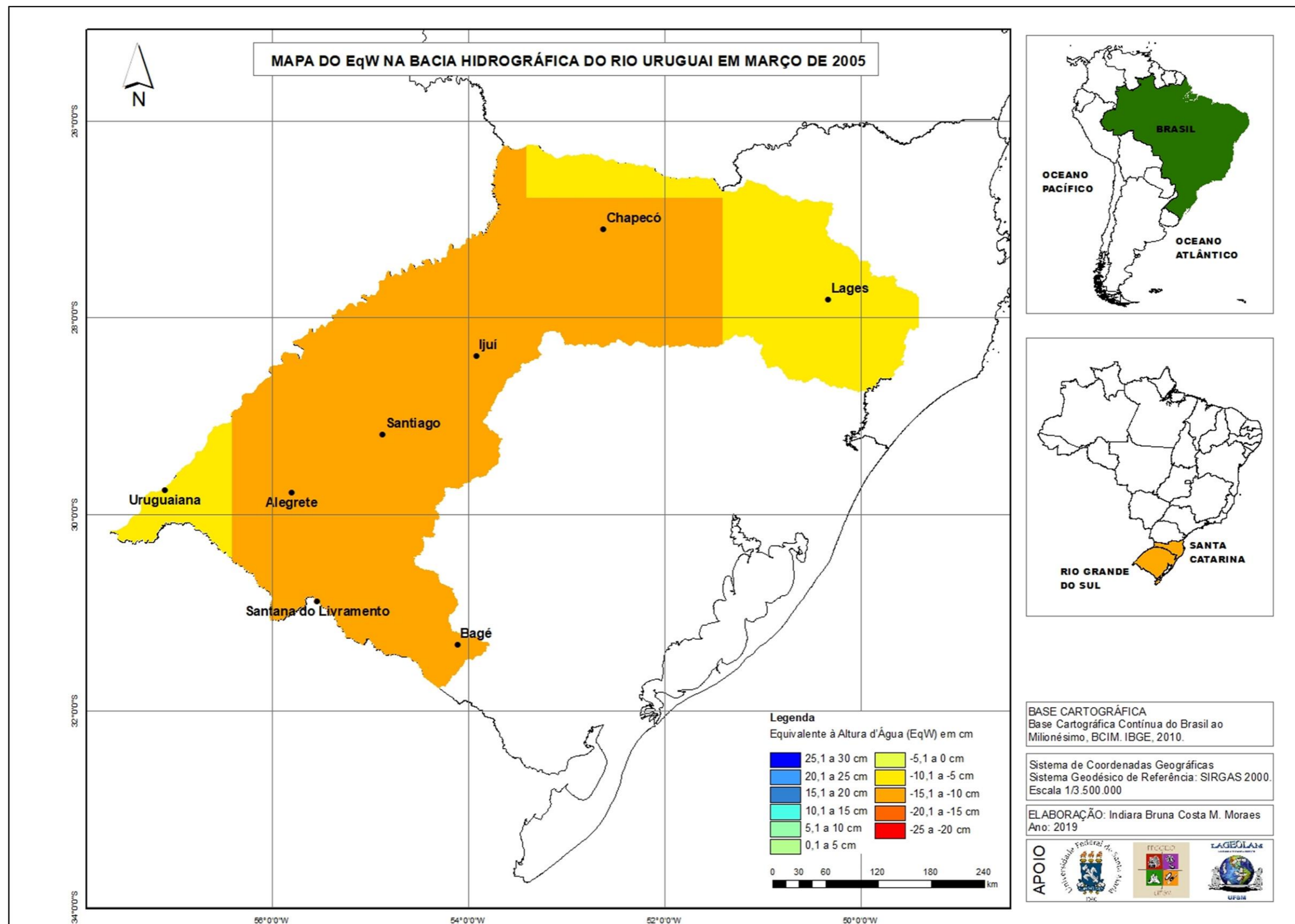
Nota-se no Gráfico 5, que o EqW se mantém positivo até o mês de outubro de 2011, porém em setembro de 2011, o EqW começa a decair, atingindo em março de 2012 a cota de -



10,04 cm. Em abril de 2012, o EqW começa a se recuperar lentamente, atingindo 1,77 cm em julho de 2012 e se mantém positiva até janeiro de 2013 com 2,65 cm. Em fevereiro de 2013, há uma queda no EqW, atingindo -2,41 cm. O EqW tem uma leve recuperação no mês de abril, alcançando uma cota de 3,15 cm, todavia, voltando a cair em maio. Em junho de 2013, o EqW se recupera com cota de 4,09 cm, se mantendo crescendo até novembro, com cota de 9,73 cm. Nos anos de 2014 e 2015, também ocorre oscilações no EqW, com o nível aumentando nos períodos de chuvosos e diminuindo nos meses secos, mas não variando fora da normalidade.

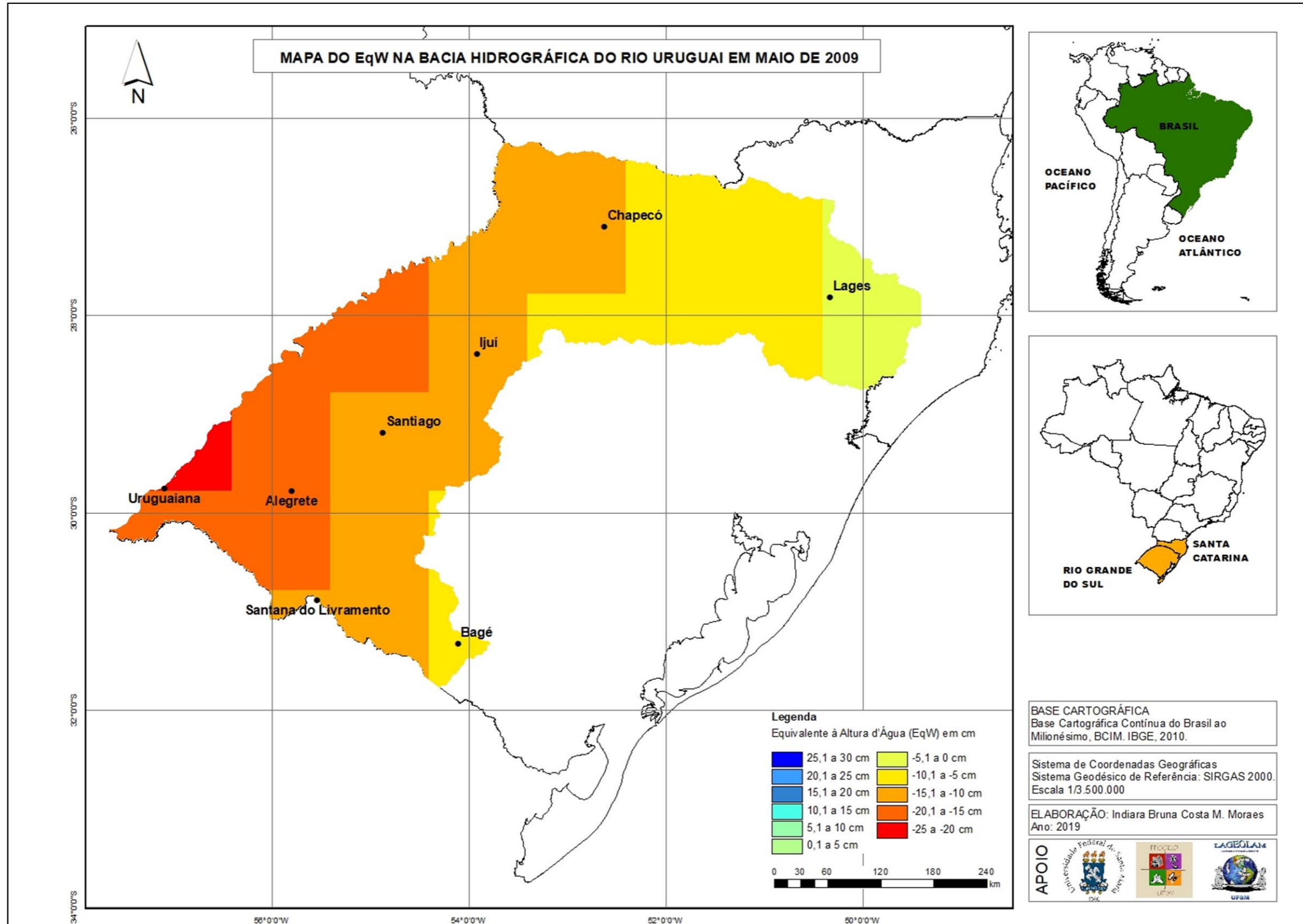
Observa-se que com a variação brusca do EqW entre os meses de julho de 2011 e julho de 2012, possivelmente ocorreu uma grande estiagem na bacia. As Figuras 42, 43 e 44 mostram o comportamento do EqW nos períodos críticos de 2005, 2009 e 2012. As Figuras supracitadas podem ser analisadas no Apêndice B.

Figura 42 - Variação no EqW em março/05.



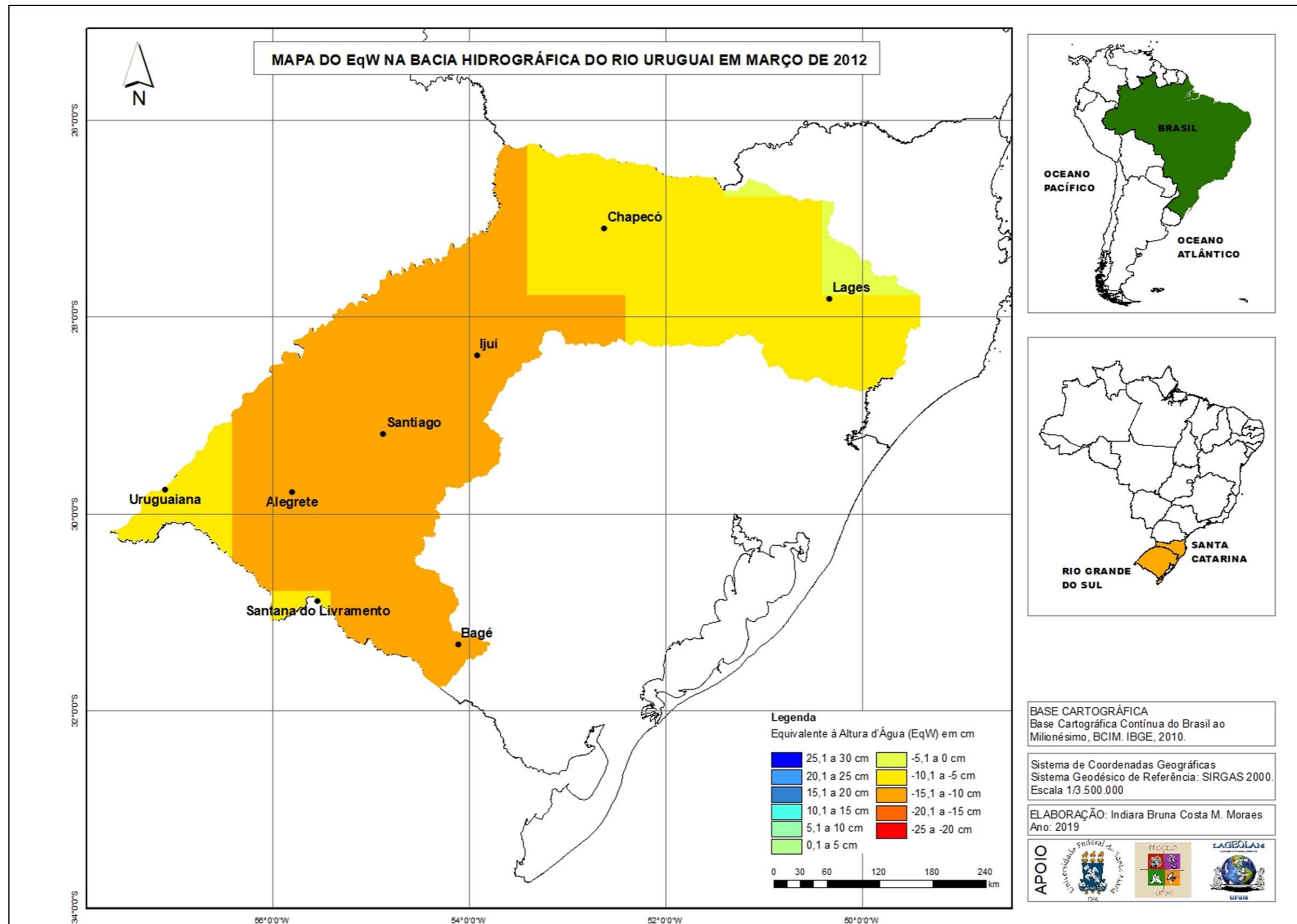
Fonte: MORAES, 2019.

Figura 43 - Variação no EqW em maio/09.



Fonte: MORAES, 2019.

Figura 44 - Variação no EqW em março/12.



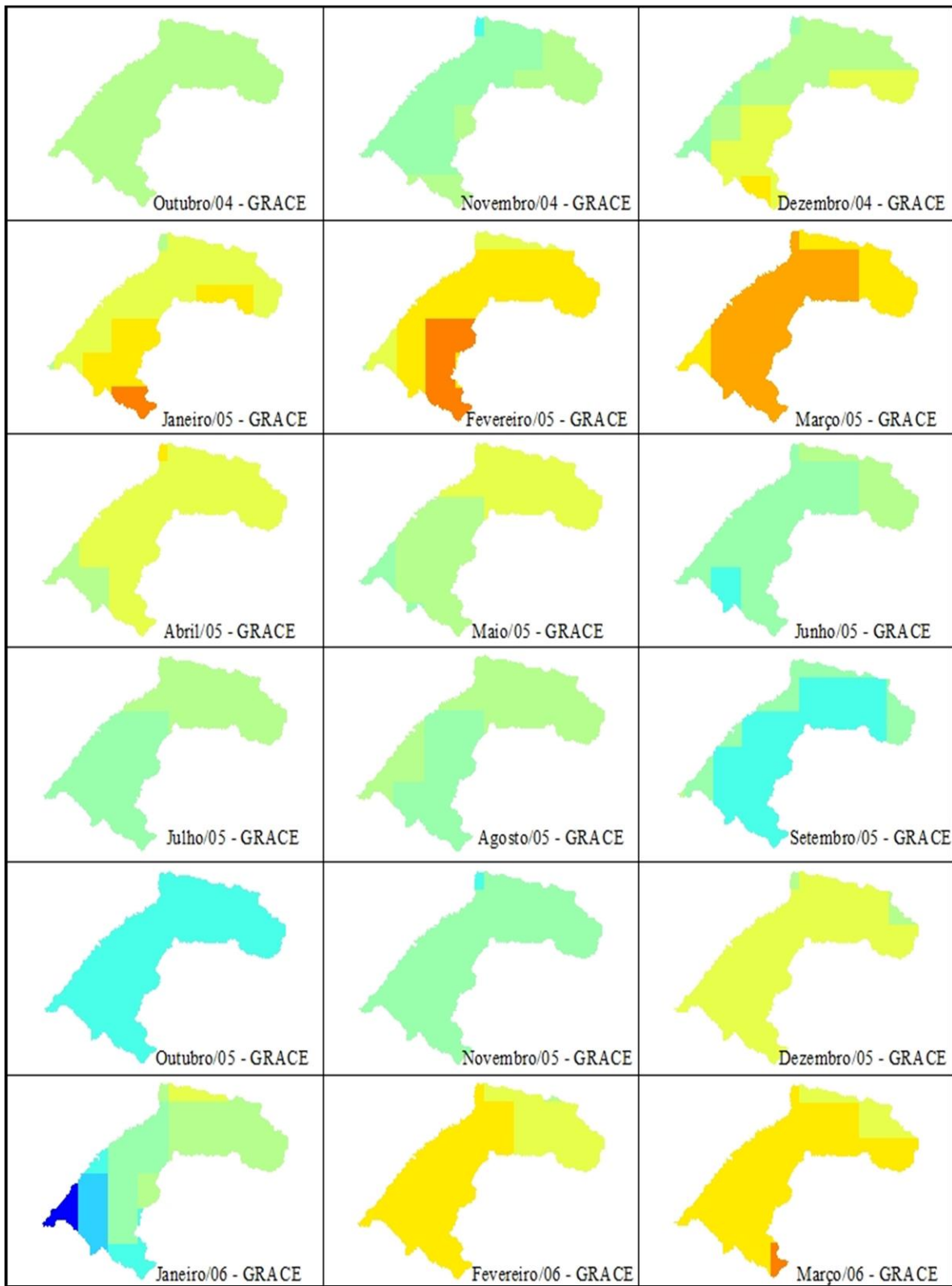
Analisando os dados da Defesa Civil e os dados do EqW percebe-se que há uma defasagem entre as datas dos decretos de SE e as datas dos déficits hídricos na bacia. Pode-se dizer, observando os gráficos, que o equivalente à altura d'água começa a diminuir no período de 1 ano a 6 meses antes de atingir o índice crítico, considerando o valor mais baixo de EqW no período analisado e correspondente as grandes estiagens que ocorreram.

Da mesma forma pode-se pensar que na estiagem de 2012, quando ocorreu o maior aumento no número de decretos de emergência, o período de déficit hídrico durou mais tempo, conforme pode ser visto no gráfico 1.

Outra situação a ser mencionada é o fato de que, na estiagem de 2009, o EqW foi tão negativamente expressivo quanto na de 2012, porém, o número de decretos de emergência em 2009 foi muito menor. Deve-se lembrar que os decretos de emergência são também instrumentos políticos e muitas vezes os municípios optam por não usar deste instrumento.

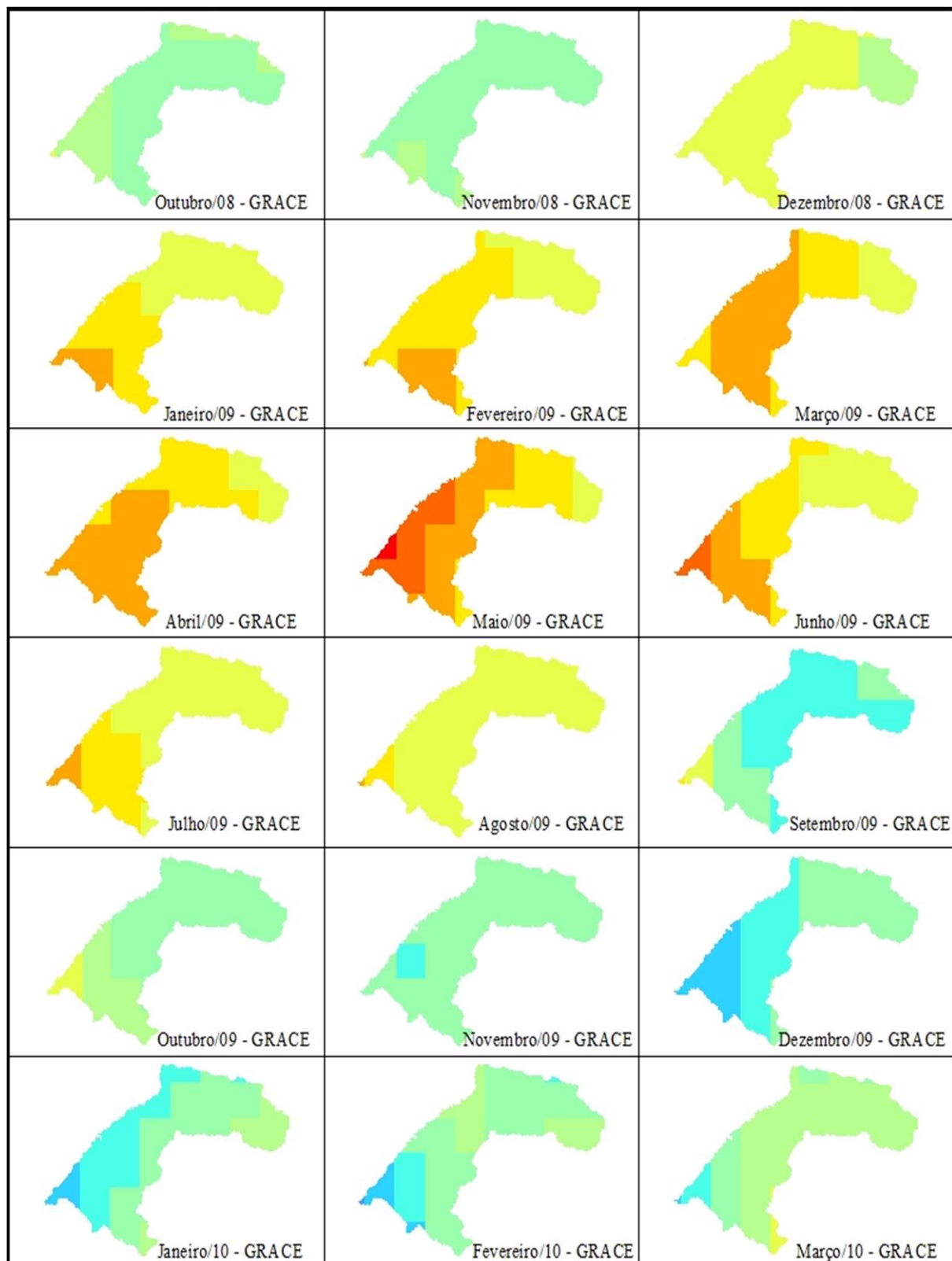
As Figuras 45 e 46 apresentam, de forma especializada, o comportamento do EqW na bacia no período de outubro de 2004 a março de 2006 e de outubro de 2008 a março de 2010.

Figura 45 - Comportamento do EqW na Bacia do Uruguai entre o período de out/04 a mar/06.



Fonte: MORAES, 2019.

Figura 46 - Comportamento do EqW na Bacia do Uruguai entre o período de out/08 a mar/10.



Fonte: MORAES, 2019.

Vemos que o evento de estiagem de 2005 começa a demonstrar em EqW mais baixo em dezembro de 2004, localizado mais a sul da bacia nos municípios de Santana do Livramento, Bagé e Aceguá, por exemplo. Em janeiro, fevereiro e março, se estende para o norte da bacia. A recuperação do EqW se dá de sudoeste para nordeste e norte, até outubro de 2005 onde o EqW é bastante positivo para toda bacia.

No evento de 2009, vemos iniciar a diminuição do EqW em dezembro de 2008 na porção mais sudoeste da bacia, nos municípios de Uruguaiana e Quaraí, e se estendendo para nordeste sendo que em maio de 2009 atinge praticamente toda porção do Médio a Baixo Uruguai. A recuperação do EqW tem início em julho de 2009 no sentido nordeste-sudoeste.

No evento de 2012, no mês de janeiro já é possível observar o baixo nível do EqW iniciando a sul-sudeste da Bacia, nos municípios de Bagé, Aceguá, Dom Pedrito e Hulha Negra, por exemplo. Em março e abril, os baixos valores do EqW se estendem para norte atingindo a bacia do Médio Uruguai e uma porção mais a oeste do Alto Uruguai. A recuperação do EqW parece iniciar em julho de 2012 de norte-nordeste para sul-sudeste.

O fato dos valores de EqW diminuírem primeiro no sul-sudoeste da Bacia pode ser explicado pelo fato desta região apresentar menores índices pluviométricos em determinadas épocas do ano. Conforme Simioni et al (2014), há uma grande variação têmporo-espacial da precipitação pluviométrica na Bacia Hidrográfica do Ibicuí (localizada no Médio Uruguai), principalmente nos meses de verão e inverno, caracterizados pelos menores valores pluviométricos enquanto que os meses de outono e primavera apresentaram os maiores valores pluviométricos da bacia do Ibicuí.

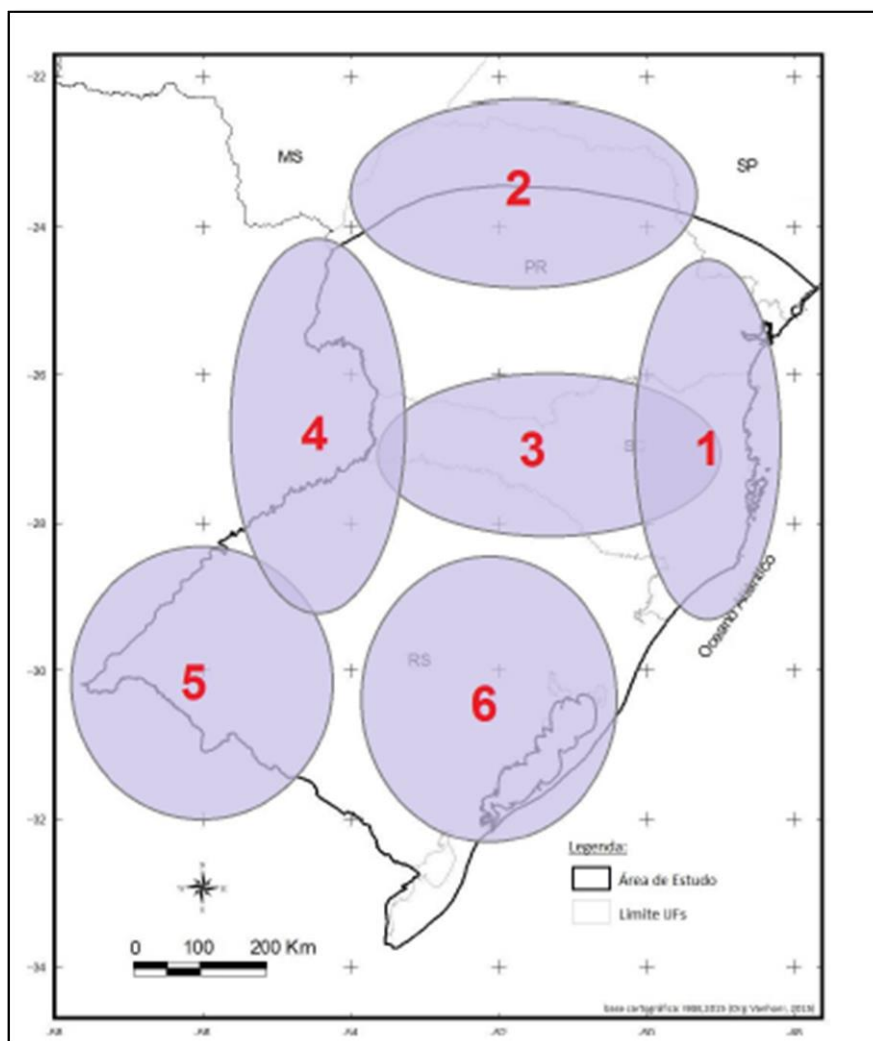
Para Jorge (2015), no verão, sob influência de massa de ar seco (como a Tropical Continental-mTc), ocorre o bloqueio de sistemas produtores de chuva e formação dos processos convectivos na Região de Clima Tropical influenciando as estiagens.

Observando as Figuras 42 e 43 vê-se que há uma recuperação do EqW iniciando sempre ao norte da bacia (alto Uruguai) o que pode ser explicado por ser o divisor de águas, um local de cotas mais elevadas.

Jorge (2015) destaca 6 regiões/fatores de influência na pluviosidade para a região sul do Brasil e que podem, de certa forma, explicar o porquê as regiões de EqW mais baixas estão localizadas a sul e sudoeste e as mais altas ao norte da Bacia do Uruguai. A Figura 47 apresenta estas regiões sendo a região 5 onde os níveis de EqW começam a diminuir primeiramente, dando início ao processo de estiagem e, a região 3, por onde estes valores começam a subir.



Figura 47 - Áreas e fatores de influência das tendências pluviométricas.



Fonte: JORGE, 2015.

Conforme Jorge (2015) na área 3 o fenômeno El Niño influencia diretamente na dinâmica pluviométrica nesta área o que implica no aumento significativo da pluviosidade total chegando a mais de 50 %. Esta influência corrobora para a maioria dos resultados positivos de tendência da região de clima subtropical de abrangência do fenômeno. Já na área 5 há uma tendência negativa da pluviosidade (diminuição no número de dias com chuva), influenciada principalmente pela diminuição do registro de passagem de Frentes Frias.

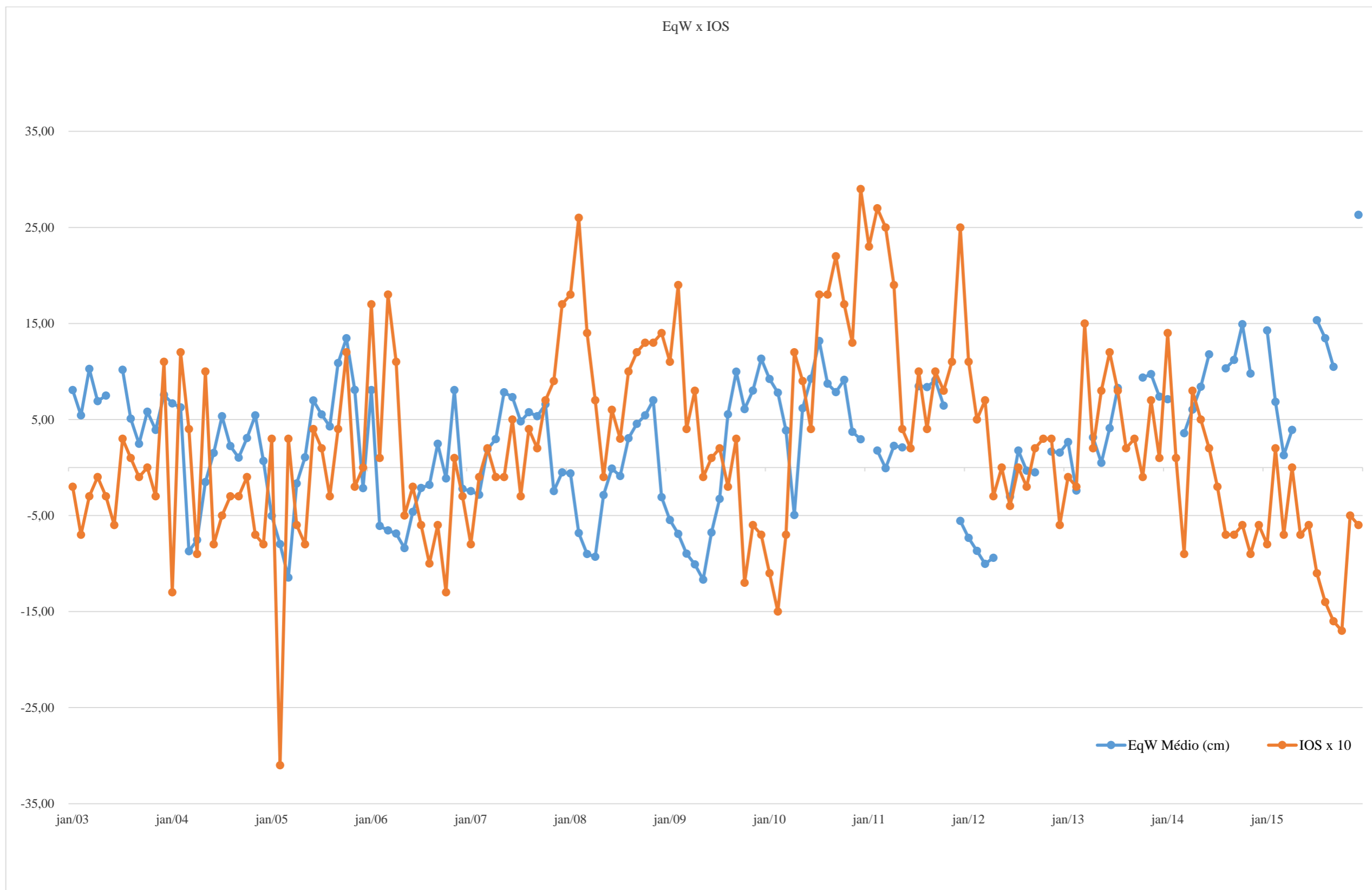
El Niño representa o aquecimento anormal das águas superficiais e subsuperficiais do Oceano Pacífico Equatorial (CPTEC, 2019). O fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) exerce influência importante sobre as precipitações pluviométricas, tanto no que se refere ao excesso quanto à estiagem, na bacia.

A fase quente do fenômeno ENOS (representada pela ocorrência do El Niño), que se apresenta normalmente em intervalos de 2 a 7 anos, caracteriza-se pelo aumento da temperatura na superfície do oceano Pacífico Equatorial Oriental e a atmosfera sobre ele, apresentando condições “anormais” durante um período de 12 a 18 meses. Em anos de ENOS (fase quente), a evolução típica do fenômeno inicia no começo do ano, atinge sua máxima intensidade durante dezembro do mesmo ano (e janeiro do ano seguinte), enfraquecendo-se na metade do segundo ano. Entretanto, com as alterações climáticas que vêm ocorrendo no planeta, tanto a periodicidade, quanto a duração, ou mesmo a época têm variado (ROSSATO, 2011).

Episódios de La Niña representam a fase fria do ENOS e apresentam menor frequência, entretanto trazem consequências importantes. Nestas condições ocorre o resfriamento das águas superficiais do Pacífico e o fortalecimento do setor leste da Alta Subtropical e dos ventos alísios. Este fenômeno acarreta situações, muitas vezes, opostas à fase quente de ENOS, como precipitações abundantes e enchentes na Colômbia, diminuição da precipitação e secas no Uruguai, secas severas no sul do Brasil, diminuição da precipitação (outubro a dezembro) nos pampas argentinos, diminuição da precipitação no Chile e centro-oeste da Argentina e tendência de secas no norte do Peru (ROSSATO, 2011).

O fenômeno ENOS pode ser quantificado pelo Índice de Oscilação Sul (IOS). Este índice representa a diferença entre a pressão ao nível do mar entre o Pacífico Central (Taiti) e o Pacífico do Oeste (Darwin/Austrália). Esse índice está relacionado com as alterações na circulação atmosférica nos níveis baixos da atmosfera, consequência do aquecimento/resfriamento das águas superficiais na região. Valores negativos e positivos da IOS são indicadores da ocorrência do El Niño e La Niña respectivamente (CPTEC, 2019). Pode-se observar a variação do EqW e do IOS no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Variação de EqW em cm entre os anos 2011 a 2015.



Fonte: MORAES, 2019.

Observando o Gráfico 6 vê-se que há uma forte correlação entre valores baixos do EqW (estiagem) e La Niña, chegando a atingir valores de -3,1. Há uma tendência de predomínio de La Niña de 2003 a 2008 o que pode estar associado aos períodos de estiagem de 2003 e 2009.

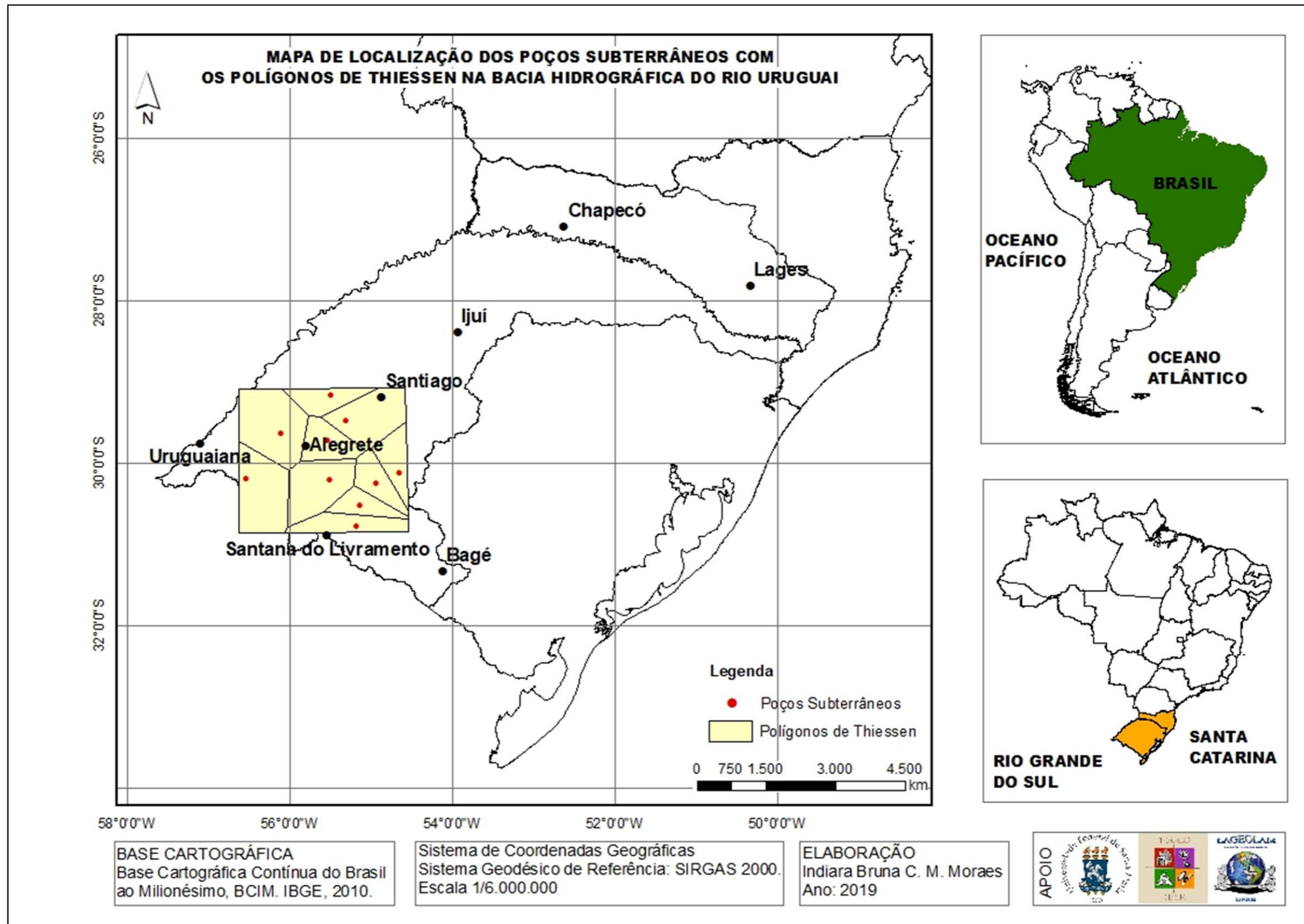
Já a estiagem de 2012 parece não ter relação com a La Niña e sim, com o El Niño que predomina de 2010 até 2014.

### 5.3 COMPARAÇÃO DO EQW COM OS POÇOS SUBTERRÂNEOS

O ano de 2012 foi escolhido para se fazer a comparação entre os dados dos poços subterrâneos e o EqW calculado. Este ano foi escolhido justamente por ter ocorrido o maior evento de estiagem durante o período de estudo.

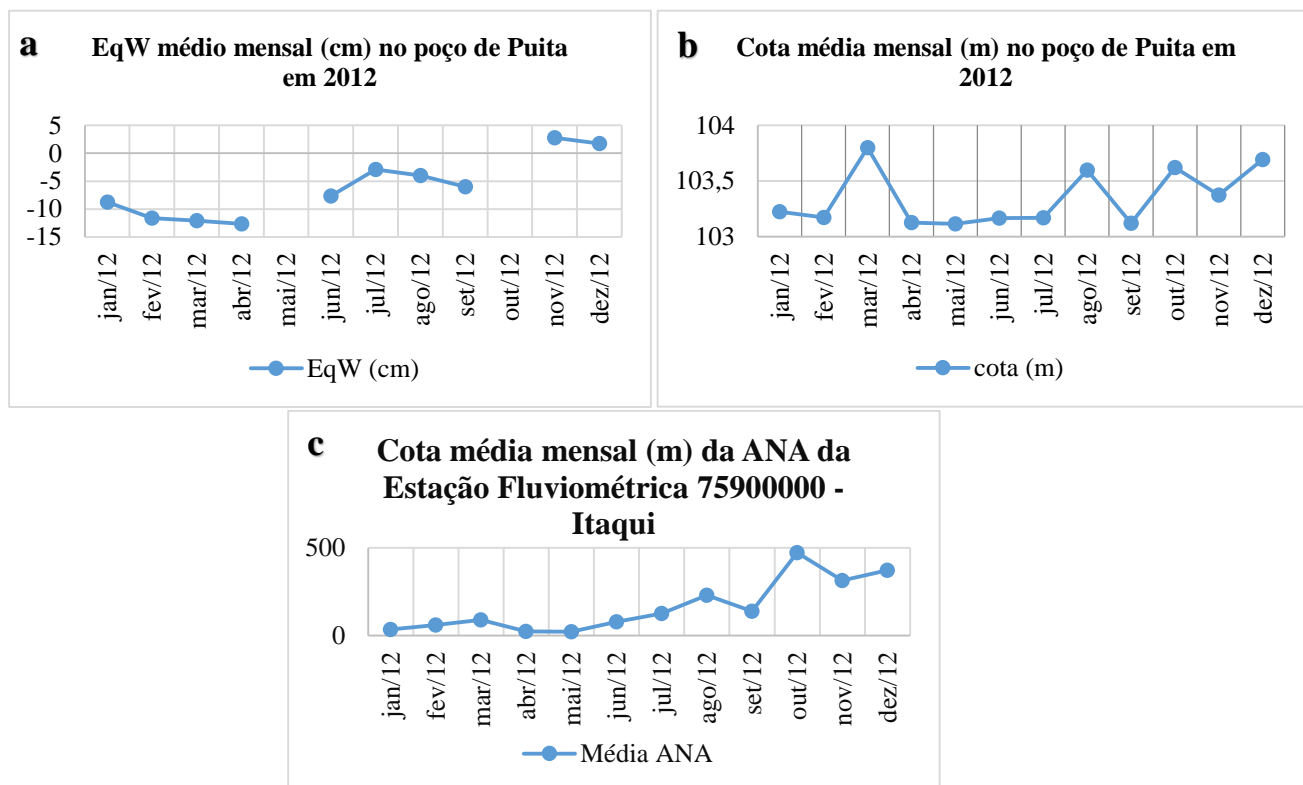
A partir das coordenadas dos poços de águas subterrâneas citados no Quadro 8, foi calculado o polígono de Thiessen (Figura 48) para determinar a área de influência de cada poço no sul da bacia. Calculou-se a cota média mensal de cada poço e, também, a média mensal do EqW para a área de influência dos poços.

Figura 48 - Mapa de localização dos poços subterrâneos com os polígonos de Thiessen na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai.



As Figura 49 e 50 e os Gráficos 7 a 31, mostram o comportamento da cota dos poços subterrâneos e a média do EqW da área de influência dos poços.

Figura 49 - (a)Variação do nível do EqW no poço subterrâneo de Puita em Itaqui durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço subterrâneo de Puita em Itaqui durante o ano de 2012. (c) Variação da cota média mensal (m) da Estação Fluviométrica de Itaqui durante o ano de 2012.



Fonte: Fonte: (a) MORAES, 2019. (b) Adaptado de RIMAS, por MORAES, 2019. (c) Adaptado da ANA, por MORAES, 2019.

Analisando a Figura 49 (a, b e c), pode-se observar que o nível do EqW começa a decair no mês janeiro de 2012, no mês de maio, não tem dados do satélite, tendo uma recuperação a partir de maio de 2012, retornando a decrescer novamente em julho de 2012, com uma falta de dados em outubro do mesmo ano, e em novembro o EqW tem a maior cota do ano, voltando a decair em dezembro, mas mantendo uma cota média apenas menor do que a do mês de fevereiro.

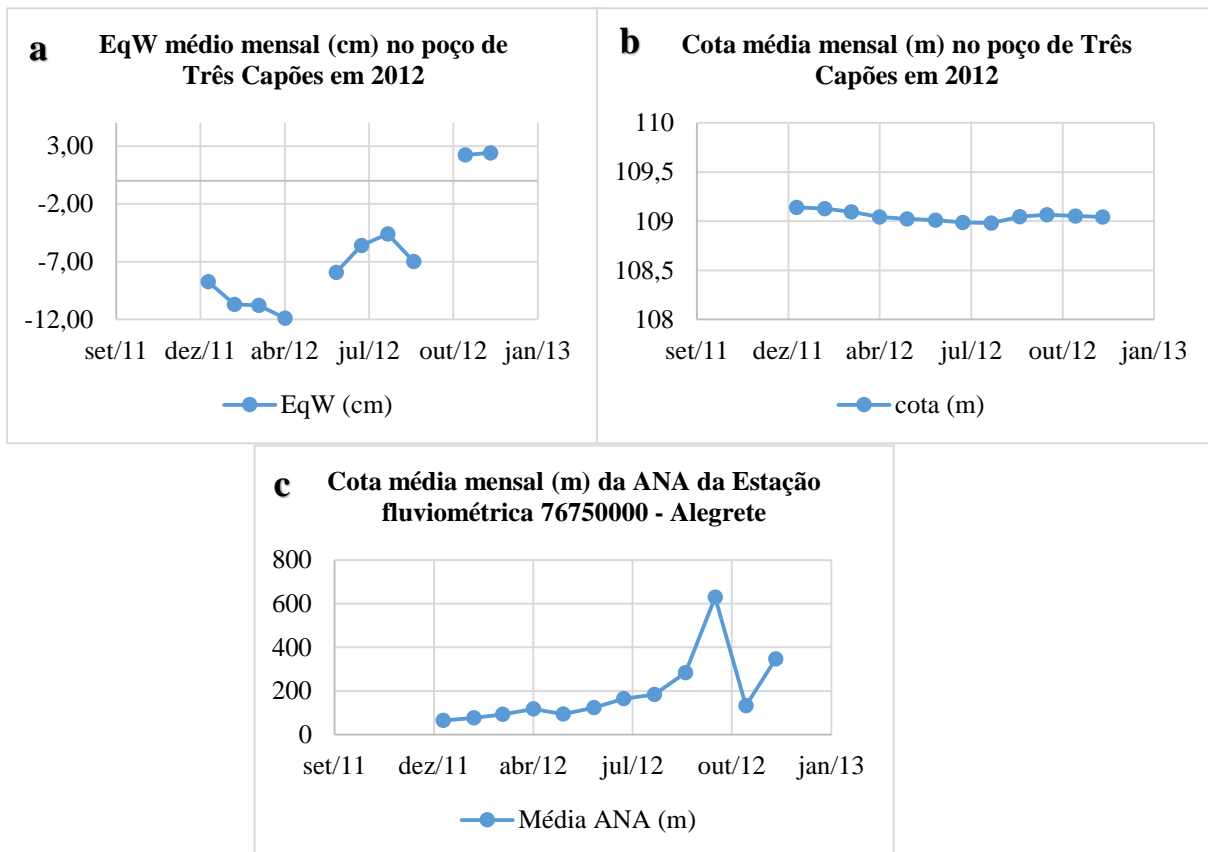
Já a cota do poço subterrâneo de Puita inicia seu decaimento em março de 2012, tendo uma leve recuperação a partir de outubro de 2012, mas caindo novamente no mês seguinte. Já as cotas da Estação Fluviométrica 75900000, começa a subir em janeiro com pico em março, decaindo em abril e se mantendo estável em maio, voltando a subir de junho agosto, com um

pico negativo setembro, retornando a subir em outubro, com uma queda em novembro e se recuperando em dezembro.

Comparando a Figuras 49 (a e b), observa-se que a cota média do poço subterrâneo de Puita decresce desde janeiro de 2012, voltando a crescer apenas no mês de outubro de 2012 e decaindo novamente nos meses seguintes. Todavia, o nível do EqW tem um comportamento contrário, começando a decair em janeiro e mantendo assim em fevereiro como o nível do poço e mantendo a cota de abril menor que as dos meses anteriores, o EqW não mantém o mesmo comportamento do nível do poço em abril. Em julho, ambas as cotas começam a se recuperar, mas o EqW não pega o pico do nível do poço em agosto, o que é explicado pela geologia e pedologia da região, com o escoamento rápido da água, o satélite consegue medir esses picos positivos pois sua resolução temporal é de 30 dias. Contudo, o EqW consegue pegar a queda de setembro e a ascensão de novembro.

Com relação a cota da estação fluviométrica, o EqW cai até abril, já o nível da estação está subindo até março e caindo no mês seguinte, voltando a subir de maio a agosto. Já o EqW, sobe em junho e julho e diminui em agosto e setembro, não identificando novamente o pico agosto. E novembro e dezembro, enquanto o EqW cai de novembro para dezembro, os níveis dos poços e da cota fluviométrica sobem nos mesmos meses.

Figura 50 - (a) Variação do nível do EqW no poço subterrâneo de Três Capões em Alegrete durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço subterrâneo de Três Capões em Alegrete durante o ano de 2012. (c) Variação da cota média mensal (m) da Estação Fluviométrica de Alegrete durante o ano de 2012.



Fonte: (a) MORAES, 2019. (b) Adaptado de RIMAS, por MORAES, 2019. (c) Adaptado da ANA (2005), por MORAES, 2019.

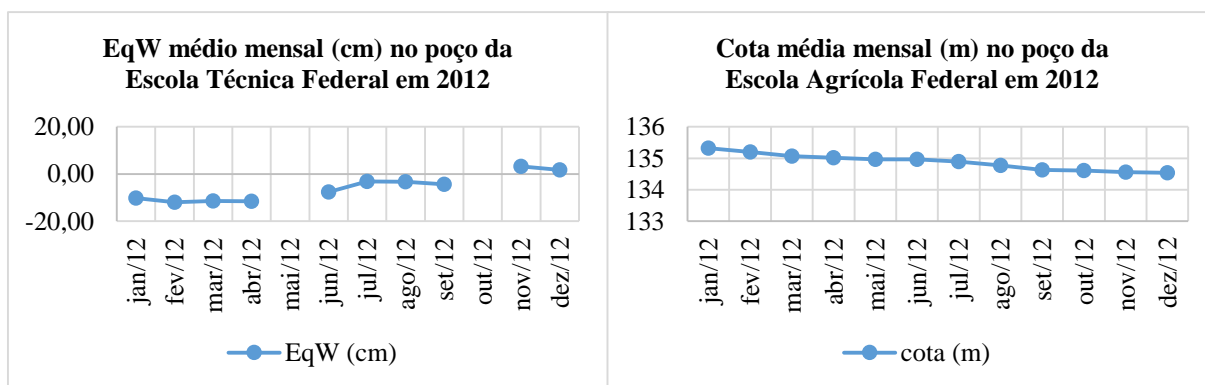
Analisando a Figura 50 (a, b e c), pode-se observar que o nível do EqW começa a decair no mês janeiro de 2012, tendo uma leve recuperação em março e voltando a cair em abril. No mês de junho ele começa a subir até agosto e volta a cair em setembro. Nos meses de novembro e dezembro, a cota do EqW se mantém estável. Observando o poço subterrâneo de Três Capões, o nível cai levemente de janeiro até agosto, se recuperando em setembro a outubro, e se mantém estável até dezembro. Já as cotas da Estação Fluviométrica 76750000, o nível sobe de janeiro a abril, tendo uma queda em maio, e retornando a subir em junho até alcançar a maior cota em outubro, caindo drasticamente em novembro, mas se recuperando em dezembro.

Comparando a Figura 50 (a e b), observa-se que a cota média do poço subterrâneo de Três Capões e o EqW tem comportamento semelhante até o mês de abril. A cota do EqW sobe de junho a agosto e cai em dezembro, voltando a ter um comportamento semelhante ao do poço apenas em novembro e dezembro.



Em relação a cota fluviométrica, elas têm comportamento médio semelhante ao do EqW fazem movimentos opostos. Enquanto o EqW cai de janeiro a abril, o nível da estação fluviométrica sobe ligeiramente de janeiro a abril, mantendo-se mais ou menos estável até maio, quando retornam a subir de junho a outubro, caindo em novembro e se recuperando em dezembro. O EqW também sobe de maio a agosto, caindo em setembro, e se mantendo estável nos meses de novembro e dezembro.

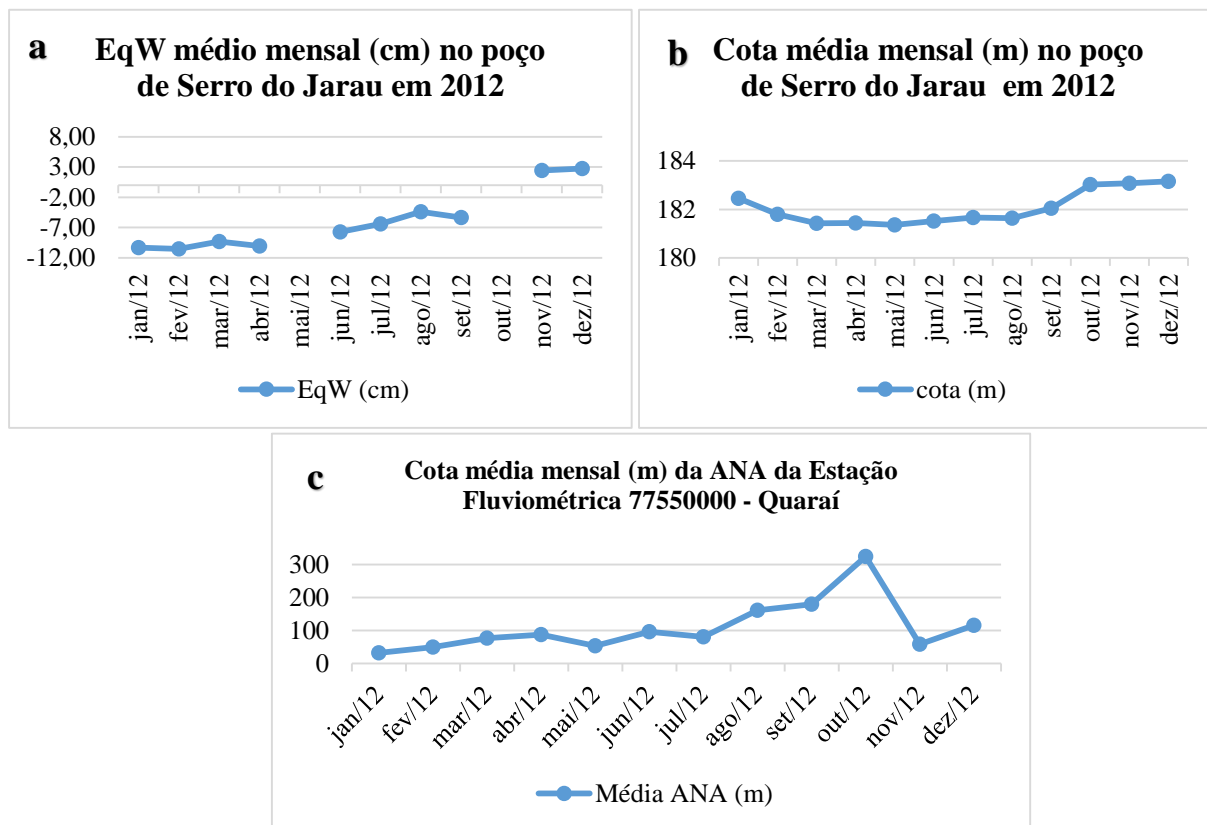
Figura 51 - (a) Variação do nível do EqW no poço subterrâneo da Escola Agrícola Federal em Alegrete durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço subterrâneo da Escola Agrícola Federal em Alegrete durante o ano de 2012.



Fonte: (a) MORAES, 2012. (b) Adaptado de RIMAS, por MORAES, 2019.

Avaliando as Figura 50c e 51 (a e b), observa-se que o nível do EqW começa a cair no mês de janeiro a fevereiro, mas se recupera em março e se mantém estável no mês de abril. Entre os meses de junho a julho, há um aumento na cota do EqW, voltando a diminuir de agosto a setembro. No mês de outubro não há dados da missão GRACE. Nos meses de novembro a dezembro, o EqW decai, mas mantém a segunda maior cota do ano. Analisando o poço subterrâneo da Escola Técnica Federal, o nível cai levemente durante todo o ano. O município de Alegrete só possui uma estação fluviométrica funcionando que é a estação 76750000, descrita anteriormente.

Figura 52 - (a) Variação do nível do EqW no poço subterrâneo de Serro do Jarau em Quaraí durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço de Serro do Jarau em Quaraí durante o ano de 2012. (c) Variação da cota média mensal (m) da Estação Fluviométrica de Quaraí durante o ano de 2012.

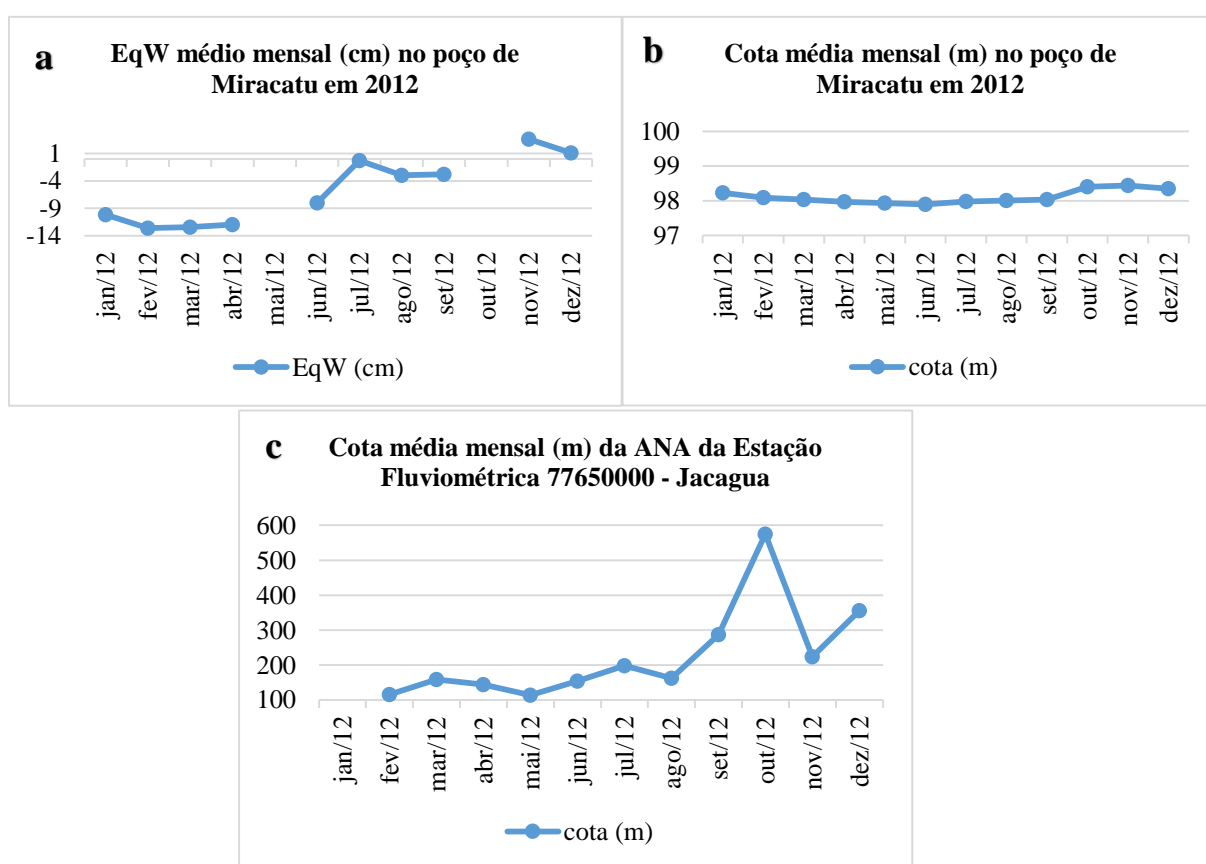


Fonte: (a) MORAES, 2012. (b) Adaptado de RIMAS, por MORAES, 2019. (c) Adaptado da ANA (2005), por MORAES, 2019.

Observando a Figura 52 (a, b e c), o nível do EqW começa o ano de 2012 com cota de -10,32 cm em janeiro, caindo um pouco em fevereiro e voltando a se recuperar em março, mas decai em abril. No mês de junho o EqW retorna a subir até o mês de agosto chegando a -4,36 cm, porém, em setembro a cota é de -5,32 cm. Há uma recuperação em novembro com cota de 2,14 cm, terminando o ano com 2,74 cm. O poço subterrâneo de Serro da Jarau começa o ano com nível de 182,86 m e cai até maio, atingindo o nível de 181,37 m, voltando a subir de junho a junho e tendo uma queda em agosto. Retorna a subir em setembro e se mantém assim até dezembro atingindo a nível de 183,16 m. As cotas da Estação Fluviométrica 77550000, o nível sobe de janeiro a abril, tendo uma queda em maio, e retornando a subir em junho, caindo em julho e subindo de agosto até alcançar a maior cota em outubro, caindo drasticamente em novembro, mas se recuperando em dezembro.

Comparando a Figura 52 (a e b), observa-se que a cota média do poço subterrâneo de Serro do Jarau e o EqW tem comportamento semelhante nos meses de junho e julho, e se repetindo em novembro e dezembro. Com relação a estação fluviométrica, ambas sobem de fevereiro a março, repetindo o mesmo comportamento de julho a agosto, somente.

Figura 53 - (a) Variação do nível do EqW no poço subterrâneo de Miracatu em São Francisco de Assis durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço de Miracatu em São Francisco de Assis durante o ano de 2012. (c) Variação da cota média mensal (m) da Estação Fluviométrica de Jacagua durante o ano de 2012.



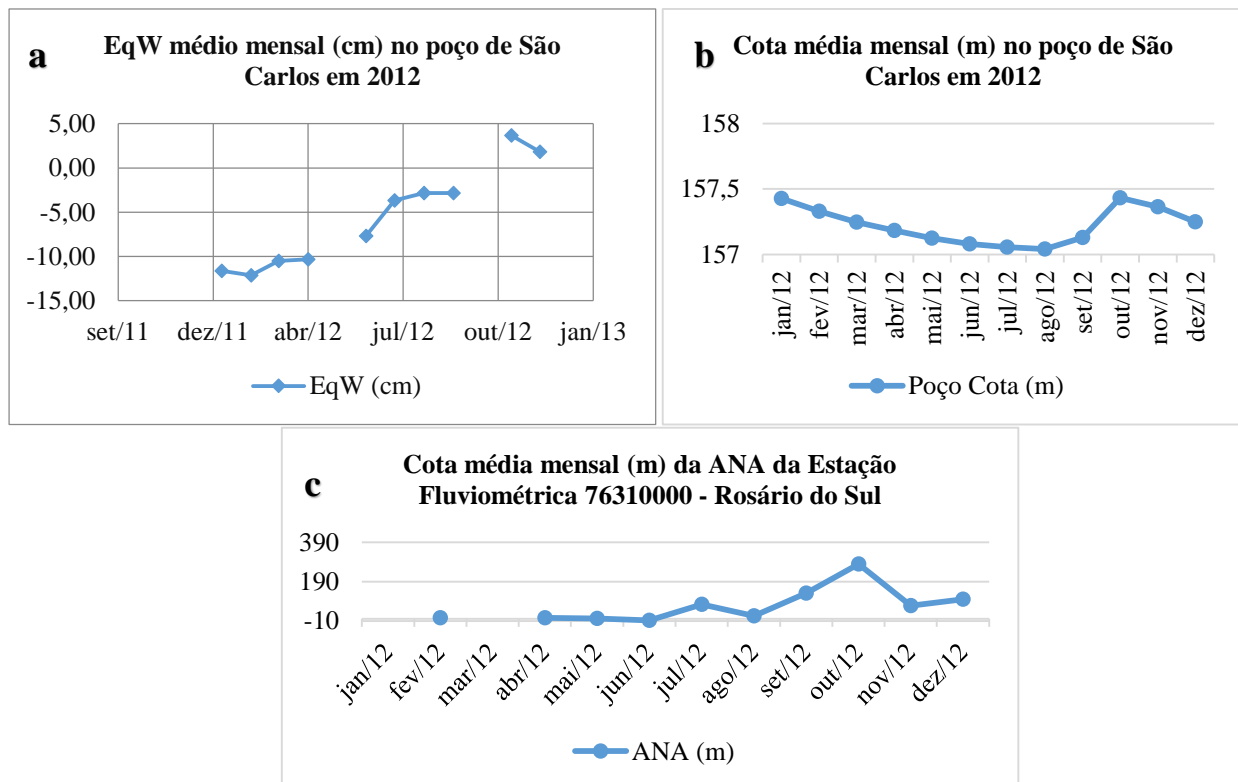
Fonte: (a) MORAES, 2012. (b) Adaptado de RIMAS, por MORAES, 2019. (c) Adaptado da ANA (2005), por MORAES, 2019.

Observando a Figura 53 (a, b e c), o nível do EqW começa o ano de 2012 com cota de -10,12 cm em janeiro, caindo um pouco em fevereiro e voltando a se recuperar em março, terminando abril com -11,93 cm. No mês de junho o EqW continua a subir até o mês de julho chegando a -0,29 cm, em agosto começa a decair, mas retornar a subir e chega a setembro a cota é de -2,80 cm. Ela se mantém crescendo e chega a novembro com cota de 3,64 cm, porém retorna a cair, terminando o ano com 1,13 cm. O poço subterrâneo de Miracatu possui nível de

98,13 m em janeiro cai até junho, com nível de 97,90 m, iniciando um crescente em julho até novembro, alcançando o nível de 98,44 m e retornando a cair em dezembro com 98,35 m. As cotas da Estação Fluviométrica 77650000, não foram registradas em janeiro/12. Em fevereiro, o nível sobe até março com cota 159 m, tendo uma queda em maio, e retornando a subir em junho, caindo em agosto e retornando a subir até outubro com nível de 590 m. Retorna a cair em novembro, mas termina crescendo com cota de 356m.

Comparando a Figura 53 (a e b), observa-se que a cota média do poço subterrâneo de Miracatu e o EqW tem comportamento semelhante nos meses de janeiro a fevereiro, de junho a julho, agosto a setembro e novembro a dezembro. Quando se relaciona a estação fluviométrica, o comportamento nível d'água é o mesmo de fevereiro a março e junho a setembro.

Figura 54 - (a) Variação do nível do EqW no poço subterrâneo de São Carlos em Rosário do Sul durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço subterrâneo de São Carlos em Rosário do Sul durante o ano de 2012. (c) Variação da cota média mensal (m) da Estação Fluviométrica de Rosário do Sul durante o ano de 2012.



Fonte: (a) MORAES, 2012. (b) Adaptado de RIMAS, por MORAES, 2019. (c) Adaptado da ANA (2005), por MORAES, 2019.

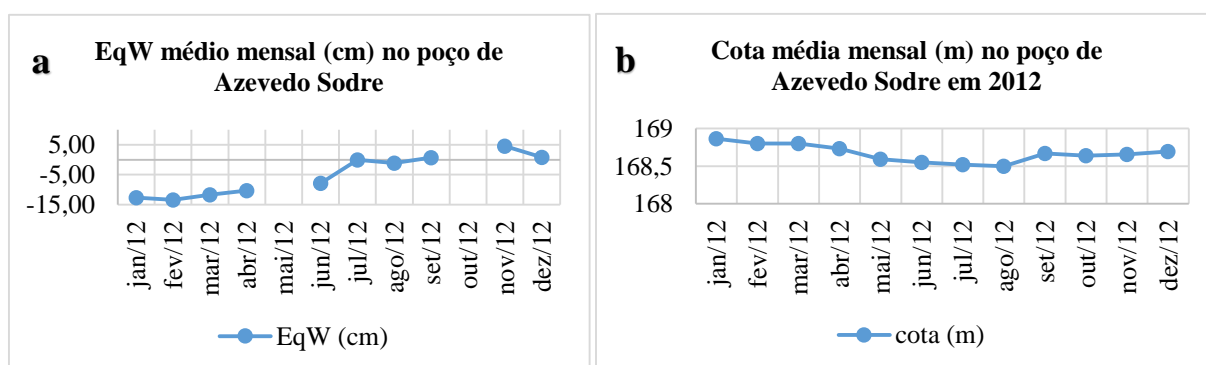
Observando a Figura 54 (a, b e c), o nível do EqW possui cota de -11,61 cm em janeiro, caindo um pouco em fevereiro e voltando a se recuperar em março, terminando abril com -10,31 cm. No mês de junho o EqW continua a subir até o mês de setembro chegando a -2,85 cm. O EqW continua subindo e chega ao mês novembro com cota de 3,69 cm, porém retorna a cair, terminando o ano com 1,82 cm. Há uma recuperação do EqW ao longo do ano.

O poço subterrâneo de São Carlos possui nível de 157,43 m em janeiro cai até agosto, com nível de 157,04 m, retornando a crescer do mês seguinte até o mês de outubro com nível de 157,43, voltando a cair em novembro e dezembro, finalizando o ano com 157,25m. Por mais que o nível do poço oscile durante o ano, ele termina com uma cota maior do que a do início do ano.

As cotas da Estação Fluviométrica 76310000, não foram registradas nos meses de janeiro e março de 2012. Em fevereiro, o nível é de 5 m. No mês abril, o nível é 5 m e cai até -8 m junho, subindo até 74 m em julho, contudo, voltando a cair até 15 m no mês de agosto. A partir de setembro, o nível volta a subir chegando a 280 em outubro, caindo novamente em novembro e voltando a subir em dezembro com cota de 100 m. Pode-se observar que houve uma recuperação do nível d'água ao longo do ano de 2012 e que a cota média anual mensurada na estação de Rosário do Sul é de 67,3 m.

Comparando a Figura 54 (a e b), observa-se que a cota média mensal do poço subterrâneo de São Carlos e o EqW tem comportamento semelhante nos meses de janeiro a fevereiro e novembro a dezembro. Quando se relaciona a estação fluviométrica, o comportamento nível d'água é o mesmo de junho a julho e de agosto a setembro.

Figura 55 - (a) Variação do nível do EqW no poço subterrâneo de Azevedo Sodré em Rosário do Sul durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço subterrâneo de Azevedo Sodré em Rosário do Sul durante o ano de 2012.



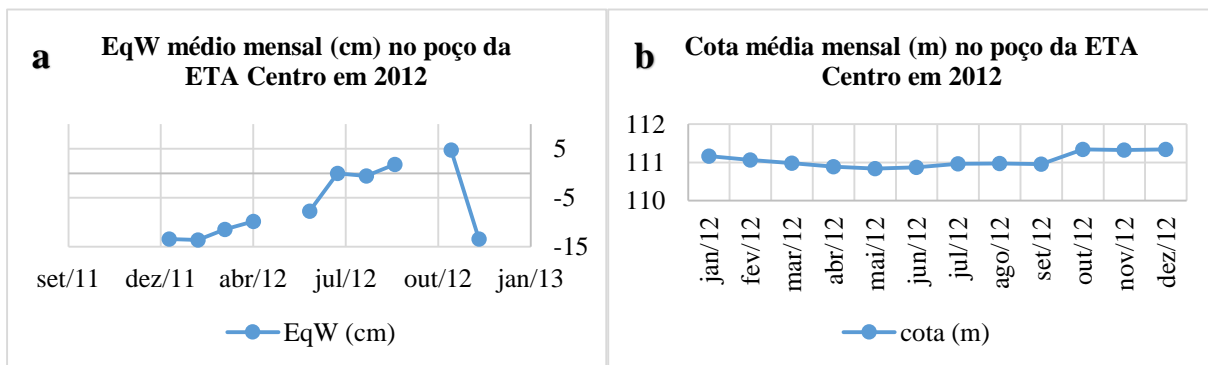
Fonte: (a) MORAES, 2012. (b) Adaptado de RIMAS, por MORAES, 2019.

Observando a Figura 55 (a e b) o nível do EqW possui cota de -12,62 cm em janeiro, caindo um pouco em fevereiro e voltando a se recuperar em março, terminando abril com -10,33 cm. No mês de junho o EqW continua a subir até o mês de julho, tendo uma leve queda no mês de agosto e se recuperando em setembro, chegando a 0,73 cm. O EqW continua subindo e chega ao mês novembro com cota de 4,49 cm, porém retorna a cair, terminando o ano com 0,77 cm. Há uma recuperação do EqW ao longo do ano.

O poço subterrâneo de Azevedo Sodré possui nível de 157,43 m em janeiro cai até agosto, com nível de 168,50 m, retornando a crescer do mês seguinte, com uma leve queda no mês de outubro com nível de 168,64 m, voltando a subir em novembro e dezembro, finalizando o ano com 168,70 m. O poço subterrâneo de Azevedo Sodré tem uma recuperação das quedas ao longo do ano, mas termina com o nível menor do que no início do ano.

Comparando a Figura 55 (a e b), observa-se que a cota média mensal do poço subterrâneo de Azevedo Sodré e o EqW tem comportamento semelhante nos meses de janeiro a fevereiro e de junho a agosto. Quando se relaciona a estação fluviométrica, o comportamento nível d'água é o mesmo de junho a setembro.

Figura 56 - (a) Variação do nível do EqW no poço subterrâneo da ETA Centro em Rosário do Sul durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço subterrâneo da ETA Centro em Rosário do Sul durante o ano de 2012.



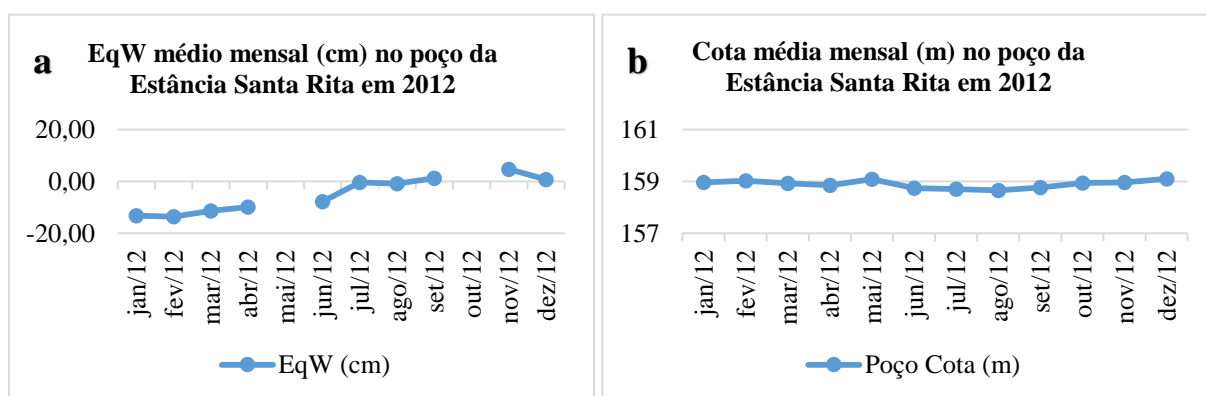
Fonte: (a) MORAES, 2012. (b) Adaptado de RIMAS, por MORAES, 2019.

Avaliando a Figura 56 (a e b), o nível do EqW possui cota de -13,39 cm em janeiro, caindo um pouco em fevereiro e voltando a se recuperar em março, terminando abril com -9,84 cm. No mês de junho o EqW continua a subir até o mês de julho, tendo uma leve queda no mês de agosto e se recuperando em setembro, chegando a 1,78 cm. O EqW continua subindo e chega ao mês novembro com cota de 4,75 cm, porém retorna a cair, terminando o ano com -13,14 cm. O EqW oscila bastante durante o ano, mas termina o ano quase com a mesma que começou

O poço subterrâneo da ETA Centro possui nível de 111,17 m em janeiro cai até maio, com nível de 110,84 m, retornando a crescer do mês seguinte, com uma leve queda no mês de setembro com nível de 110,86 m, voltando a subir em outubro, finalizando o ano com 111,34 m. O poço subterrâneo da ETA Centro tem uma recuperação das quedas ao longo do ano.

Comparando Figura 56 (a e b), observa-se que a cota média mensal do poço subterrâneo da ETA Centro e o EqW tem comportamento semelhante nos meses de janeiro a fevereiro, de maio a julho e de novembro a dezembro. Quando se relaciona a estação fluviométrica, o comportamento do EqW é o mesmo de junho a setembro.

Figura 57 - (a) Variação do nível do EqW no poço subterrâneo da Estância Santa Rita em Santana do Livramento durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço subterrâneo Estância Santa Rita em Santana do Livramento durante o ano de 2012.



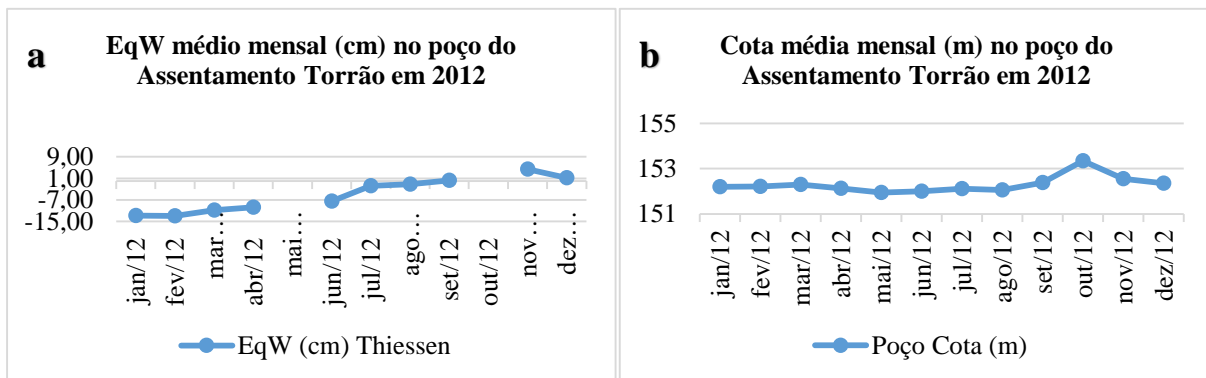
Fonte: (a) MORAES, 2012. (b) Adaptado de RIMAS, por MORAES, 2019.

Examinado a Figura 57 (a e b), o nível do EqW possui cota de -13,21 cm em janeiro, caindo um pouco em fevereiro e voltando a se recuperar em março, terminando abril com -9,88 cm. No mês de junho o EqW continua a subir até o mês de julho, tendo uma leve queda no mês de agosto e se recuperando em setembro, alcançando a cota de 1,31 cm. O EqW continua subindo e chega ao mês novembro com cota de 4,64 cm, porém retorna a cair, terminando o ano com 0,79 cm. O EqW oscila bastante durante o ano e termina-o com uma recuperação de 12 cm.

O poço subterrâneo de Estância Rita possui nível de 158,96 m em janeiro, sobe até 159,03 m em fevereiro e volta a cair até abril, com nível de 158,85 m, retornando a crescer no mês seguinte com cota de 159,08 m, retornando a cair até o mês de agosto com nível de 158,66 m, voltando a subir em setembro, finalizando o ano com 159,11 m. O poço subterrâneo da

Estância Santa Rita tem uma recuperação das quedas ao longo do ano, finalizando o ano com o nível maior do que iniciou.

Figura 58 - (a) Variação do nível do EqW no poço subterrâneo do Assentamento do Torrão em Santana do Livramento durante o ano de 2012. (b) Variação da cota d'água em metros no poço subterrâneo do Assentamento do Torrão em Santana do Livramento durante o ano de 2012.



Fonte: (a) MORAES, 2012. (b) Adaptado de RIMAS, por MORAES, 2019.

Analisando a Figura 58 (a e b), o nível do EqW possui cota de -12,88 cm em janeiro, caindo um pouco em fevereiro e voltando a se recuperar em março, terminando abril com -9,75 cm. No mês de junho o EqW continua a subir até o mês de setembro, alcançando a cota de 0,25 cm. O EqW continua subindo e chega ao mês novembro com cota de 4,43 cm, porém retorna a cair, terminando o ano com 1,16 cm. O EqW oscila bastante durante o ano e termina-o com uma recuperação de 14 cm.

O poço subterrâneo do Assentamento do Torrão possui nível de 152,20 m em janeiro, sobe até 152,30 m em março e volta a cair até maio, com nível de 151,95 m, retornando a crescer até o mês julho com cota de 152,11 m, retornando a cair até o mês de agosto com nível de 152,07 m, voltando a subir em setembro, chegando em outubro com 153,34 m, caindo novamente até dezembro, finalizando o ano com 152,35 m. O poço subterrâneo do Assentamento do Torrão tem uma recuperação das quedas ao longo do ano, finalizando o ano com o nível maior do que iniciou.

Não foi possível avaliar o comportamento fluviométrico em Santana do Livramento, pois não há estações fluviométricas em funcionamento, apenas pluviométricas.

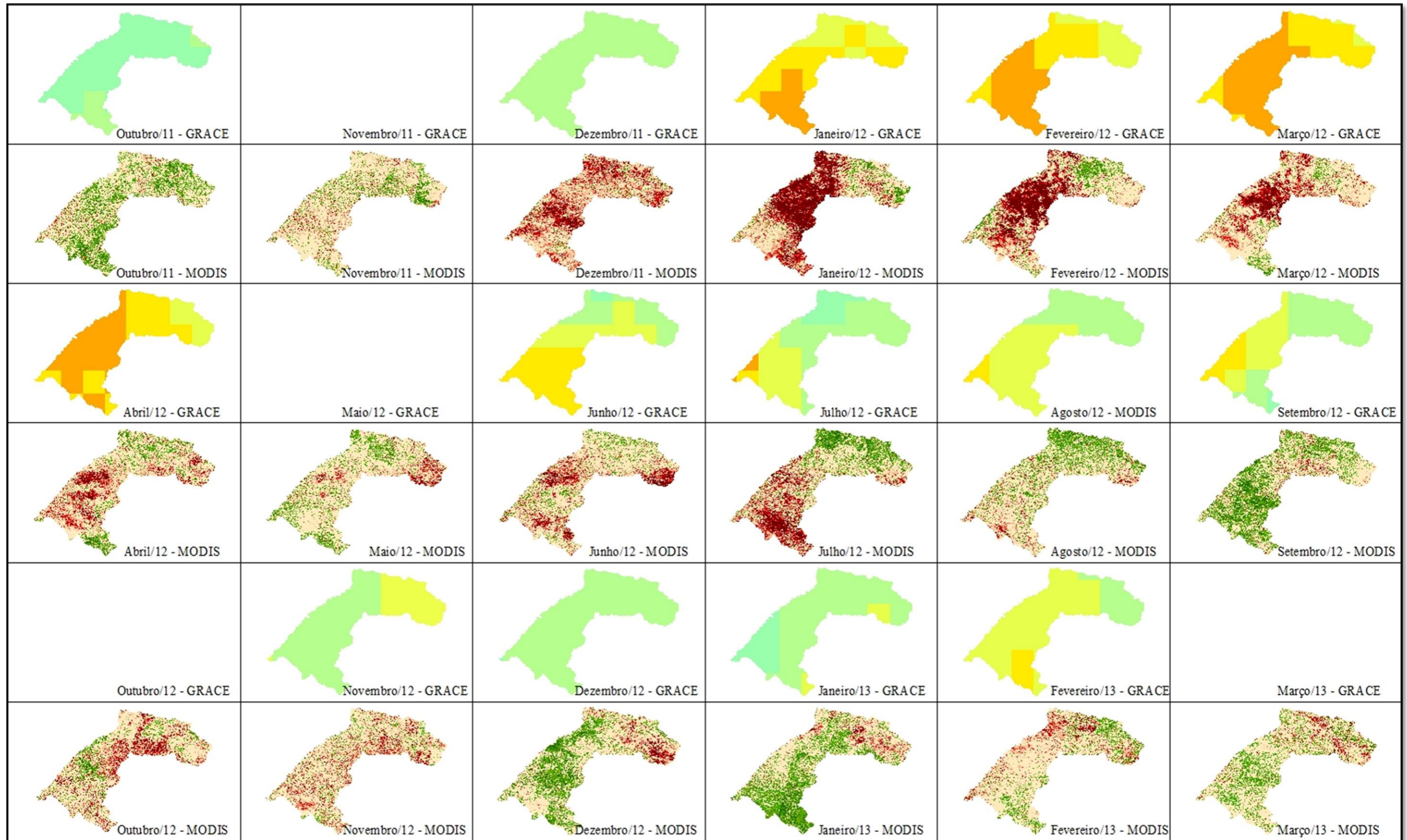
## 5.4 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO



Nesta etapa, foram comparados os mapas de índice de vegetação normalizado (SVI) com os mapas do Equivalente à altura d'água (EqW) gerados a partir das soluções mascons. Foram comparados a variação do EqW com a do SVI durante o período de outubro de 2011 a março de 2012, que coincide com o período com menores valores de EqW para a área estudada. Os valores do EqW foram separados em 11 classes, entre os valores 30 cm a -25cm e os valores do SVI foram separados em 7 classes, com valores entre 4 a -4.

Pode-se observar na Figura 59 a relação dos meses comparados.

Figura 59 - Comparação das imagens da missão GRACE x MODIS.



Em outubro de 2011, o mapa com EqW há uma variação entre 3,4 a 5 cm no sul e nordeste da bacia e na sub-bacia do Rio Negro. No restante da bacia, o EqW varia entre 5 a 10 cm. No mapa do SVI, há um maior vigor da vegetação na sub-bacia do rio Negro, no sudeste da bacia e na parte nordeste da sub-bacia do Alto Uruguai.

Em novembro de 2011, não há dados da missão GRACE. No mapa do SVI, tem-se um vigor da vegetação variando em grande parte da bacia entre -1,1689 a 0,7793. Na parte nordeste da bacia, ainda há áreas com um bom vigor de vegetação.

Em dezembro de 2012, quase a totalidade da bacia está com o EqW variando entre 3,4 a 5 cm. No entanto, o valor de SVI está baixo, em alguns lugares perto do valor mínimo.

Em janeiro de 2012, mapa com EqW há uma variação entre -15 a -10 cm no sul e nordeste da bacia e na sub-bacia do Rio Negro. Na fronteira oeste do RS até a parte central da bacia, o EqW varia entre -9,9 a -5 cm. Já no Alto Uruguai, a variação do EqW está entre -5 a 0 cm. Contudo, o valor de SVI está baixo, em alguns lugares perto do valor mínimo, principalmente no Médio Uruguai.

No mês de março de 2012, mapa do EqW há uma variação entre -14,7 a -10 cm na sub-bacia do Rio Negro, na sub-bacia do Ibicuí, no Médio Uruguai e na parte fronteiríssima do Alto Uruguai. A maior parte do Alto Uruguai e numa parte da fronteira oeste do RS (Itaqui, Uruguaiana) e no município de Santana do Livramento, o EqW varia entre -15 a -10 cm. Já no Alto Uruguai, na parte que engloba os municípios de Otacílio Costa/SC, Bom Retiro/ SC e Urupema/SC, o EqW está entre -4,9 a 0 cm. No mapa de SVI, o vigor da vegetação é baixo na parte no Médio Uruguai e na sub-bacia do Ibicuí. Tem-se um SVI variando entre -0,7793 a 0,7793 numa parte da sub-bacia do Ibicuí e na parte nordeste do Alto Uruguai, e um bom vigor na sub-bacia do Rio Negro.

Em abril de 2012, o mapa do EqW tem uma variação de 0 a -5 cm na parte nordeste do Alto Uruguai, entre -5 a -9,9 na parte restante do Alto Uruguai e nos municípios de Uruguaiana/RS, Santana do Livramento/RS, na parte sudeste da bacia do Rio Negro e na parte da bacia do Rio Santa Maria que engloba o municípios de Rosário do Sul/RS, e entre -10 a -13,7 no restante na bacia. O mapa de SVI, a bacia do Rio Negro e pequenas áreas do Alto Uruguai possui um índice bom de vigor da vegetação, em partes do Médio Uruguai e no Alto Uruguai o índice está bem perto de -4 e no restante da bacia, o índice se mantém médio.

No mês de maio de 2012, não há dados da missão GRACE. Porém, têm-se dados do sensor MODIS. O Mapa de SVI se mantém com o índice médio, em alguns lugares do Alto Uruguai (nordeste) e na parte central do Médio Uruguai com índice baixo, e na bacia do rio

Quaraí e na parte da sub-bacia do rio Santa Maria que faz fronteira do o Uruguai, o índice de vigor é bom, entre 1,17 a 0,77. Na parte nordeste da bacia do Alto Uruguai, o índice é baixo.

No mês de junho de 2012, na parte do Médio Uruguai (bacia do rio Ijuí e a bacia do rio Piratini) e o sul do Alto Uruguai o EqW varia entre -4,9 a 0. Nas bacias do rio Negro, Santa Maria e Ibicuí, o EqW varia entre -9,6 a -5cm. No Alto Uruguai, nas redondezas dos municípios de Flor da Serra Azul/SC, Palma Sola/SC e Guarujá do Sul/SC o EqW varia entre 5 a 6,8 cm. O restante da bacia do Alto Uruguai, a variação é entre 0 a 5 cm. Já o mapa de SVI é baixo na ponta a nordeste do Alto Uruguai, na região da bacia do Piratini, nos municípios de Dom Pedrito/RS e São Rafael/RS. O índice mantém-se médio para o restante da bacia.

Em julho de 2012, o EqW varia entre -13,7 a -10 cm no município de Itaqui/RS e parte do município de Uruguaiana/RS, entre -9,9 a -5 cm entre os municípios de Uruguaiana/RS e Quaraí/RS, entre -4,9 a 0 cm nas bacias dos rios (Piratini, Butuí, Santa Maria e Quaraí) e entre 5,1 a 8,9 cm na parte noroeste do Alto Uruguai e na bacia dos rios Turvo–Santa Rosa–Santo Cristo. O SVI mantém-se baixo na área das bacias do rio Negro, Santa Maria e Piratini, e no Alto Uruguai na área que engloba o município de São José dos Ausentes/RS. O SVI é alto na área do Alto Uruguai e médio no restante da bacia.

No mês de agosto de 2012, o EqW variou entre -7,2 a -5 cm na sub-bacia do rio Ibicuí, entre os municípios de Itaqui/RS e Uruguaiana/RS, entre -4,9 a 0 cm na bacia do rio Negro, no restante da bacia do rio Ibicuí, no Médio Uruguai, entre 0 a 5 cm no Alto Uruguai, e na parte do Médio Uruguai que engloba a bacia do rio Ijuí. O SVI na grande parte da bacia varia entre -0,7793 a 0,7793, aumentando na parte norte do Alto Uruguai.

Em setembro de 2012, o EqW varia entre -8,6 a -5 cm na parte oeste da bacia do rio Ibicuí e na bacia do rio Quaraí, entre -4,9 a 0 no Médio Uruguai e na parte noroeste do Alto Uruguai, entre 0,1 a 5 cm no Alto Uruguai, na bacia do rio Santa Maria e na parte sudeste da bacia do Ibicuí, e varia entre 5 a 6 cm na bacia do rio Negro. O SVI é médio no Médio Uruguai e na parte nordeste do Alto Uruguai, e é alto na área remanescente da bacia.

No mês de outubro de 2012, não há dados da missão GRACE. O SVI se mantém entre médio e baixo em toda bacia.

Em novembro de 2012, o EqW varia entre -1,3 a 0 cm no nordeste e central do Alto Uruguai e varia entre 0,1 a 5 cm no restante da bacia. O SVI varia entre normal a baixo em toda extensão da bacia.

Já em dezembro de 2012, o EqW varia entre 0,5 a 0 cm em quase toda área da bacia, variando entre 0,1 a 6,3 cm na divisa de Quaraí – BR e Bella Union – URU.

Em janeiro de 2013, o EqW varia -0,7 a 0 cm na bacia do rio Negro e na área da Alto Uruguai que engloba os municípios de Vacaria/RS, Lagoa Vermelha/RS, Anita Garibaldi/SC e Campo Belo do Sul/SC, entre 5,1 a 8,7 cm na bacia do rio Quaraí e na bacia do rio Ibicuí e entre 0,1 a 5 cm no restante da bacia. O SVI é alto na parte sul e centro-leste da bacia, médio na Médio Uruguai e no Alto Uruguai, e baixo em pequenas áreas no Alto Uruguai e nos municípios de Tiradentes do Sul/RS, Crissiumal/RS e Três Passos/RS.

No mês de fevereiro de 2013, o EqW varia entre -5,2 a -5 cm numa área que conglomerava os municípios de Dom Pedrito/RS, Quaraí/RS, Alegrete/RS e Rosário do Sul/RS, entre -4,9 a 0 cm em quase toda a área da bacia excluindo a já citada e a parte nordeste do Alto Uruguai, e de 0,1 a 5 cm na área nordeste do Alto Uruguai.

Em março de 2013, não há dados da missão GRACE. Já o SVI varia entre alto a médio vigor da vegetação na bacia, com áreas de baixo vigor no Alto Uruguai.

Analisando a evolução tanto do EqW quanto do SVI de outubro de 2011 a março de 2013, observa-se o declínio do EqW de outubro/11 a julho/12 e sua recuperação a partir de agosto de 2012. O SVI entra em declínio atingindo o menor índice entre dezembro de 2011 a abril de 2012, se recuperando em maio de 2012, mas voltando a cair em junho de 2012, principalmente no Médio Uruguai e no sudeste do Alto Uruguai, e em julho/12 na parte centro-sul da bacia, voltando a se recuperar a partir de agosto, primeiramente no Alto Uruguai e em setembro/12 no restante da bacia. Nos meses de outubro e novembro, o SVI se mantém médio, subindo novamente a partir de dezembro de 2012. Há de se observar que nos meses onde o EqW é menor, há também, um menor índice de vegetação normalizada.

## 5.5 CORRELAÇÃO ENTRE SVI E EqW

Segundo Moretti et al. (2004), a análise de regressão estuda a relação entre uma variável chamada de variável dependente e outras variáveis chamadas de variáveis explicativas. Em outras palavras, consiste na relação entre elas, representada por um modelo matemático, que associa a variável dependente com as variáveis explicativas.

O coeficiente de determinação da regressão ( $R^2$ ) foi usado na avaliação do grau de relação entre o EqW e o SVI, onde quanto mais próximo da unidade, maior é a qualidade do ajustamento. Esse coeficiente representa a porcentagem da variação total que é explicada pela regressão, sendo que  $R^2$  varia entre 0 e 1, e quanto mais próximo de 1, melhor é o modelo e quanto mais perto de 0, pior é o modelo (ANDRIOTTI, 2013).

Para verificar a correlação entre os EqWs e os índices de vegetação normalizado (SVI), foi realizada uma regressão linear no software QGIS 2.18.28 no módulo GRASS 7.6.0 e, posteriormente, a regressão geograficamente ponderada (GWR - *Geographically Weighted Regression*) no software ArcGIS 10.5, onde foram usados os valores de EqW como variável dependente e os índices de vegetação normalizados (SVI) como variável independente. Esses valores de EqW e SVI são correspondentes às médias das 3 grandes estiagens verificadas no estudo (anos de 2004-2005, 2008-2009 e 2011-2012).

O GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*) calcula a regressão linear entre dois mapas em raster, de acordo com a equação 13:

$$y = a + bx \quad (13)$$

Onde:

y representa o mapa que é a variável dependente;

x representa o mapa que é a variável explicativa;

e b sendo o coeficiente angular.

Os resultados obtidos por esta regressão podem ser observados na Tabela 5:

Tabela 5 - Resultados da correlação linear entre SVI e EqW.

R	0.026448
Teste de significância F	162.138123
$\sigma$ do mapa dependente	0.999998

Fonte: MORAES, 2019.

Como os resultados obtidos da regressão linear não foram satisfatórios, pois o valor de  $R^2$  ficou próximo de 0, significa que este modelo não é adequado para as variáveis da pesquisa, sendo necessário portanto, utilizar outro modelo de regressão.

O modelo de regressão escolhido foi o GWR (Regressão Geograficamente Ponderada) que é uma consequência da regressão dos métodos dos mínimos quadrados (OLS - *Ordinary Least Squares*), adicionando um nível de sofisticação de modelagem. Este modelo permite que a relação entre as variáveis independentes e dependentes variem por localidade. A GWR é frequentemente utilizada em epidemiologia, particularmente em pesquisas de doenças

infeciosas e na avaliação de políticas ou programas de saúde, como no estudo de Liu et al. (2011) e Yoo (2012). As limitações da GWR incluem problemas de multicolinearidade (WEELER et al., 2005).

A GWR utiliza um método estatístico de estimação de curvas de densidade, onde cada observação é ponderada pela distância em relação a um valor central, o núcleo, conhecido como Kernel,

A GWR é calculada a partir da equação 14, como pode-se observar abaixo:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon \quad (14)$$

Onde:

$y$  representa o mapa que é a variável dependente;

$x_1$  representa o mapa que é a variável explicativa;

$\beta_0 + \beta_1$  sendo os coeficientes;

e  $\varepsilon$ , o erro residual.

Nesta pesquisa, na GWR, o contexto espacial (o Kernel gaussiano) usado para resolver cada análise de regressão local é uma distância fixa, com validação cruzada, onde o próprio software encontrou o número ideal de vizinhos para a regressão. Obteve-se os seguintes valores (Tabela 6):

Tabela 6 - Resultados da GWR entre SVI e EqW.

Largura da banda	0,069900295
AIC	-103960,792238
QME	771,4388483
$\sigma$	0,109204394
R <sup>2</sup>	0,979343222
R <sup>2</sup> ajustado	0,979073271

Fonte: MORAES, 2019.

Os resultados obtidos com a GWR se mostraram satisfatórios, com R<sup>2</sup> próximo de 1, sendo a correlação entre os valores de EqW e SVI forte, onde a correlação do EqW com o SVI é forte. O que poderia ser identificado qualitativamente nos mapas de SVI e EqW, pois foi

verificado no item 5.3 que quando o EqW aumenta, o SVI também aumenta e quando o EqW diminui, o mesmo acontece com o SVI. Lembrando que a vegetação não responde automaticamente a oscilação do nível do EqW, pois ela tem um atraso (tempo de recuperação) de aproximadamente 1 mês, devendo-se levar em consideração os diferentes tipos de vegetação. Além disso, tem que se considerar que o EqW não depende somente da evapotranspiração, tendo relação também com a precipitação e o escoamento superficial e subterrâneo.



## 6 CONCLUSÃO

A metodologia utilizada, apresentou-se como uma opção para a avaliação de eventos de estiagens na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai, durante o período de estudo que abrange o intervalo de tempo entre 2003 a 2015.

Na presente pesquisa foram coletados dados da missão GRACE, a partir das *mascons*, e filtrados para a área de estudo, onde se obteve dados sobre o equivalente à altura d'água e foi realizado uma análise estatística obtendo os valores máximos, mínimos e médios do EqW e seu desvio padrão, além da geração de gráficos com as médias da bacia durante o período de estudo.

Os dados obtidos da missão GRACE foram comparados com os eventos de estiagem registrados pela Defesa Civil, onde pode-se observar a relação direta do aumento dos decretos de situação de emergência (SE) ou estado de calamidade pública (ECP) com a diminuição dos níveis do EqW na área supracitada, permitindo observar que declínio do nível do EqW inicia meses antes dos decretos, podendo perceber a que a estiagem está a caminho entre 1 ano a 6 meses (estiagens de 2005, 2009 e 2012) antes e se programar economicamente para o tal evento, pois a Bacia leva uns 4 meses para se recuperar do grande pico da estiagem.

Procurando validar os dados do EqW, eles foram comparados com as cotas das estações fluviométricas da ANA, verificando semelhanças no comportamento de ambos, principalmente na queda dos níveis de água, apresentando uma equivalência qualitativa. Entretanto, nos picos positivos com o EqW alto (corresponderiam aos eventos de inundação), não se teve essa correlação devido ao tipo de aquífero da região (predominantemente do tipo fraturado) onde o nível d'água responde mais rapidamente aos alteamentos a abaixamentos, e por isso estes eventos podem não ser sensíveis a missão GRACE devido a sua resolução temporal que é de 30 dias, o que dificultaria os estudo sobre eventos de inundação na Bacia.

A validação realizada com os dados dos poços subterrâneos da CPRM não se mostrou eficaz, visto que, embora os poços estejam localizados em aquíferos livres, eles não sofreram ou sofreram poucas modificações do nível d'água durante os eventos de estiagem, pois a recarga destes poços é predominantemente ascendente.

Os equivalentes à altura d'água tiveram uma boa correlação com os índices de vegetação normalizado (SVI), apresentando um declínio no vigor da vegetação aproximadamente no mesmo período em que ocorre a diminuição dos níveis do EqW. Observa-se que na área de estudo, há períodos em que não há correlação, o que pode estar associado ao fato da vegetação não se recuperar instantaneamente com o aumento dos níveis do EqW; ao tipo de vegetação ou ao estágio do cultivo agrícola no período.

As informações oriundas da missão GRACE podem auxiliar na gestão dos recursos hídricos da região e sua potencialidade e ampla divulgação para estudos hidrográficos devem ser mais aproveitadas.

A disponibilidade dos dados da missão GRACE é gratuita, o que é uma vantagem para a sua utilização. Entretanto, como a série temporal da missão GRACE ainda é pequena para estudos hidrológicos, sugere-se uma regressão dos dados para auxiliar nesses estudos e também prever o comportamento nos EqW no futuro, ajudando na gestão dos recursos hídricos. Sugere-se fazer a regressão para 30 anos com os EqW gerados pela missão GRACE, pois estudos hidrológicos necessitam de séries longas e, além disso, uma previsão ao comportamento do EqW ao longo dos anos.

Como a área estudada foi somente a porção brasileira da bacia, sugere-se novas pesquisas abrangendo toda área da Bacia, e também considerando trabalhar com a média do EqW para os diferentes aquíferos e tipos de solos.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA FILHO, F.G.V. **Variação temporal do campo gravitacional detectada pelo satélite GRACE: aplicação na bacia Amazônica**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, 2009.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. **Köppen's climate classification map for Brazil**. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: [http://www.lerf.eco.br/img/publicacoes/Alvares\\_etal\\_2014.pdf](http://www.lerf.eco.br/img/publicacoes/Alvares_etal_2014.pdf)
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: UNISINOS, 2003.
- AWANGE, J.L.; FLEMING, K.M.; KUHN, M.; FEATHERSTONE, W.E.; HECK, B.; ANJASMARA, I. **On the suitability of the 4°x4° GRACE mascons solutions for remote sensing Australian hydrology**. *Remote Sensing of Environment*. 2011. v. 115 (3): p. 864-875.
- AWANGE, J.L.; FOROOTAN, E.; KUSCHE, J.; KIEMA, J.B.K.; OMONDI, P.A.; HECK, B.; FLEMING, K.; OHANYA, S.O.; GONÇALVES, R.M. **Understanding the decline of water storage across the Ramser-Lake Naivasha using satellite-based methods**. *Advances in Water Resources*. 2013. v. 60, p. 7-23.
- AWANGE, J.L.; GEBREMICHAEL, M.; FOROOTAN, E.; WAKBULCHO, G.; ANYAH, R.; FERREIRA, V.G., ALEMAYEHU, T. **Characterization of Ethiopian mega hydrogeological regimes using GRACE, TRMM and GLDAS datasets**. *Advances in Water Resources*. 2014. v. 74, p. 64-78.
- BALMINO, G. **Gravity field recovery from GRACE: Unique aspects of the high precision inter-satellite data and analysis methods**. *Space Science Reviews*, v.108, n.1-2, pp. 47-54, 2003.
- BALMINO, G.; REIGBER Ch.; MOYNOT, B. **A geopotential model determined from recent satellite observing campaigns (GRIM 1)**. *Manuscriptae Geodaetica*, v. 1, n.1, 1976a.
- BALMINO, G.; REIGBER Ch.; MOYNOT, B. **The GRIM 2 Earth gravity field model**. Deutsche geodätische kommission. Report A-86, 1976b.
- BARTHELMES, F.; KÖHLER, W. **International Centre for Global Earth Models (ICGEM)**, 2016.
- BETTADPUR, S. **CSR level-2 processing standards document for product release 04, GRACE**. The GRACE Project. Center for Space Research, University of Texas at Austin, pp. 327-742, 2007.

BETTADPUR, S.; THE CSR LEVEL-2 TEAM. **Assessment of GRACE mission performance and the RL05 gravity fields**. Paper G31C-02, AGU Fall Meeting, San Francisco, CA Dec 2012.

BETTADPUR, S.; THE CSR LEVEL-2 TEAM. **Insights into the Earth system mass variability from CSR-RL05 GRACE gravity fields**. Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, EGU2012-6409, EGU General Assembly 2012. Disponível em: [http://www2.csr.utexas.edu/grace/Bettadpur\\_RL05.pdf](http://www2.csr.utexas.edu/grace/Bettadpur_RL05.pdf). Acesso em: 01 de ago. 2019.

BID. Banco Interamericano de Desenvolvimento. **Plano diretor de desenvolvimento sustentável da região da bacia do rio Uruguai - diagnóstico da região da bacia do rio Uruguai**. Disponível em: [http://4ccr.pgr.mpf.mp.br/informes/pdfs/Relatorio\\_Diagnostico\\_Versao%20Final.pdf](http://4ccr.pgr.mpf.mp.br/informes/pdfs/Relatorio_Diagnostico_Versao%20Final.pdf). Acesso em: 14 de jul. 2016.

BLITZKOW, D. **Banco de dados gravimétricos**. Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. Comunicação pessoal em 2006.

BLITZKOW, D. **O problema do valor de contorno da geodésia: resultados práticos para a América do Sul**. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Anuário brasileiro de desastres naturais: 2013**. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. Centro. Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. Brasília: CENAD, 2014.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012**. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2. ed. rev. ampl. Florianópolis: CEPED UFSC, 2013. Disponível em: <https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas>. Acesso em: 10 de jul. 2016.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Defesa Civil do Brasil. **Entenda os desastres**. Secretaria Nacional de Defesa Civil, Brasília-DF. 2012. Disponível em: <http://www.mi.gov.br/defesa-civil/cenad/entenda-os-desastres>. Acesso em: 10 de jul. 2016.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Sistema integrado de informações sobre desastres (S2iD)**. Disponível em: <https://s2id.mi.gov.br/>. Acesso em: 01 out. 2017.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Agrário. **Plano de Desenvolvimento Territorial Rural Sustentável do Território do Alto Uruguai Catarinense do Estado de Santa Catarina – PTDRS**. Curitiba, 2010. Disponível em: [http://sit.mda.gov.br/download/ptdrs/ptdrs\\_qua\\_territorio009.pdf](http://sit.mda.gov.br/download/ptdrs/ptdrs_qua_territorio009.pdf). Acesso em: 10 de jul. 2016

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Caderno da região hidrográfica do Uruguai**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília: MMA, 2006a. 128 p. Disponível em: [http://www.mma.gov.br/estruturas/161/publicacao/161\\_publicacao03032011023025.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/161/publicacao/161_publicacao03032011023025.pdf). Acesso em: 14 de jul. 2016.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Agência Nacional de Águas. **Bacias brasileiras do rio da Prata: avaliações e propostas**. Brasília: ANA, 2001. 102 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Agência Nacional de Águas. **Cadernos de recursos hídricos: disponibilidade e demanda de recursos hídricos no Brasil** / Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos – Agência Nacional de Águas. Brasília: TDA Desenho & Arte Ltda, 2005. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/planejamento/planos/pnrh/VF%20DisponibilidadeDemanda.pdf>>. Acesso em: 10 de ago. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Agência Nacional de Águas. **Cadernos de recursos hídricos 1: panorama da qualidade das águas superficiais no Brasil** / Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos – Agência Nacional de Águas. Brasília: TDA Desenho & Arte Ltda, 2005. Disponível em: [http://portalpnqa.ana.gov.br/publicacao/panorama\\_da\\_qualidade\\_das\\_aguas.pdf](http://portalpnqa.ana.gov.br/publicacao/panorama_da_qualidade_das_aguas.pdf)>. Acesso em: 10 de ago. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras – edição especial**. Brasília: ANA, 2015. 163 p. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/regioeshidrograficas2014.pdf>>. Acesso em: 10 de ago. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Agência Nacional de Águas. **Institucional**. 2017. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/institucional>>. Acesso em: 05 de out. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Agência Nacional de Águas. **Inventário das estações pluviométricas**. 2 ed. - Brasília: ANA; SGH, 2009. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/inf hidrologicas/InventariodasEstacoesPluviometricas.pdf>>. Acesso em: 05 de out. 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Agência Nacional de Águas. **Orientações para elaboração do relatório de instalação de estações hidrométricas**. Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica. Brasília: ANA, SGH, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Agência Nacional de Águas. **Região Hidrográfica do Uruguai**. 2006b. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/uruguai.aspx>. Acesso em: 14 de jul. 2016.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Sistema integrado de informações sobre desastres (S2ID)**. Disponível em: <https://s2id.mi.gov.br/>. Acesso em: 01 out. 2017.

BOMFIM, E. P.; MOLINA, E. C. **Análise da variação dos elementos do campo de gravidade na região do aquífero guarani a partir dos dados GRACE**. Revista Brasileira de Geofísica, n.29, 2009.

CAZENAVE, A.; CHEN, J. **Time-variable gravity from space and present-day mass redistribution in the Earth system**. Earth and Planetary Science Letters, pp. 298, 263-274, 2010.

CAZENAVE, A.; GUINEHUT, S.; RAMILLIEN, G.; LLOVEL, W.; DOMINH, K.; ABLAIN, M.; LARNICOL, G.; LOMBARD, A. **Sea level budget over 2003–2008; a reevaluation from satellite altimetry, GRACE and Argo data.** *Global Planet Change*, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.10.004>>.

CAZENAVE, A.; LLOVEL, W. **Contemporary sea level rise.** *Annu. Rev. Mar. Sci.* 2, 145–173, 2010.

CAZENAVE, A.; MERCIER, F.; BOUILLE, F.; LEMOINE, J.M. **Global-scale interactions between the solid Earth and its fluid envelopes at the seasonal time scale.** *Earth Planet. Sci. Lett.* 171, 549–559, 1999.

CAZENAVE, A.; REMY, F.; DOMINH, K.; DOUVILLE, H. **Global ocean mass variation, continental hydrology and the mass balance of the Antarctica ice sheet at the seasonal time scale.** *Geophys. Res. Lett.* 27, 3755–3758, 2000.

CASTRO, A. L. C. **Manual de desastres: desastres naturais.** Brasília (DF): Ministério da Integração Nacional, 2003. 182 p.

CEPED. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012: volume Brasil.** 2. ed. rev. ampl. – Florianópolis. CEPED/UFSC, 2013a. p. 126. Disponível em: <<https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/>>.

CEPED. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012: volume Santa Catarina.** 2. ed. rev. ampl. – Florianópolis. CEPED/UFSC, 2013b. p. 168. Disponível em: <<https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/>>.

CEPED. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012: volume Rio Grande do Sul.** 2. ed. rev. ampl. – Florianópolis. CEPED/UFSC, 2013c. p. 184. Disponível em: <<https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/>>.

CHEN, J.L.; WILSON, C.R.; TAPLEY, B.D.; YANG, Z.L.; NIU, G.Y. **The 2005 drought event in the Amazon river basin as measured by GRACE and climate models.** *Journal of Geophysical Research*, n.387, B05404, 2009.

CHAMBERS, D.P. **Evaluation of new GRACE time-variable gravity data over the ocean.** *Geophys. Res. Lett.* 33 (17), LI7603, 2006.

CHAMBERS, D.P.; BONIN, J.A. **Evaluation of release 05 time-variable gravity coefficients over the ocean.** *Ocean Science* 8, 859-868, 2012. Disponível em: <<http://www.ocean-sci.net/8/859/2012>>.

CHAMBERS, D. P. **Observing seasonal steric sea level variations with GRACE and satellite altimetry,** *J. Geophys. Res.*, 111 (C3), C03010, 10.1029/2005JC002914, 2006.

CHAMBERS D.P.; WAHR J.; TAMISIEA M.E.; NEREM R.S. **Ocean mass from GRACE and glacial isostatic adjustment,** submitted, 2010.

CHAMBERS, D.P.; WAHR, J.; NEREM, R.S. **Preliminary observations of global ocean mass variations with GRACE**. *Geophys. Res. Lett.* 31 (424), L13310, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2004GL020461>.

CHEN, J.L.; WILSON, C.R.; BLANKENSHIP, D.D.; TAPLEY, B.D. **Long-term and interannual variability of Greenland ice losses from satellite gravimetry**, *J. Geophys. Res.* (under review), 2010.

CHEN, J.L.; WILSON, C.R.; CHAMBERS, D.P.; NEREM, R.S.; TAPLEY, B.D. **Seasonal global water mass budget and mean sea level variations**. *Geophys. Res. Lett.* 25 (19), 3555–3558, 1998.

CHEN, J.L.; WILSON, C.R.; EANES, R.J.; TAPLEY, B.D. **Geophysical contributions to satellite nodal residual variation**. *J. Geophys. Res.* vol. 104 (No. B10), 23,237–23,244, 1999.

CHEN, J.L.; RODELL, M.; WILSON, C.R.; FAMIGLIETTI, J.S. **Low degree spherical harmonic influences on Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) water storage estimates**. *Geophys. Res. Lett.* 32, L14405, 2005a. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2005GL022964>.

CHEN, J.L.; WILSON, C.R.; TAPLEY, B.D.; FAMIGLIETTI, J.S.; RODELL, M. **Seasonal global mean sea level change from satellite altimeter, GRACE, and geophysical models**. *J. Geodesy* 79, 532–539, 2005b. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00190-005-0005-9>.

CHEN, J.L.; WILSON, C.R.; TAPLEY, B.D. **Satellite gravity measurements confirm accelerated melting of Greenland ice sheet**. *Science* 313, 2006a. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1129007>.

CHEN, J.L.; WILSON, C.R.; BLANKENSHIP, D.D.; TAPLEY, B.D. **Antarctic mass rates from GRACE**. *Geophys. Res. Lett.* 33, L11502, 2006b. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2006GL026369>.

CHEN, J.L.; TAPLEY, B.D.; WILSON, C.R. **Alaskan mountain glacial melting observed by satellite gravimetry**. *Earth Planet. Sci. Lett.* 248, 353–363, 2006c.

CHEN, J.L.; WILSON, C.R.; SEO, K.-W. **Optimized smoothing of gravity recovery and climate experiment (GRACE) time-variable gravity observations**. *J. Geophys. Res.* 111, B06408, 2006d. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2005JB004064>.

CHEN, J.L.; WILSON, C.R.; TAPLEY, B.D.; BLANKENSHIP, D.D.; IVINS, E. **Patagonia icefield melting observed by GRACE**. *Geophys. Res. Lett.* vol. 34, No. 22, L22501, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2007GL031871>.

CHEN, J.L.; WILSON, C.R.; TAPLEY, B.D.; BLANKENSHIP, D.; YOUNG, D. **Antarctic regional ice loss rates from GRACE**. *Earth Planet. Sci. Lett.* 266, 140–148, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.10.057>.

CHEN, J.L.; WILSON, C.R.; BLANKENSHIP, D.D.; TAPLEY, B.D. **Accelerated Antarctic ice loss from satellite gravity measurements**. Nat. Geosci. 2, 859–862, 2009a. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/NGEO694>.

CHEN, J.L.; WILSON, C.R.; TAPLEY, B.D.; LONGUEVERGNE, L.; YANG, Z.L.; SCANLON, B. R. **Recent La Plata basin drought conditions observed by satellite gravimetry**. Journal of Geophysical Research, n.115, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2010JD014689>.

CHENG, M; Tapley. B.D. **Variations in the Earth's oblateness during the past 28 years**, J. Geophys Res v109, B9, 2004.

COBRADE. **Classificação e codificação brasileira de desastres**. Disponível em: <http://www.integracao.gov.br/protacao-e-defesa-civil/centro-nacional-de-gerenciamento-de-riscos-e-desastres-cenad/entenda-os-desastres>>. Acesso em: 4 jul 2019.

CPTEC. Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br>>. Acesso em: 08 ago. 2019.

CPRM. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informação Geográfica folhas SH.22 Porto Alegre e SI.22 Curitiba**. Programa Geológico do Brasil. Brasília: CPRM, 2003.

CPRM. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. **Diagnóstico dos recursos hídricos subterrâneos do oeste do estado de Santa Catarina - projeto oeste de Santa Catarina**. Organizado por DE FREITAS, M. A.; CAYE, B. R; MACHADO, J. L. F. Porto Alegre: CPRM/SDM-SC/SDA-SC/EPAGRI. 2002. 100p.

CPRM. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. **Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Sul**. Programa Geologia do Brasil. Integração, Atualização e Difusão de Dados de Geologia do Brasil. Mapas Geológicos Estaduais Escala de 1: 750.000, 2008. CD-ROM.

CPRM. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. **Projeto a borda leste da Bacia do Paraná: integração geológica e avaliação econômica**. Rel. final, vol.I – texto. [S.l]: 1986.

CPRM. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. **Sistema de informações de águas subterrâneas, SIAGAS**. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>>. Acesso em: 13 de set. 2017.

DE LINAGE, C.; RIVERA L.; HINDERER, J.; BOY, J.P.; REGISTER, Y.; LAMBOTTE, S.; BIANCALE R. **Separation of coseismic and postseismic gravity changes for the 2004 Sumatra–Andaman earthquake from 4.6 yr of GRACE observations and modelling of the coseismic change by normal-modes summation**. Geophys. J. Int. 176, 695–714, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.04025.x>.

DICATI, R. **Stamping the earth from space**. Springer, Cham, 2017.



DREWES, H.; KUGLITSCH, F.; ADÁM, J. et al. **The Geodesists handbook 2016**. Journal of Geodesy (2016), 90(10), pp 907-1205. Disponível em: <https://doi.org/2010.1007/s00190-016-0948-z>.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Índices para a quantificação da seca**. Diego Simões Fernandes et al. –Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009.48 p. - (Documentos / Embrapa Arroz e Feijão, ISSN 1678-9644; 244). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAF-2010/29786/1/doc-244.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2019.

EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE. **Satélites de Monitoramento**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2013. Disponível em: <http://www.sat.cnpm.embrapa.br>. Acesso em: 16 jul. 2019

FALLER, J. E.; MARSON, I. **Ballistic methods of measuring g – the direct free-fall and symmetrical rise and fall methods compared**. Metrologia: 25:49-55, 1988.

FERREIRA, V. G. **Levantamentos gravimétricos**. Curitiba, 2007. Disponível em: <http://www.cartografica.ufpr.br/docs/Silvio/2012/gravimetria.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2017.

FERREIRA, V.; MONTECINO, H.D.C.; YAKUBU, C.L.; HECK, B. **Uncertainties of the Gravity Recovery and Climate Experiment time-variable gravity-field solutions based on three-cornered hat method**. 2016. J. Appl. Remote Sens. v. 10. 21 p.

FLECHTNER, F. **GFZ level-2 processing standards document for product release 04, GRACE 327-743**. Department 1: Geodesy and Remote Sensing, GeoForschungszentrum Potsdam, 2007.

FORTES, B. A. **Aspectos Fisiográficos, Demográficos e Econômicos do Rio Grande do Sul. Serviço Social da Indústria**, 1959.

FRAPPART, F.; RAMILLIEN, G.; BIANCAMARIA, S.; MOGNARD-CAMPBELL, N.; CAZENAVE, A. **Evolution of high-latitude snow mass derived from the GRACE gravimetry mission (2002–2004)**. Geophys. Res. Lett. 33, L02501, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2005GL024778>.

FREITAS, M. A. de.; MACHADO, J. L. F.; VIERO, A. C.; TRAININI, D. R.; GERMANO, A. de O.; GLUGLIOTTA, A. P.; CAYE, B. R.; PIMENTEL, G. de B.; GOFFERMANN, M.; da SILVA, P. R. R. **Mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul: um avanço no conhecimento das águas subterrâneas no estado**. In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas (ABAS). Cuiabá, MT. 2004. p. 1-14.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Plano nacional de recursos hídricos**. Proposta elaborada para o Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, de acordo com o Contrato Administrativo Nº 003/96. [S.l.]: 1998.

GEMAEL, C. **Introdução à geodésia física**. Curitiba: Editora da UFPR, 2002. 302p.

GETIRANA, A. **Extreme Water Deficit in Brazil Detected from Space**. J. Hydrometeorol. 17, 591–599, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0096.1>

GIASSOM, E.; INDA JR, A.V.; NASCIMENTO, P.C. **Relatório final de consultoria para classificação taxonômica dos solos do estado do Rio Grande do Sul segundo o sistema brasileiro de classificação de solos e avaliação da classe de resistência à impactos ambientais**. Porto Alegre: FEPAM, 2005, 11p.

GONÇALVES, E. F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. M. **Distribuição dos desastres naturais no Estado de Santa Catarina: estiagem (1980-2003)**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1., 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. p. 773-786.

GUENTNER, A. **Improvement of global hydrological models using GRACE data**. Surv. Geophys. 29, 375–397, 2008.

GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. **Degradação ambiental**. In: Geomorfologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p 455., 1995.

HAGMAN, G.: **Prevention better than cure, report on human and environmental disasters in the third world**. Swedish Red Cross, Stockholm, 1984.

HERMANN, M. L. P.; ROSA, R. **Relevo**. In: IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Geografia do Brasil: Região Sul. Rio de Janeiro: 1990. p. 59-83.

HUETE, A.; KEITA, F.; THOMÉ, K.; PRIVETTE, J.; VAN LEEUWEN, W.J.D.; JUSTICE, C.; MORISSETTE, J. **A light aircraft radiometric package for MODLAND quick airborne looks (MQUALS)**. Earth Observer, v.11, n. 1, p. 22, 1999

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento de recursos naturais: folha SH.22 Porto Alegre e parte das folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim**. Rio de Janeiro: IBGE, 1986 (Vol.33).

INSTITUTO NACIONAL DE GESTÃO DE CALAMIDADES. **Atlas para preparação e resposta contra desastres na Bacia do Limpopo**. Cidade do Cabo, 2003. 99 p. (Creda Communications).

IPCC, 2007. **IPCC 4th assessment report, climate change 2007: the physical science basis**. In: SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K.B., TIGNOR, M., MILLER, H.L. (Eds.), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA.

JORGE, F. V. **A dinâmica pluvial do clima subtropical: variabilidade e tendência no sul do Brasil**. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Setor de Ciências da Terra. 2015. Universidade Federal do Paraná: Curitiba, 181p.

JUSTICE, C. O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, P. D.; HALL, D. K.; SALOMONSON, V.; PRIVETTE, J. L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, B.; KNYAZIKHIN, Y.; RUNNING, W. S.; NEMANI, R. R.; WAN,

Z.; HUETE, A. R.; LEEUWEN, W. V.; WOLFE, R. E.; GIGLIO, L.; MULLER, J. P.; LEWIS, P.; BARNSLEY, M. **The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research.** IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 36, n. 4, p.1228-1247, 1998.

KAHN, M. A. **Satellite contributions to geophysical exploration at sea.** In CRC Handbook of Geophysical Exploration at Sea, R. A. Geyer, ed., pp. 3-68. Boca Raton: CRC Press, 1983.

KEMP, K. **Environmental modelling with GIS: a strategy for dealing with spatial continuity.** Ph.D. thesis, Department of Geography, University of California, Santa Barbara, 1992. NCGIA Technical Report 93-3.

KISS, A.; FÖLDVÁRY L. **Comparison of seasonal hydrologic variations in the La Plata basin from GRACE monthly solutions with in situ gauge water level data.** Acta Geodyn. Geomater., 14, No. 2 (186), 145–152, 2017.

KLEES, R.; LIU, X.; WITTEW, T.; GUNTER, B.C.; REVTOVA, E.A.; TENZE, R.; DITMAR, P.; WINSEMIUS, H.C.; SAVENIJE, H.H.G. **A comparison of global and regional GRACE models for land hydrology.** Surv. Geophys. 29, 335–359, 2008.

KOBIYAMA, M. et al. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos.** Curitiba: Organic Trading, 2006. 109p. Disponível em: <http://logatti.edu.br/images/prevencaodesastres.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2019.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. **World map of the Köppen-Geiger climate classification updated.** Meteorol. Z., 15, 259-263, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.

KUSCHE, J.J. **Approximate decorrelation and non-isotropic smoothing of time-variable GRACE-type gravity field models.** J Geod 81:733–749, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0143-3>.

LEMOINE, F.G.; LUTHCKE, S.B.; ROWLANDS, D.D.; CHINN, D.S.; BOY, J.; COX, C.M.; KLOSKO, S.M. **Mascons Solutions from GRACE,** AGU Fall Meeting 2005. Abstract #G33C-0062, 2005.

LEMOINE, J.M.; BRUINSMA, S.; LOYER, S.; BIANCALE, R.; MARTY, J.C.; PEROSANZ, F.; BALMINO, G. **Temporal gravity field models inferred from GRACE data.** Adv. Space Res. vol. 39 (Issue: 10), 1620–1629, 2007.

LIBAULT, A. **Os quatro níveis da pesquisa geográfica.** Métodos em Questão. (1). São Paulo: IGEO/USP, 1971.

LIU, Y.; JIANG, S.; WANG, R.; LI, X.; YUAN, Z.; WANG, L.; XUE, F. **Spatial epidemiology and spatial ecology study of worldwide drug-resistant tuberculosis.** International Journal of Health Geographics 10:50, 2011. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3173290/pdf/1476-072X-10-50.pdf>

LLOVEL, W.; BECKER, M.; CAZENAVE, A.; CRETAUX, J.F.; RAMILLIEN, G. **Global land water storage change from GRACE over 2002–2009; inference on sea level.** C.R. Geosciences 342, 179–188, 2010a.

LLOVEL, W.; GUINEHUT, S.; CAZENAVE, A. **Regional and interannual variability in sea level over 2002–2009 based on satellite altimetry, Argo float data and GRACE ocean mass.** Ocean Dyn. in revision, 2010b.

LOMBARD, et al. **Estimation of steric sea level variations from combined GRACE and Jason-1 data.** Earth Planet. Sci. Lett. 254, 194–202, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.11.035>.

LONGUEVERGNE, L.; SCANLON B.R.; WILSON C.R. **GRACE hydrological estimates for small basins: evaluating processing approaches on the High Plains Aquifer, USA.** Water Resour. Res., under press, 2010.

LUTHCKE, S.B.; ARENDT, A.A.; ROWLANDS, D.D.; MCCARTHY, J.J.; LARSEN, C.F. **Recent glacier mass changes in the Gulf of Alaska region from GRACE mascons solutions.** J. Glaciol. 54 (188), 767–777, 2008a.

LUTHCKE, S.B.; ROWLANDS, D.D.; ARENT, A.; MCCARTHY, J.J.; ZWALLY, H.J.; LEMOINE, F.G.; BOY, J.P. **GRACE observations of land ice evolution. Proceedings of the 2008 GRACE Science Team Meeting: The GRACE Project.** Center for Space Research, University of Texas at Austin, pp. 617–631, 2008b.

LUTHCKE, S. B.; SABAKA, T.; LOOMIS, B.; ARENDT, A.; MCCARTHY, J.; CAMP, J. **Antarctica, Greenland and Gulf of Alaska land-ice evolution from an iterated GRACE global mascons solution.** J. Glaciol., 59(216), 613–631, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3189/2013JoG12J147>.

LUTHCKE, S.B.; ZWALLY, H.; ABDALATI, W.; ROWLANDS, D.; RAY, R.; NEREM, R.; LEMOINE, F.; MCCARTHY, J.; CHINN, D. **Recent Greenland ice mass loss by drainage system from satellite gravity observations.** Science 314, 1286–1289, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1130776>.

MARCELINO, E. V. **Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos.** Santa Maria: INPE-15208-PUD/193, 2008. Disponível em: <http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.02.16.22/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 13 de set. 2017.

MATLAB and Statistics Toolbox Release 2017a, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.

MEDEIROS, D. M. **Geodésia Aplicada ao Monitoramento Hidrológico da Bacia Amazônica.** 2016. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

MELATI, M. D.; MARCUZZO, F. F. N. **Mapeamento fisiográfico básico das sub-bacias pertencentes à Bacia do Rio Uruguai.** XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos,

Brasília, 2015. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/15053>. Acesso em: 09 nov. 2019.

MILOGRANA, J. **Sistemática de auxílio à decisão para a seleção de alternativas de controle de inundações urbanas**. Tese de Doutorado – Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – Universidade de Brasília. 2009.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Caderno da Região Hidrográfica do Uruguai**. Secretaria de Recursos Hídricos. – Brasília: MMA, 2006. Disponível em: < [http://www.mma.gov.br/estruturas/161/\\_publicacao/161\\_publicacao03032011023025.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao03032011023025.pdf)>. Acesso em: 14 de jul. 2016.

MOLODENSKII, M. S.; EREMEEV, V. F.; YURKINA, M. I. **Methods for study of the external gravitational field and figure of the Earth**. Jerusalém: Israel Program for Scientific Translations, 1962.

MONIN, I. F. **Solution of the m. S. Molodenskii integral equation defining the figure of the earth's physical surface with allowance for third-order terms**. Soviet Astronomy, v. 9, n. 1, p. 141-145, 1965.

MONTECINO, H.C.; STAUB, G.; FERREIRA, V.G.; PARRA, L.B. **Monitoring groundwater storage in northern Chile based on satellite observations and data simulation**. Boletim de Ciências Geodésicas. 2016. v. 22 (nº1): p. 1-15.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística básica**. 6. ed. rev. atual. São Paulo: Saraiva, São Paulo: Saraiva, 2014.

MORITZ, H. **The boundary value problem of physical geodesy**. International Association of Geodesy, Helsinki: Publ. Isostat. Inst., 1965.

MORITZ, H. **On the use of terrain correction in solving Molodensky's problem**. Columbus: Department of Geodetic Science, Ohio State University, 1968, 46 p. Relatório científico.

MORITZ, H. **Advanced physical geodesy**. Karlsruhe: Wichmann, 1980. PAVLIS, N. K.; SIMON, H. A.; STEVE, K. C.; JOHN, F. K. A

OLIVEIRA, L. G. de; ENDO, I.; BLITZKOW, D. **Estimativa da espessura elástica efetiva da litosfera do sul do Cráton São Francisco usando dados da missão GRACE**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 26, p. 555-568, 2008.

PAVLIS, N. K.; SIMON, H. A.; STEVE, K. C.; JOHN, F. K. **An Earth gravitational model to degree 2160**. In: EGU General Assembly, 2008, Vienna. Disponível em: < [http://mt.dgfi.tum.de/typo3\\_mt/fileadmin/2kolloquium\\_muc/2008-10-08/Bosch/EGM2008.pdf](http://mt.dgfi.tum.de/typo3_mt/fileadmin/2kolloquium_muc/2008-10-08/Bosch/EGM2008.pdf)>. Acesso em: 28 de ago. 2017.

PETERS, A.J., WALTER-SHEA, E.A., JI, L., VINA, A., HAYES, M. and SVOBODA, M.D. **Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index**. Photogrammetric engineering and remote sensing, 68(1), pp.71-75, 2002.

PICK, M.; PÍCHA, J.; VYSKOČIL, V. **Theory of the Earth's gravity field**. Amsterdam: Elsevier, 1973.

PIRES, V. **Frequência e intensidade de fenômenos meteorológicos extremos associados a precipitação**. 2003. 98 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia da Terra) – Universidade de Lisboa, Portugal.

PROFILL. **Processo de Planejamento da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí, Fases A e B**. Secretaria Estadual do Meio Ambiente, Rio Grande do Sul, 93p, 2011.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2019. Disponível em: <http://www.R-project.org>.

RADAMBRASIL. **Levantamento de recursos naturais, folha SH.22 Porto Alegre e parte das folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim**. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE, 1986 v.33.

RADAMBRASIL. **Levantamento de recursos naturais: folha SG.22 Curitiba e parte da folha SG.21 Assuncion**. Rio de Janeiro: IBGE, 2005 (Vol.34).

RAMILLIEN, G., et al. **Global time variations of hydrological signals from GRACE satellite gravimetry**. *Geophysical Journal International*, n. 158, p. 813-826, 2004.

RAMILLIEN, G. **Time variations of the land water storage from an inversion of 2 years of GRACE geoids**. *Earth and Planetary Science Letters*, n. 235, p.283-301, 2005.

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

RIBEIRO NETO, G. G. **Monitoramento e caracterização de secas da América do Sul com sensoriamento remoto**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

RIGHI, E. **Metodologia para zoneamento de risco a inundações graduais**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

RIGHI, E. **Risco a inundação em médio curso do rio Uruguai: um estudo de caso nos municípios de Porto Lucena e São Borja**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

RISSO, J.; RIZZI, R.; EPIPHANIO, R. D. V.; RUDORFF, B. F. T.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; FERNANDES, S. L. **Potencialidade dos índices de vegetação EVI e NDVI dos produtos MODIS na separabilidade espectral de áreas de soja**. *Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 386-389.

<http://mar.te.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.00.07/doc/379-386.pdf>. Acesso em: 18 de jul. 2019.

**ROBAINA, L. E. S.; RECKZIEGEL, B. W.; WOLLMANN, C. A. Contribuição geográfica sobre os desastres naturais provocados por eventos atmosféricos extremos no Rio Grande do Sul.** Geografia Ensino & Pesquisa, v. 17, n.1, jan./abr. 2013. Disponível em: < <https://periodicos.ufsm.br/geografia/article/view/8742/pdf>>. Acesso em: 19 de jul. 2019.

**ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R.; BAZZAN, T.; RECKZIEGEL, E. W.; VERDUM, R.; DE 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. Disponível em:< <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/148/142>>. Acesso em: 28 de ago. 2017.

**RODELL, M.; HOUSER, P.R.; JAMBOR, U.; GOTTSCHALCK, J.; MITCHELL, K.; MENG, C. J.; ARSENAULT, K.; COSGROVE, B.; RADA KOVICH, J.; BOSILOVICH, M.; ENTIN, J.K.; WALKER, J.P.; LOHMANN, D.; TOLL, D. The global land data assimilation system.** Bull. Am. Meteorol. Soc. 85 (3), 381–394, 2004a.

**RODELL, M., FAMIGLIETTI, J.S., CHEN, J., SENEVIRATNE, S.I., VITERBO, P., HOLL, S., WILSON, C.R. Basin scale estimates of evapotranspiration using GRACE and other observations.** Geophys. Res. Lett. 31, L20504, 2004b. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2004GL020873>.

**RODELL, M.; VELICOGNA, I.; FAMIGLIETTI, J. S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India.** Nature vol. 460, 20, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature08238>.

**ROSENHAIM, T. L. Observações da missão GRACE aplicadas ao monitoramento do armazenamento d'água na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

**ROSS, J. L. S. Geomorfologia: ambiente e planejamento.** 7 ed. São Paulo: Contexto. 2003 85p.

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

**ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS.** In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., Washington, 1973. Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite- 1 Symposium. Greenbelt, NASA SP-351. p.301-317, 1973.

**ROWLANDS, D.; LUTHCKE, S.; MCCARTHY, J.; KLOSKO, S.; CHINN, D.; LEMOINE, F.; BOY, J. P.; SABAKA, T. Global mass flux solutions from GRACE: A comparison of parameter estimation strategies—Mass concentrations versus stokes coefficients.** J. Geophys. Res., 115, B01403, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2009JB006546>.

SÁ, N.C. **Elementos de geodésia**. Texto de aulas, Universidade de São Paulo – IAG, São Paulo, 1990.

SÁ, N. C. **Reduções e observações gravimétricas: teoria e prática**. Universidade de São Paulo – IAG. 90 p. 1994.

SÁ, N.C.; USSAMI, N.; MOLINA, E.C. **Gravity map of Brazil 1: representation of free-air and Bouguer anomalies**. *Journal of Geophysical Research*, Washington, 98: 2187–2197, 1993.

SABAKA, T.; ROWLANDS, D.; LUTHCKE, S.; BOY, J. P. **Improving global mass flux solutions from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) through forward modeling and continuous time correlation**. *J. Geophys. Res.*, 115, B11403, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2010JB007533>.

SANTOS, H. G. dos; CARVALHO JUNIOR, W. de; DART, R. de O.; AGLIO, M. L. D.; SOUSA, J. S. de; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. da S.; OLIVEIRA, A. P. de. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p. (Embrapa Solos. Documentos, 130.) 1 mapa, color. Escala 1:5.000.000. Disponível em: <http://geoinfo.cnps.embrapa.br/maps/616>.

SAVE, H. **CSR GRACE RL06 Mascon Solutions**. Texas Data Repository Dataverse, V1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.18738/T8/UN91VR>.

SAVE, H.; BETTADPUR, S.; TAPLEY, B.D. **High resolution CSR GRACE RL05 mascons**. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2016JB013007>.

SCANLON, B.R.; ZHANG, Z.; SAVE, H.; WIESE, D.N.; LANDERER, F.W.; LONG, D.; LONGUEVERGNE, L.; CHEN, J. **Global evaluation of new GRACE mascon products for hydrologic applications**. *Water Resour. Res.* 52, 9412–9429, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2016WR019494>

SCHMIDT, R.; FLECHTNER, F.; REIGBER, C.H.; SCHWINTZER, P.; GÜNTER, A.; DOLL, P.; RAMILLIEN, G.; CAZENAVE, A.; PETROVIC, S.; JOCHMAN, H.; WUNSCH, J. **GRACE observations of changes in continental water storage**. *Glob. Planet. Change* 50 (1–2), 112–126, 2006.

SCHMIDT, R.; FLECHTNER, F.; MEYER, U.; NEUMAYER, K.H.; DAHLE, C.H.; KONIG, R.; KUSHE, J. **Hydrological signals observed by the GRACE satellites**. *Surf. Geophys.* 29, 319–334, 2008.

SENA, J. N.; **O uso de sistema de informação geográfica na avaliação de diferentes alternativas de geração de cartas de suscetibilidade à erosão**. Dissertação de Mestrado - UNESP, 2008.

SEO, K.W.; WILSON, C.R.; HAN, S.C.; WALISER, D.E. **Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) alias error from ocean tides**. *J. Geophys. Res.* 113, B03405, 2008.



SEO, K.W.; WALISER, D.E.; TIAN, B.; FAMIGLIETTI, J.S.; SYED, T.H. **Evaluation of global land-to-ocean fresh water discharge and evapotranspiration using space-based observations.** *Journal of Hydrology* 373, 508–515, 2009.

SIMIONI, J. P. D.; ROVANI, F. F. M.; IENSSE, A. C.; WOLLMANN, C. A. **Caracterização da precipitação pluviométrica na bacia hidrográfica do rio Ibicuí, RS.** *Revista do Departamento de Geografia – USP, Volume 28 (2014), p. 112-133.*

SILVA, J. E. B.; GUERRA, A.J.T. **Análise das propriedades dos solos das sub-bacias do rio Tindiba e do córrego do Catonho,** Rio de Janeiro, com fins à identificação de áreas com predisposição à erosão. In: *Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 7., 2001, Goiânia.*

SILVA, A.; SANTO, F.; PIRES, V. **A seca em Portugal: prevenção, monitorização e mitigação.** 2005. Disponível em:  
<http://panda.igeo.pt/pancd/pdfs/seca2005/FatimaEspiritoSanto.pdf>.

SOUSA JÚNIOR, M. A. **Gestión de información geoespacial para gestión de riesgos y respuesta en caso de desastres.** Curso de Capacitación de ONU-SPIDER a Ecuador, Oficina de Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Ultraterrestre, Ecuador, 2019. Disponível em: [www.unoosa.org](http://www.unoosa.org).

SOUSA JUNIOR, M. A.; PARDI LACRUZ, M. S. **Capítulo 6 - Sensoriamento Remoto para Seca / Estiagem.** em: SAUSEN, T. M.; PARDI LACRUZ, M. S. *Sensoriamento Remoto para Desastres.* 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 285 p.

SOUSA JUNIOR, M. A.; SAUSEN, T.M.; PARDI LACRUZ, M. S. **Monitoramento de estiagem na região Sul do Brasil utilizando dados EVI/MODIS no período de dezembro de 2000 a junho de 2009.** São José dos Campos: Inpe, 2010 p. (INPE-16682-TDI/1627).

Disponível em:

<<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.20.12.38/doc/p0795.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2019.

STRASSBERG, G.; SCANLON, B. R.; CHAMBERS, D. **Evaluation of groundwater storage monitoring with the GRACE satellite: Case study of the High Plains aquifer, central United States.** *Water Resources Research*, vol. 45, w05410, 2009. Disponível em: <<http://doi:10.1029/2008wr006892>>.

SUN, T.; FERREIRA, V.; HE, X.; ANDAM-AKORFUL, S. **Water Availability of São Francisco River Basin Based on a Space-Borne Geodetic Sensor.** *Water* 8, 213, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w8050213>

SWENSON, S.C. **GRACE monthly land water mass grids NETCDF RELEASE 5.0.** Ver. 5.0. PO. DAAC, CA, USA, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5067/TELND-NC005>>. Acesso em: 03 de out. 2017.

SWENSON, S. C.; CHAMBERS, D. P.; WAHR; J. **Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output.** *J Geophys. Res.-Solid Earth*, Vol 113, Issue: B8, Article B08410. 2008.

SWENSON, S. C.; WAHR, J. **Methods for inferring regional surface-mass anomalies from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) measurements of time variable gravity.** Journal of Geophysical Research. v. 107 (B9), ETG, p.1- 13, 2002.

SWENSON, S. C.; WAHR, J. **Post-processing removal of correlated errors in GRACE data,** Geophys. Res. Lett., 33, L08402, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2005GL025285>. Acesso em: 07 de ago. 2017.

TAPLEY, B.D.; BETTADPUR, S.; WATKINS, M.; et al. **The gravity recovery and climate experiment: mission overview and early results.** Geophysical Research Letters, v. 31, L09607, 2004a.

TAPLEY, B.D.; BETTADPUR, S.; RIES, J.C. **GRACE measurements of mass variability in the Earth system.** Science, n. 305, pp. 503-505, 2004b.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIJF, R. E. **Prospecting - geophysical methods.** New York: Cambridge University Press. 1990.760p.

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. & KEYS, D.A. **Applied geophysics.** Cambridge: Cambridge University, 860p. 1976.

TEIXEIRA, G.V.; VIERO, A.P. **Hydrogeochemical evolution of mesozoic aquifers in the southern Paraná basin in western Rio Grande do Sul state, Brazil.** Revista Águas Subterrâneas, 2017, 31(1):36-51. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/ras.v31i1.28577>

THE WORLD DATA CENTER FOR REMOTE SENSING OF THE ATMOSPHERE. **Missions & Sensors.** Disponível em: <http://wdc.dlr.de/sensors/>. Acesso em 01 jun. 2019.

TORGE, W. 1989. **Gravimetry,** Walter De Gruyter, Berlin-NY.

TUCCI, C.E.M. (org.) **Hidrologia – ciência e aplicação.** 3 ed. Porto Alegre, Editora da Universidade/ABRH, 2004.

VIEIRA, E. F. **Rio Grande do Sul: geografia física e vegetação.** Ed Sagra, Porto Alegre, 1984.

VIGLIZZO E.F.; FRANK F.C. **Ecological interactions, feedbacks, thresholds and colapses in the Argentine Pampas in response to climate and farming during the last century.** 454 Quaternary International 158 (1): 122-126, 2006.

WAHR, J.; MOLENAAR, M.; BRYAN, F. **Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE.** Journal of Geophysical Research, n. 103 (B12), p. 30205-20229., 1998.

WAHR, J.; SWENSON, S.; ZLOTNICKI, V.; VELICOGNA, I. **Time variable gravity from GRACE: First results.** Geophysical Research Letters, n. 31, L11501, 2004.

WAHR, J.; SWENSON S.; VELICOGNA I. **Accuracy of GRACE mass estimates.** Geophysical Research Letters, n. 33, L06401, 2006.

WANG, L., QU J. J. **NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing.** *Geophysical Research Letters*, n. 34, L20405, 2007.

WATKINS, M. M.; WIESE, D. N.; YUAN, D. N., BOENING, C.; LANDERER, F. W. **Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons.** *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 2648–2671, 2015. Disponível em: <http://doi.org/10.1002/2014JB011547>.

WERTH, S.; GÜNTNER, A.; SCHMIDT, R.; KUSCHE, J. **Evaluation of GRACE filter tools from a hydrological perspective.** *Geophysical Journal International*, Volume 179, Issue 3, December 2009, Pages 1499–1515. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04355.x>.

WHEELER, D.; TIEFELSDORF, M. **Multicollinearity and correlation among local regression coefficients in geographically weighted regression.** *Journal of Geographical Systems* 7(2):161-187, 2005. Disponível em: <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs10109-005-0155-6>

WHEELER, D. C.; PÁEZ, A. **Geographically Weighted Regression.** MM Fischer & A Getis (Eds.) *Handbook of Applied Spatial Analysis: Software Tools, Method, and Application* (pp. 461-486). Heidelberg: Springer, 2010. Disponível em: [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-03647-7\\_22](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-03647-7_22)

WILHITE, D.A. **Drought assessment, management, and planning: theory and case studies.** Springer Science+Business Media New York, 1993.

WILHITE, D.A.; GLANTZ, M.H. **Understanding the drought phenomenon: the role of definitions.** Drought Mitigation Center Faculty Publications. Paper 20, 1985.

YIRDAW, S.Z. **Implications of GRACE satellite gravity measurements for diverse hydrological applications.** Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Manitoba. Winnipeg, Manitoba, Canadá, 2010.

YIRDAW, S. Z.; K. R. SNELGROVE. **Validation of regional precipitation minus evaporation using a coupled GRACE driven moisture storage and measured basin runoff,** *Eos Trans. AGU*, 87(52): Fall Meet. Suppl., GC41A-1031, 2006.

YIRDAW, S. Z.; SNELGROVEK. R.; AGBOMA, C. O. **GRACE satellite observations of terrestrial moisture changes for drought characterization in the Canadian Prairie.** *J. Hydrology*, 356 (1-2): 84-92.

YIRDAW, S. Z.; SNELGROVEK. R.; SEGLENIEKS, F. R.; AGBOMA, C. O.; SOULIS E. D. **Assessment of the WATCLASS hydrological model result of the Mackenzie River Basin using the GRACE satellite total water storage measurement.** *Hydrological Processes*, 23:23, 3391-3400, 2009.

YOO, D. **Height and death in the Antebellum United States: a view through the lens of geographically weighted regression.** *Economics and Human Biology* 10(1):43-53, 2012. Disponível em: [http://ac.els-cdn.com/S1570677X11000979/1-s2.0-S1570677X11000979-main.pdf?\\_tid=4bf65a14-a561-11e2-becc-00000aab0f26&acdnat=1365984988\\_90669ba97e9bcc4891c1f68e237a1e94](http://ac.els-cdn.com/S1570677X11000979/1-s2.0-S1570677X11000979-main.pdf?_tid=4bf65a14-a561-11e2-becc-00000aab0f26&acdnat=1365984988_90669ba97e9bcc4891c1f68e237a1e94)

XAVIER, L. N. R. ; BECKER, M.; CAZENAVE, A.; et al. **Interannual variability in water storage over 2003–2008 in the Amazon Basin from GRACE space gravimetry, in situ river level and precipitation data.** Remote Sensing of Environment, v. 114, n. 8, pp. 1629-1637, 2010.

XAVIER, L. N. R. **Modelagem Hidrológica com o Aporte de Dados da Missão Espacial GRACE: Aplicação a Bacias Brasileiras.** 2012. 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

XAVIER, M. B. **Detecção de erros grosseiros no banco de dados gravimétrico terrestre do estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS – BR, 2009.

## ANEXO A - CÓDIGO PARA O CÁLCULO DO TWS

```
%% scr mascon data

addpath('./TWS/')
% addpath('./Basins/')

load TWS_mascon_csr_r105
%% compute the trends

[r,c,~] = size(TWS);
trnds = zeros(r,c);
for i = 1:r
    for j = 1:c
        a = polyfit(Time(:,4),squeeze(TWS(i,j,:)),1);
        trnds(i,j) = a(1);
    end
end
clear i j a

%% plot the results for Brazil (South America)
figure()
map = worldmap([-40 10],[-80 -30]);
setm(map,'LabelFormat','none','MLabelParallel',-40,'PlabelMeridian',-80,...
    'PLabelLocation',10,'MLabelLocation',10,'MLineLocation',10,...
    'PLineLocation',8,...
    'FontName','Times New Roman','FontSize',14,'GLineWidth',0.5,...
    'glinestyle',':','GColor','black',...
    'MapProjection','pcarree');

R = georasterref('RasterSize', size(trnds), ...
    'Latlim', [-90 90], 'Lonlim', [-180 180]);

geoshow(trnds,R,'DisplayType', 'surface')
colormap(flipud(jet(256))); caxis([-20 20]);

load coastlines
plotm(coastlat,coastlon,'k','LineWidth',1)
tightmap

set(gca,'FontName','Times New Roman','FontSize',14)

hcb = colorbar('eastoutside');
set(get(hcb,'Ylabel'),'string','Long-term changes of TWS (mm/yr)','FontName','Times New Roman','FontSize',14);
setm(gca,'FLineWidth',2)

%% Extract the mean value within a given basin

% sotre the time series for the basins
TWS_AVG = zeros(length(Time),1);
```

```

% calculating the area of each cell in km2
s = referenceSphere('Earth','km');
% load the basin
load uruguai
[in] = inpolygon(Lon,Lat,Lon_B,Lat_B);
% cells within the basin
lon1 = Lon(in);
lat1 = Lat(in);
nc = length(lon1);
% areas of each cell
A_i = zeros(nc,1);
for j = 1:nc
    A_i(j) = areaquad(lat1(j)-0.25,lon1(j)-0.25,lat1(j)+0.25,lon1(j)+0.25,s);
end
A_x = sum(A_i); % the approximated area of the basin (region)
% weighted averaged time series
for i = 1:length(Time)
    tws = TWS(:,i); tws = tws(in);
    TWS_AVG(i) = sum(A_i.*tws)./A_x;
end

%% Plot the averaged series and linear trend
figure()

x = Time(:,4);
y = TWS_AVG(:);
plot(x,y,'-x','LineWidth',1)
% linear fit
p = polyfit(x,y,1);
y1 = polyval(p,x);
hold on
plot(x,y1,'--k');
grid off
ylim([-100 250]);
xlim([2002 2018]);
title('Bacia do Paraná','FontName','Times New Roman','FontSize',11);
xlabel('Time (year)','FontName','Times New Roman','FontSize',11)
ylabel('TWS (mm)','FontName','Times New Roman','FontSize',11)
legend('TWS time series','Trend line','Location','best');
set(gca,'FontName','Times New Roman','FontSize',11)

```

## ANEXO B - CÓDIGO PARA O CÁLCULO DO SVI

# ToDo (data preparation):

- # 1. Download MOD13Q1 data at <https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/>
- # 2. Create two folders, where you will store all data, one for the EVI files and one for the Pixel Reliability files,  
# e.g. C:/Data\_EVI and C:/Data\_Pixel\_Reliability.
- # 3. In both folders for each day of the year (DOY) create one subfolder. The name of each folder must start with "DOY\_", e.g. DOY\_033.
- # 4. Rename the files by adding a prefix following the pattern DOY\_YYYY\_, e.g. 033\_2001 or 001\_2005.
- # Total Commander is a useful tool to rename multiple files. (Download Link: <http://www.ghisler.com/index.htm>)
- # Renaming the files is important to automatize the filenames and the titles of the resulting maps.
- # 6. Sort the EVI and Pixel Reliability data according to the DOY in the respective folders
- # 7. Create another subfolder within the EVI data folder called "shape". Store the shapefile with the country border here.
- # 8. Adjust the capture of the resulting jpg map to fit your area of interest in line 116

# installing relevant packages

install.packages("raster") # you only have to do this once

install.packages("rgdal") # you only have to do this once

install.packages("sp") # you only have to do this once

library(raster)

library(rgdal)

library(sp)

# load borders

border <- shapefile("C:/User/MOD13Q1/Data/shape/gadm36\_GTM\_0.shp") # ToDo: insert link to the shapefile with the country borders

# download country borders as shapefiles: <http://www.gadm.org/download>

path <- "C:/User/MOD13Q1/Data/Data\_EVI" # ToDo: enter link to the folder where you have stored the MODIS EVI data

dlist <- dir(path,pattern="DOY")

path\_c <- "C:/User/MOD13Q1/Data/Data\_Pixel\_Reliability" # ToDo: enter link to the folder where you have stored the MODIS Pixel Reliability data

dlist\_c <- dir(path\_c,pattern="DOY")

path\_jpg <- "C:/User/MOD13Q1/Data/SVI\_Maps\_Guatemala\_jpg" # ToDo: enter the link to the folder where you want to store the resulting .jpg-images.

path\_tif <- "C:/User/MOD13Q1/Data/SVI\_Maps\_Guatemala\_jpg" # ToDo: enter the link to the folder where you want to store the resulting .tif-files.

pb <- txtProgressBar (min=0, max=length(dlist), style=1) # this creates a progress bar in the Console,

# which ends at the end of the loop. The progress bar looks like this: =====

```

setTxtProgressBar (pb, 0)

for (i in 1:length(dlist)) {          # start of the outer for-loop
  fold <- paste(path,dlist[i],sep="/") # the respective DOY folder of the Data_EVI folder
  fls <- dir(fold,pattern=".tif")      # all files that are available in the respective EVI DOY
  folder
  flsp <-paste(fold,fls,sep="/")      # all files that are available in the respective EVI DOY
  folder with complete path name

  evistack <- stack(flsp)              # creates a layer stack of all files within the EVI DOY
  folder
  eviresize<- crop(evistack,border)    # resizes the EVI layer stack to the rectangular extent
  of the border shapefile
  evimask<-mask(eviresize,border)      # masks the EVI layer stack using the border
  shapefile
  evi<-evimask*0.0001                  # rescaling of MODIS EVI data
  evi[evi== -0.3]<-NA                   # EVI fill value(-0,3) in NA
  evi[evi<(0)]<-NA                    # as we are only interested in vegetation valid EVI range
  is 0 to 1 and all EVI values smaller than 0 set to NA

  fold_c <- paste(path_c,dlist_c[i],sep="/") # the respective DOY folder of the
  Data_Pixel_Reliability folder
  fls_c <- dir(fold_c,pattern=".tif")      # all files that are available in the respective Pixel
  Reliability DOY folder
  flsp_c <-paste(fold_c,fls_c,sep="/")    # all files that are available in the respective Pixel
  Reliability DOY folder with complete path name

  cloudstack <- stack(flsp_c)            # creates a layer stack of all files within the Pixel
  Reliability DOY folder
  cloudresize<- crop(cloudstack,border)  # resizes the Pixel Reliability layer stack to the
  rectangular extent of the border shapefile
  cloudmask<-mask(cloudresize,border)    # masks the Pixel Reliability layer stack using
  the border shapefile
  cloudmask[cloudmask==(3)]<-NA          # Pixel Reliability rank 3 pixels (cloudy) set to
  NA
  cloudmask[cloudmask==(2)]<-NA          # Pixel Reliability rank 2 pixels (snow&ice) set
  to NA
  cloudmask[cloudmask==(0)]<-1           # Pixel Reliability rank 0 pixels (good quality) set
  to 1
  cloudmask[cloudmask>(3)]<-NA           # as valid Pixel Reliability range is -1 to 3, all
  Pixel Reliability values >3 set to NA
  # (as -1 rank pixels show value 255)

  evi_c=evi*cloudmask                  # multiplying the EVI layer stack by the Pixel Reliability
  layer stack
  # to get one single layer stack with applied cloud mask

  # extracting mean and standard deviation for each pixel
  evimean <- stackApply (evi_c, rep (1, nlayers (evi)), mean, na.rm=T) #calculating the mean
  for the layer stack for each individual pixel

```



```

evisd <- stackApply (evi_c, rep (1, nlayers (evi)), sd, na.rm=T) #calculating the standard
deviation for the layer stack for each individual pixel

# if na.rm is TRUE NA values are ignored, otherwise an NA value in any of the arguments
will cause a value of NA to be returned,
# https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/base/html/Extremes.html

SVI_all <- ((evi_c-evimean)/evisd) #calculating SVI

# define breaks and color scheme

stdev <- cellStats(SVI_all, stat='sd') # calculating the standard deviation for
each layer of the raster data,
# returning as many values as number of input layers
stdev2 <- 2*stdev # 2 standard deviations, returning as many
values as number of input layers
stdev15 <- 1.5*stdev # 1.5 standard deviations, returning as many
values as number of input layers

breaksSVI <- c(-4, -stdev2, -stdev15, -stdev, stdev, stdev15, stdev2, 4) # definition of the
breaks of the resulting maps based on statistics
# (standard deviation), returning as many values as number of input layers
# times 6 (i.e. 6 values for each of the 15 layers) plus 2
# (the -4 in the beginning and 4 in the end)

l <- nlayers(SVI_all)
x <- seq(2, 6*l+1, 1)

colorsSVI<-c('#4C0E0D', '#E72223', '#F19069', '#F9F6C6', '#64B14B', '#04984A',
'#00320E') # definition of the color scheme of the resulting maps

fold_jpg <- paste(path_jpg) # the respective folder where you want
to store the resulting .jpg-images.
fold_tif <- paste(path_tif) # the respective folder where you want to
store the resulting .tif-files.

for (k in 1:nlayers(SVI_all)) { # start of the inner for-loop

  year <- substr(fl[k],5,8) # extracting the fifth to eighth letter of the filename, which is
the year (cf. data preparation above)
  doy <- substr(fl[k],1,3) # extracting the first to third letter of the filename, which is the
DOY (cf. data preparation above)

  # writeRaster(evi[[k]], filename=paste(fold,"/",doy,"_",year,sep=""), format="ENVI",
datatype='FLT4S', overwrite=TRUE)

```

```

# in case you would like to have Envi files (Attention: note the datatype)

jpeg(filename=paste(fold_jpg,"/",doy,"_",year,".jpg",sep=""), quality = 100)
# writes the jpg maps and names the files automatically according to the pattern DOY_YYYY

plot(SVI_all[[k]], # zlim=c(0,100),
     breaks=c(-4, breaksSVI[x], 4),           # sets the breaks as defined above
     col=colorsSVI,                          # sets the colors as defined above
     main=paste("SVI", " (EVI)", " sample ",doy," ",year,sep="")) # automizes the title of the
plot.
# ToDo: Adjust the file naming according to the data you are processing!
# E.g. if you base your SVI on EVI data, write (EVI)

dev.off()

writeRaster(SVI_all[[k]], filename=paste(fold_tif,"/",doy,"_",year,".tif",sep=""),
format="GTiff", overwrite=TRUE)
# writes the geotiff and automizes the file naming according to the pattern DOY_YYYY

} # end of the inner for-loop

setTxtProgressBar (pb, i)

} # end of the outer for-loop

```

## APÊNDICE A - DADOS ESTATÍSTICOS DO EQW

<b>Ano</b>	<b>Meses</b>	<b>EqW Mínimo (cm)</b>	<b>EqW Máximo (cm)</b>	<b>EqW Médio (cm)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
2003	<b>Janeiro</b>	-0,27	28,61	8,07	6,37
2003	<b>Fevereiro</b>	-0,28	15,72	5,43	4,25
2003	<b>Março</b>	2,53	19,81	10,26	3,54
2003	<b>Abril</b>	-1,32	21,91	6,91	6,11
2003	<b>Maiο</b>	0,94	16,39	7,49	5,19
2003	<b>Junho</b>	Sem dados	Sem dados	Sem dados	Sem dados
2003	<b>Julho</b>	1,81	20,07	10,18	5,76
2003	<b>Agosto</b>	-0,96	13,83	5,08	4,33
2003	<b>Setembro</b>	-5,38	11,26	2,47	4,74
2003	<b>Outubro</b>	-1,99	13,44	5,81	4,25
2003	<b>Novembro</b>	-3,29	10,91	3,91	4,13
2003	<b>Dezembro</b>	1,43	20,38	7,56	4,94
2004	<b>Janeiro</b>	0,81	19,11	6,68	3,85
2004	<b>Fevereiro</b>	-5,31	6,26	6,26	1,96
2004	<b>Março</b>	-10,64	0,49	-8,72	1,60
2004	<b>Abril</b>	-9,06	-2,13	-7,54	1,25
2004	<b>Maiο</b>	-3,94	5,74	-1,52	1,71
2004	<b>Junho</b>	-0,33	4,84	1,51	1,33
2004	<b>Julho</b>	-0,02	9,14	5,34	2,33
2004	<b>Agosto</b>	0,81	4,20	2,24	0,79
2004	<b>Setembro</b>	-1,58	5,08	1,04	1,53
2004	<b>Outubro</b>	0,17	4,62	3,07	1,18
2004	<b>Novembro</b>	1,66	10,10	5,44	1,83
2004	<b>Dezembro</b>	-5,47	9,69	0,68	2,80
2005	<b>Janeiro</b>	-11,09	0,66	-5,04	2,66
2005	<b>Fevereiro</b>	-11,04	1,60	-7,98	2,22
2005	<b>Março</b>	-14,59	-5,99	-11,47	2,37
2005	<b>Abril</b>	-5,13	1,68	-1,66	1,24
2005	<b>Maiο</b>	-1,80	6,73	1,07	2,21
2005	<b>Junho</b>	1,28	10,33	6,98	2,73
2005	<b>Julho</b>	2,12	8,96	5,52	2,06
2005	<b>Agosto</b>	1,01	8,17	4,28	1,93
2005	<b>Setembro</b>	4,69	14,41	10,87	1,88
2005	<b>Outubro</b>	10,18	14,96	13,46	1,03
2005	<b>Novembro</b>	6,66	10,12	8,08	0,70
2005	<b>Dezembro</b>	-4,85	0,27	-2,15	1,38
2006	<b>Janeiro</b>	-0,27	28,61	8,07	6,37
2006	<b>Fevereiro</b>	-9,31	0,56	-6,08	3,09
2006	<b>Março</b>	-10,23	-0,58	-6,55	2,07
2006	<b>Abril</b>	-10,85	-0,71	-6,88	2,64
2006	<b>Maiο</b>	-9,92	-4,76	-8,39	1,30

2006	<b>Junho</b>	-7,74	-1,06	-4,63	1,65
2006	<b>Julho</b>	-6,32	5,11	-2,13	2,23
2006	<b>Agosto</b>	-10,63	5,68	-1,81	3,64
2006	<b>Setembro</b>	-5,38	11,26	2,47	4,74
2006	<b>Outubro</b>	-4,54	0,88	-1,15	1,18
2006	<b>Novembro</b>	-0,27	28,61	8,07	6,37
2006	<b>Dezembro</b>	-4,17	-0,51	-2,22	0,96
2007	<b>Janeiro</b>	-6,55	0,96	-2,45	1,81
2007	<b>Fevereiro</b>	-8,67	2,19	-2,84	2,55
2007	<b>Março</b>	-2,43	17,31	1,90	3,95
2007	<b>Abril</b>	-2,51	16,47	2,96	4,16
2007	<b>Mai</b>	2,25	15,65	7,83	3,18
2007	<b>Junho</b>	2,64	12,70	7,32	2,37
2007	<b>Julho</b>	0,19	8,49	4,80	1,83
2007	<b>Agosto</b>	0,15	11,12	5,75	2,93
2007	<b>Setembro</b>	-2,20	13,04	5,34	3,85
2007	<b>Outubro</b>	-2,62	13,17	6,59	4,10
2007	<b>Novembro</b>	-6,55	0,96	-2,45	1,81
2007	<b>Dezembro</b>	-3,19	4,69	-0,50	1,52
2008	<b>Janeiro</b>	-3,09	3,43	-0,61	1,54
2008	<b>Fevereiro</b>	-9,66	-1,75	-6,82	2,04
2008	<b>Março</b>	-11,20	-3,47	-9,00	1,86
2008	<b>Abril</b>	-13,33	-3,11	-9,28	2,90
2008	<b>Mai</b>	-8,00	1,57	-2,87	3,04
2008	<b>Junho</b>	-9,26	1,77	-0,11	-0,11
2008	<b>Julho</b>	-8,20	1,23	-0,89	1,78
2008	<b>Agosto</b>	-4,75	5,84	3,05	1,80
2008	<b>Setembro</b>	-5,57	8,93	4,55	2,27
2008	<b>Outubro</b>	-1,05	7,36	5,42	1,30
2008	<b>Novembro</b>	1,66	9,50	7,01	1,54
2008	<b>Dezembro</b>	-8,45	0,87	-3,08	2,55
2009	<b>Janeiro</b>	-12,89	-0,97	-5,47	3,10
2009	<b>Fevereiro</b>	-12,07	-0,77	-6,91	2,79
2009	<b>Março</b>	-12,56	-2,98	-8,98	2,69
2009	<b>Abril</b>	-18,80	-4,01	-10,09	3,86
2009	<b>Mai</b>	-20,16	-4,23	-11,68	4,25
2009	<b>Junho</b>	-18,91	-0,51	-6,76	4,05
2009	<b>Julho</b>	-14,41	1,93	-3,26	3,82
2009	<b>Agosto</b>	-13,85	10,02	5,55	4,86
2009	<b>Setembro</b>	-7,56	13,43	9,98	3,22
2009	<b>Outubro</b>	-4,43	9,38	6,07	2,40
2009	<b>Novembro</b>	5,39	10,24	8,02	1,37
2009	<b>Dezembro</b>	5,32	19,52	11,33	4,39
2010	<b>Janeiro</b>	4,13	19,38	9,23	3,53
2010	<b>Fevereiro</b>	4,41	24,43	7,80	3,44

2010	<b>Março</b>	-0,89	15,67	3,86	2,94
2010	<b>Abril</b>	-2,62	-5,76	-4,94	-3,18
2010	<b>Mai</b>	2,11	11,28	6,17	2,14
2010	<b>Junho</b>	5,91	13,30	9,25	1,81
2010	<b>Julho</b>	6,93	16,71	13,18	2,92
2010	<b>Agosto</b>	4,23	11,71	8,72	2,05
2010	<b>Setembro</b>	0,57	14,12	7,85	3,81
2010	<b>Outubro</b>	5,19	11,74	9,13	2,17
2010	<b>Novembro</b>	-1,08	5,74	3,71	1,02
2010	<b>Dezembro</b>	-2,47	7,98	2,94	2,29
2011	<b>Janeiro</b>	Sem dados	Sem dados	Sem dados	Sem dados
2011	<b>Fevereiro</b>	-7,86	7,83	1,76	3,67
2011	<b>Março</b>	-7,31	7,35	-0,08	3,46
2011	<b>Abril</b>	-4,25	7,54	2,25	2,25
2011	<b>Mai</b>	-1,95	6,17	2,10	1,90
2011	<b>Junho</b>	Sem dados	Sem dados	Sem dados	Sem dados
2011	<b>Julho</b>	1,64	10,89	8,46	1,99
2011	<b>Agosto</b>	4,51	10,34	8,37	1,57
2011	<b>Setembro</b>	0,32	11,83	9,10	2,09
2011	<b>Outubro</b>	3,49	9,16	6,43	1,29
2011	<b>Novembro</b>	Sem dados	Sem dados	Sem dados	Sem dados
2011	<b>Dezembro</b>	-13,60	-0,88	-5,57	2,44
2012	<b>Janeiro</b>	-14,71	-0,83	-7,33	3,29
2012	<b>Fevereiro</b>	-13,80	-0,94	-8,67	3,57
2012	<b>Março</b>	-13,86	-4,02	-10,04	2,59
2012	<b>Abril</b>	-13,74	-3,05	-9,40	3,02
2012	<b>Mai</b>	Sem dados	Sem dados	Sem dados	Sem dados
2012	<b>Junho</b>	-9,63	6,84	-3,03	4,49
2012	<b>Julho</b>	-13,72	8,93	1,77	4,24
2012	<b>Agosto</b>	-7,26	3,77	-0,33	2,64
2012	<b>Setembro</b>	-8,61	6,03	-0,51	3,79
2012	<b>Outubro</b>	Sem dados	Sem dados	Sem dados	Sem dados
2012	<b>Novembro</b>	-1,29	4,78	1,65	1,87
2012	<b>Dezembro</b>	0,50	6,27	1,55	0,68
2013	<b>Janeiro</b>	-0,72	8,75	2,65	2,58
2013	<b>Fevereiro</b>	-5,23	2,70	-2,41	2,09
2013	<b>Março</b>	Sem dados	Sem dados	Sem dados	Sem dados
2013	<b>Abril</b>	-2,65	8,33	3,15	2,73
2013	<b>Mai</b>	-4,40	6,75	0,49	2,91
2013	<b>Junho</b>	-3,34	11,57	4,09	2,71
2013	<b>Julho</b>	0,30	15,11	8,28	2,11
2013	<b>Agosto</b>	Sem dados	Sem dados	Sem dados	Sem dados
2013	<b>Setembro</b>	Sem dados	Sem dados	Sem dados	Sem dados
2013	<b>Outubro</b>	-2,95	12,85	9,37	2,20
2013	<b>Novembro</b>	6,96	11,34	9,73	0,94

2013	<b>Dezembro</b>	3,59	10,68	7,38	2,02
2014	<b>Janeiro</b>	-0,08	8,96	7,10	1,20
2014	<b>Fevereiro</b>	Sem dados	Sem dados	Sem dados	Sem dados
2014	<b>Março</b>	1,59	8,15	3,57	1,52
2014	<b>Abril</b>	2,66	9,07	6,03	1,93
2014	<b>Mai</b>	3,09	13,83	8,40	2,52
2014	<b>Junho</b>	2,58	25,39	11,79	5,46
2014	<b>Julho</b>	Sem dados	Sem dados	Sem dados	Sem dados
2014	<b>Agosto</b>	5,77	13,42	10,31	1,88
2014	<b>Setembro</b>	4,23	13,66	11,20	2,13
2014	<b>Outubro</b>	9,68	17,49	14,93	1,78
2014	<b>Novembro</b>	5,61	12,52	9,77	1,52
2014	<b>Dezembro</b>	Sem dados	Sem dados	Sem dados	Sem dados
2015	<b>Janeiro</b>	7,58	27,54	14,27	5,15
2015	<b>Fevereiro</b>	2,16	17,48	6,84	2,80
2015	<b>Março</b>	-7,49	21,52	1,28	4,89
2015	<b>Abril</b>	-2,20	9,01	3,92	3,14
2015	<b>Mai</b>	Sem dados	Sem dados	Sem dados	Sem dados
2015	<b>Junho</b>	Sem dados	Sem dados	Sem dados	Sem dados
2015	<b>Julho</b>	5,46	23,79	15,34	3,83
2015	<b>Agosto</b>	4,71	18,73	13,46	4,39
2015	<b>Setembro</b>	6,75	14,40	10,47	1,79
2015	<b>Outubro</b>	Sem dados	Sem dados	Sem dados	Sem dados
2015	<b>Novembro</b>	Sem dados	Sem dados	Sem dados	Sem dados
2015	<b>Dezembro</b>	16,03	39,24	26,31	6,36

## APÊNDICE B - MAPAS

- Mapa 1 - Mapa do EqW na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em outubro de 2011.
- Mapa 2 - Mapa do SVI na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em outubro de 2011.
- Mapa 3 - Mapa do SVI na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em novembro de 2011.
- Mapa 4 - Mapa do EqW na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em dezembro de 2011.
- Mapa 5 - Mapa do SVI na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em dezembro de 2011.
- Mapa 6 - Mapa do EqW na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em janeiro de 2012.
- Mapa 7 - Mapa do SVI na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em janeiro de 2012.
- Mapa 8 - Mapa do EqW na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em fevereiro de 2012.
- Mapa 9 - Mapa do SVI na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em fevereiro de 2012.
- Mapa 10 - Mapa do EqW na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em março de 2012.
- Mapa 11 - Mapa do SVI na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em março de 2012.
- Mapa 12 - Mapa do EqW na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em abril de 2012.
- Mapa 13 - Mapa do SVI na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em abril de 2012.
- Mapa 14 - Mapa do SVI na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em maio de 2012.
- Mapa 15 - Mapa do EqW na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em junho de 2012.
- Mapa 16 - Mapa do SVI na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em junho de 2012.
- Mapa 17 - Mapa do EqW na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em julho de 2012.
- Mapa 18 - Mapa do SVI na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em julho de 2012.
- Mapa 19 - Mapa do EqW na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em agosto de 2012.
- Mapa 20 - Mapa do SVI na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em agosto de 2012.
- Mapa 21 - Mapa do EqW na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em setembro de 2012.
- Mapa 22 - Mapa do SVI na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em setembro de 2012.
- Mapa 23 - Mapa do SVI na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em outubro de 2012.
- Mapa 24 - Mapa do EqW na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em novembro de 2012.
- Mapa 25 - Mapa do SVI na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em novembro de 2012.
- Mapa 26 - Mapa do EqW na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em dezembro de 2012.
- Mapa 27 - Mapa do SVI na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em dezembro de 2012.
- Mapa 28 - Mapa do EqW na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em janeiro de 2013.
- Mapa 29 - Mapa do SVI na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em janeiro de 2013.
- Mapa 30 - Mapa do EqW na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em fevereiro de 2013.
- Mapa 31 - Mapa do SVI na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em fevereiro de 2013.
- Mapa 32 - Mapa do SVI na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em março de 2013.

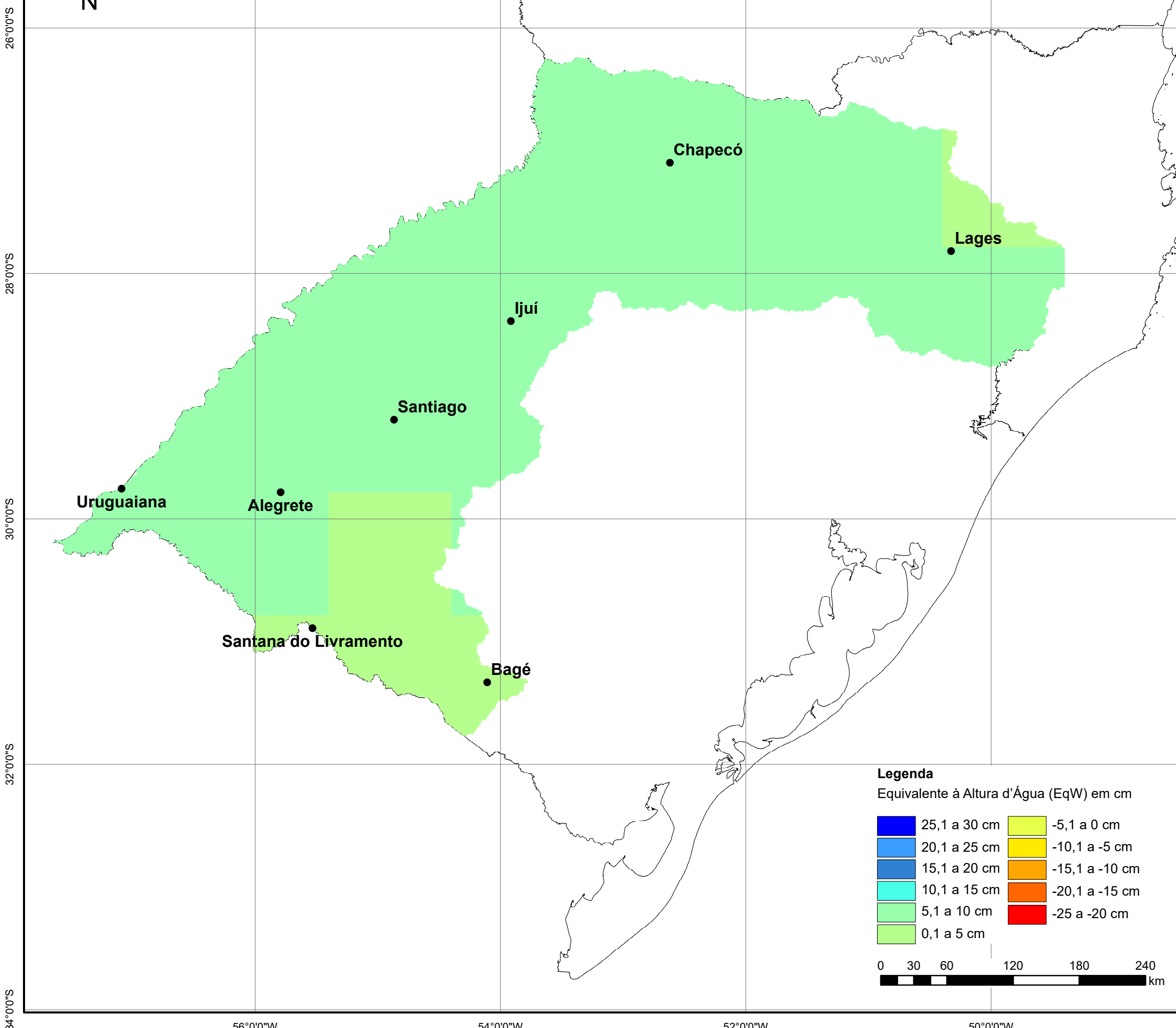
Mapa 33 - Mapa do quantitativo de Decretos de SE de estiagem por municípios na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai entre 2003 a 2015.

Mapa 34 - Mapa do EqW na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em março de 2005.

Mapa 35 - Mapa do EqW na Bacia Hidrográfica do Rio Uruguai em maio de 2009.



**MAPA DO EqW NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM OUTUBRO DE 2011**



**Legenda**  
Equivalente à Altura d'Água (EqW) em cm

25,1 a 30 cm	-5,1 a 0 cm
20,1 a 25 cm	-10,1 a -5 cm
15,1 a 20 cm	-15,1 a -10 cm
10,1 a 15 cm	-20,1 a -15 cm
5,1 a 10 cm	-25 a -20 cm
0,1 a 5 cm	

0 30 60 120 180 240 km



**BASE CARTOGRÁFICA**  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

**ELABORAÇÃO:** Indira Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019

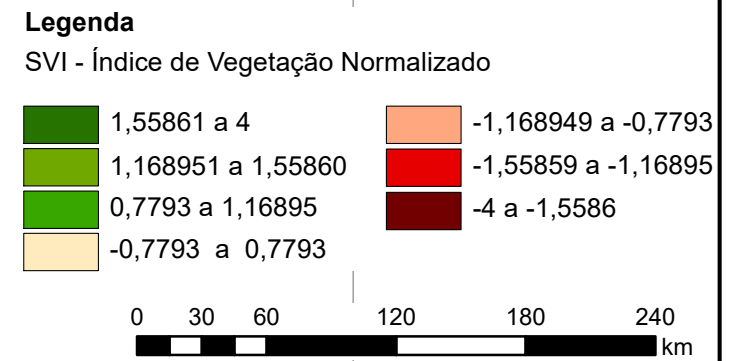
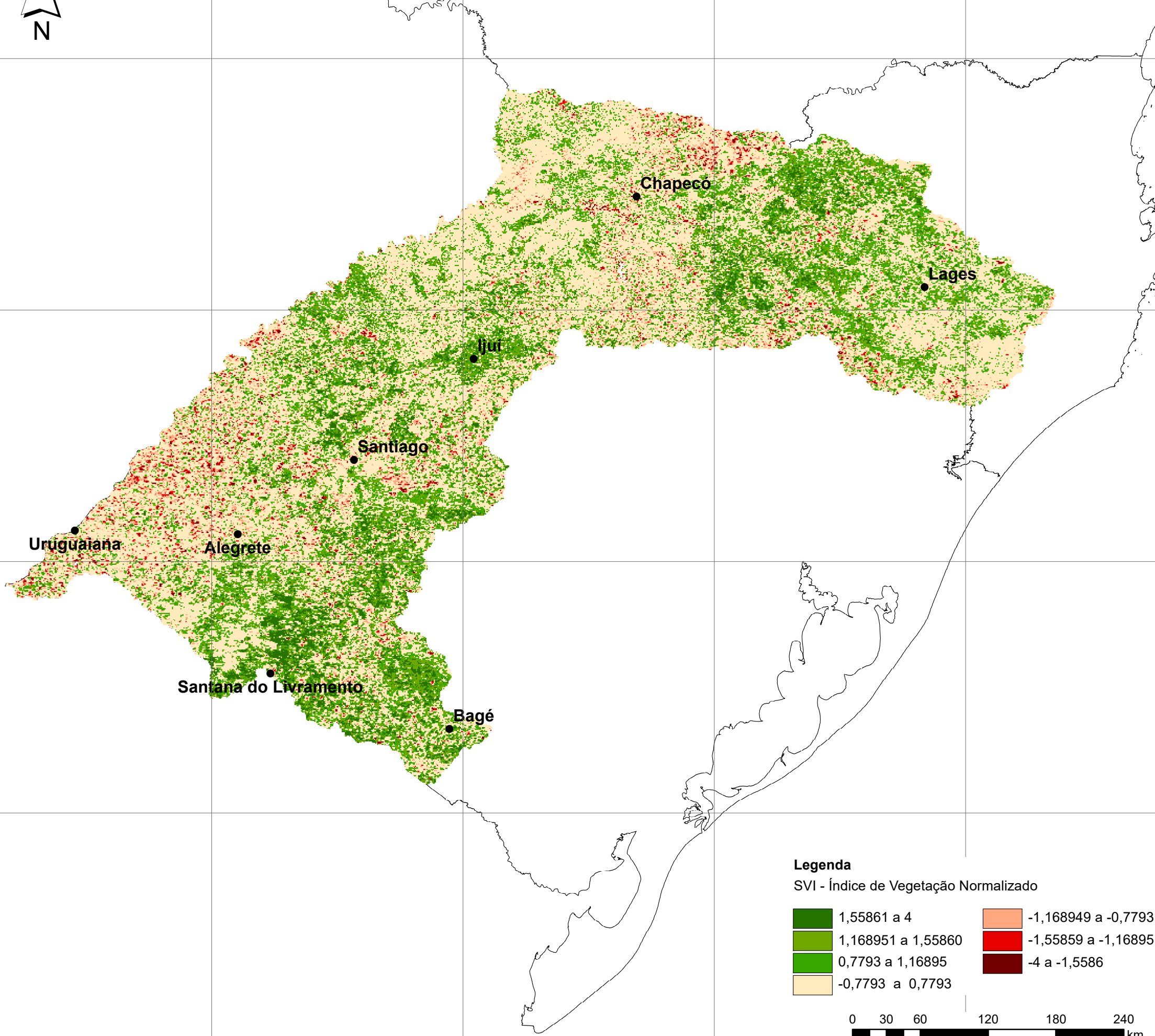


**MAPA DO SVI NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM OUTUBRO DE 2011**



26°00'S  
28°00'S  
30°00'S  
32°00'S  
34°00'S

56°00'W 54°00'W 52°00'W 50°00'W



**MAPA DO SVI NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM NOVEMBRO DE 2011**



26°0'0"S

28°0'0"S

30°0'0"S

32°0'0"S

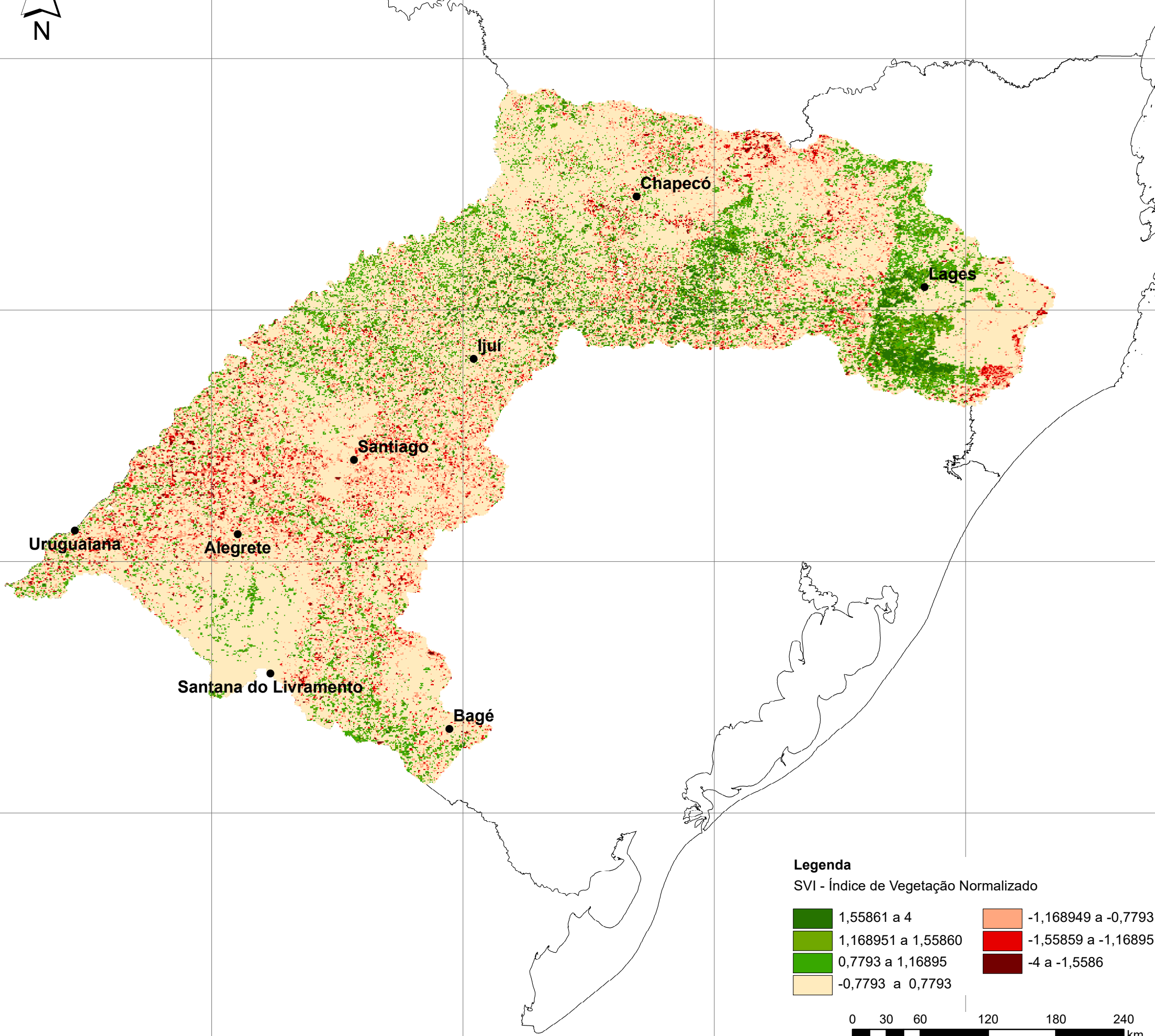
34°0'0"S

56°0'0"W

54°0'0"W








52°0'0"W

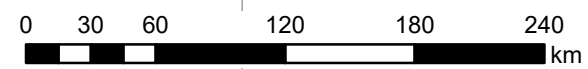
50°0'0"W



**Legenda**

SVI - Índice de Vegetação Normalizado

	1,55861 a 4		-1,168949 a -0,7793
	1,168951 a 1,55860		-1,55859 a -1,16895
	0,7793 a 1,16895		-4 a -1,5586
	-0,7793 a 0,7793		



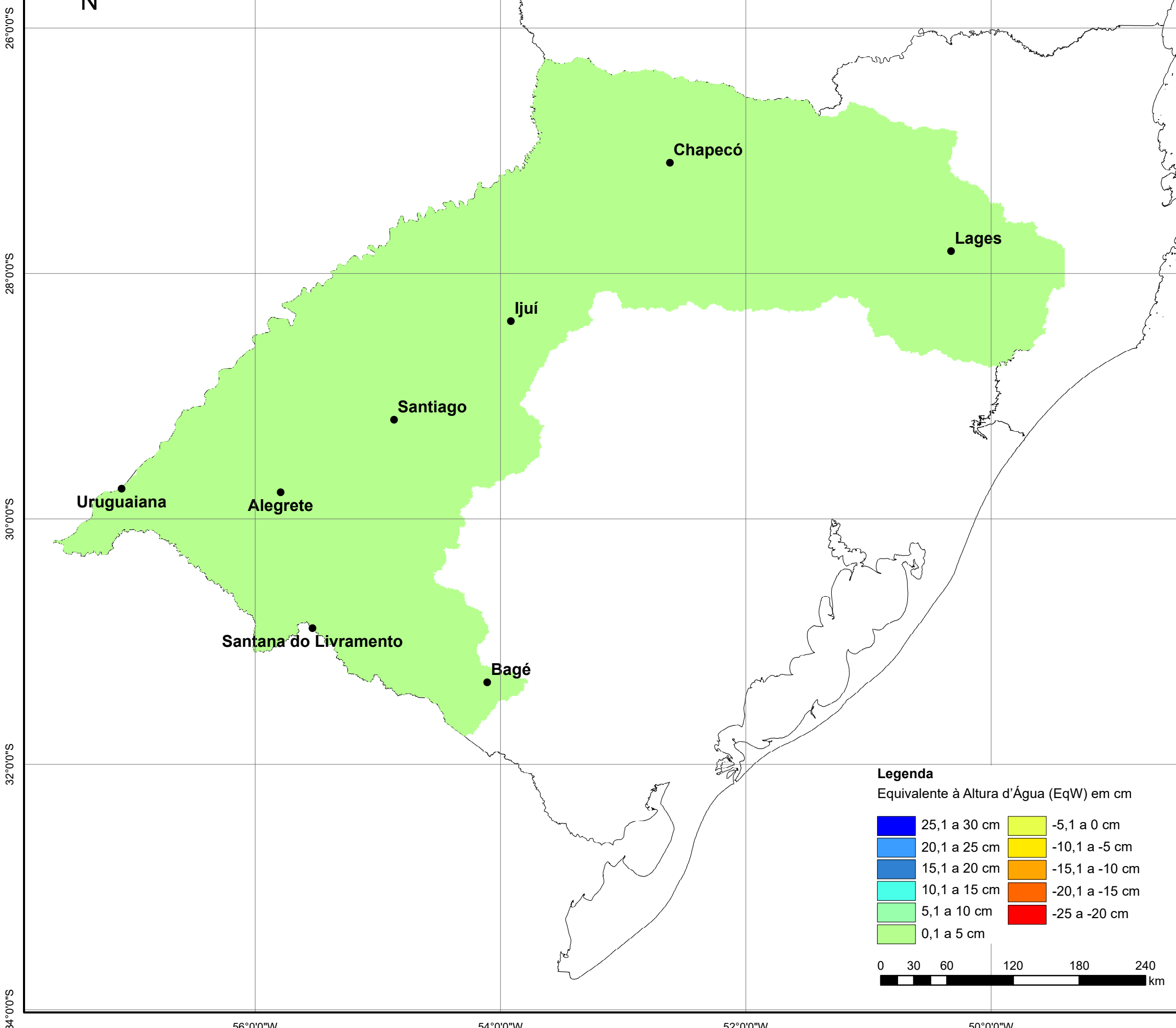
BASE CARTOGRÁFICA  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000












ELABORAÇÃO: Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019



**MAPA DO EqW NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM DEZEMBRO DE 2011**



**Legenda**  
Equivalente à Altura d'Água (EqW) em cm

 25,1 a 30 cm	 -5,1 a 0 cm
 20,1 a 25 cm	 -10,1 a -5 cm
 15,1 a 20 cm	 -15,1 a -10 cm
 10,1 a 15 cm	 -20,1 a -15 cm
 5,1 a 10 cm	 -25 a -20 cm
 0,1 a 5 cm	

0 30 60 120 180 240 km



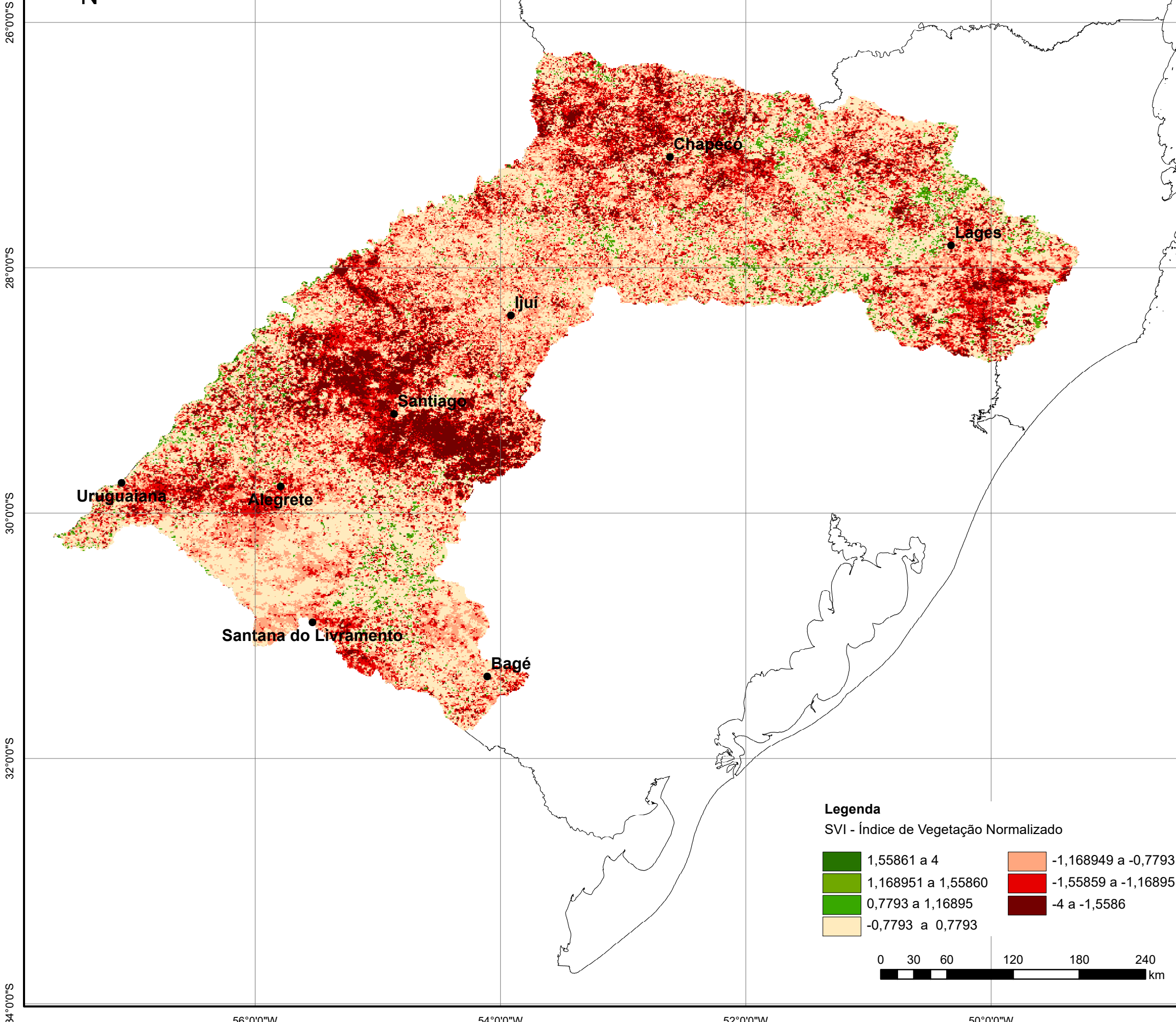
**BASE CARTOGRÁFICA**  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000








**ELABORAÇÃO:** Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019



**MAPA DO SVI NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM DEZEMBRO DE 2011**



**Legenda**  
SVI - Índice de Vegetação Normalizado

	1,55861 a 4		-1,168949 a -0,7793
	1,168951 a 1,55860		-1,55859 a -1,16895
	0,7793 a 1,16895		-4 a -1,5586
	-0,7793 a 0,7793		

0 30 60 120 180 240 km



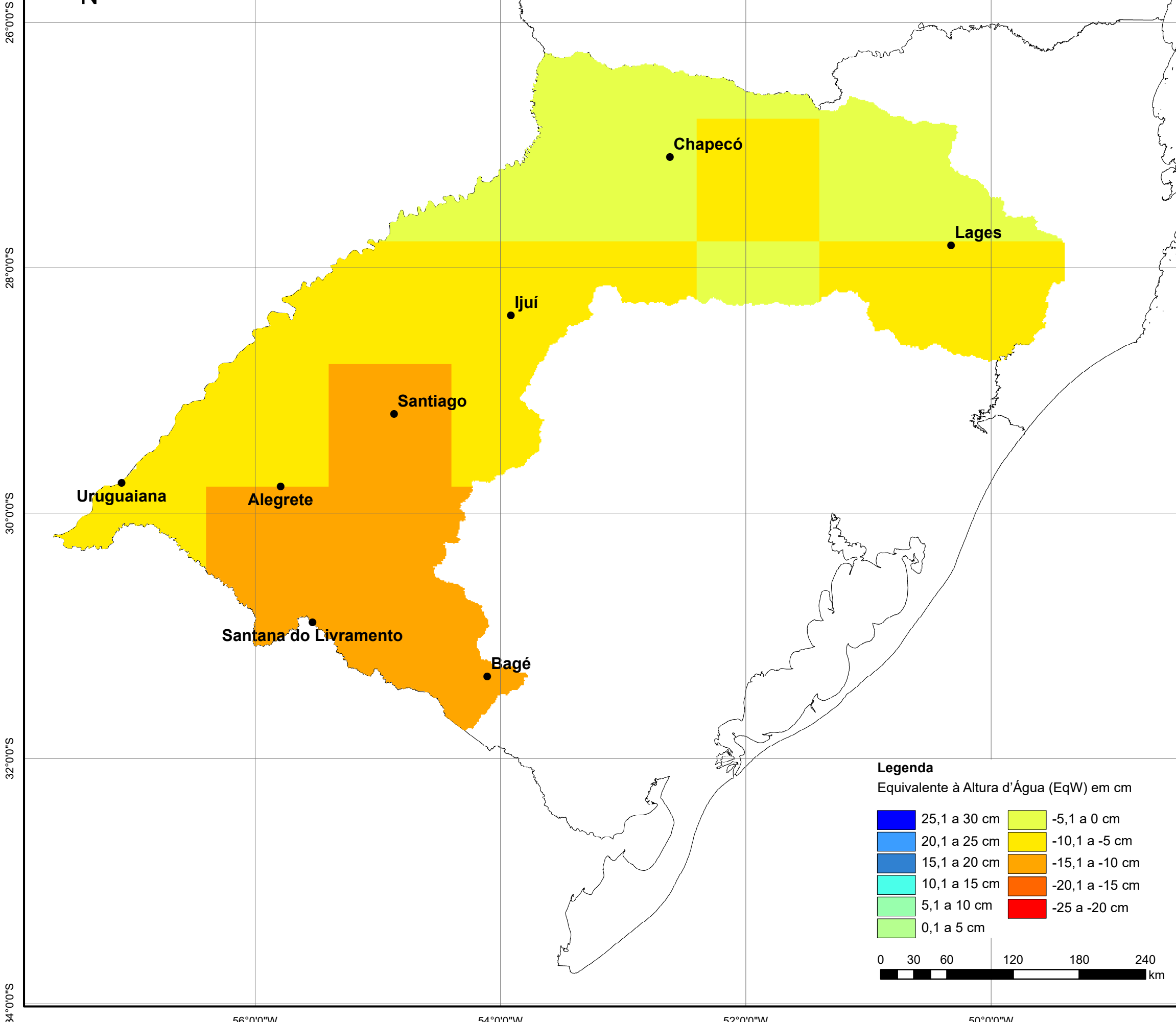
**BASE CARTOGRÁFICA**  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

**ELABORAÇÃO:** Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019

**APOIO**

**MAPA DO EqW NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM JANEIRO DE 2012**



**Legenda**  
Equivalente à Altura d'Água (EqW) em cm

25,1 a 30 cm	-5,1 a 0 cm
20,1 a 25 cm	-10,1 a -5 cm
15,1 a 20 cm	-15,1 a -10 cm
10,1 a 15 cm	-20,1 a -15 cm
5,1 a 10 cm	-25 a -20 cm
0,1 a 5 cm	

0 30 60 120 180 240 km



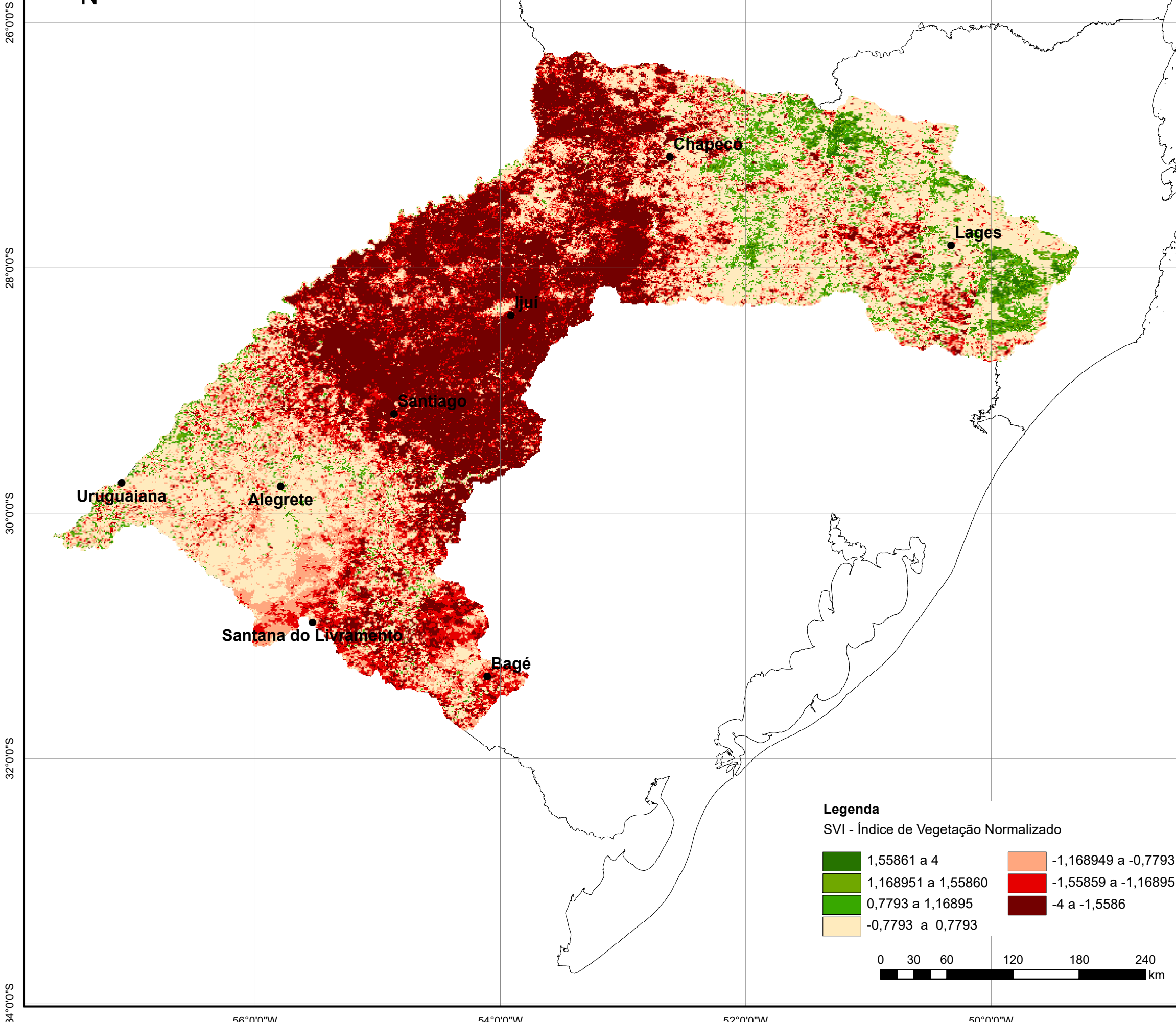
**BASE CARTOGRÁFICA**  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000








**ELABORAÇÃO:** Indira Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019

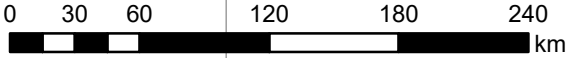


**MAPA DO SVI NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM JANEIRO DE 2012**



**Legenda**  
SVI - Índice de Vegetação Normalizado

	1,55861 a 4		-1,168949 a -0,7793
	1,168951 a 1,55860		-1,55859 a -1,16895
	0,7793 a 1,16895		-4 a -1,5586
	-0,7793 a 0,7793		



**BASE CARTOGRÁFICA**  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

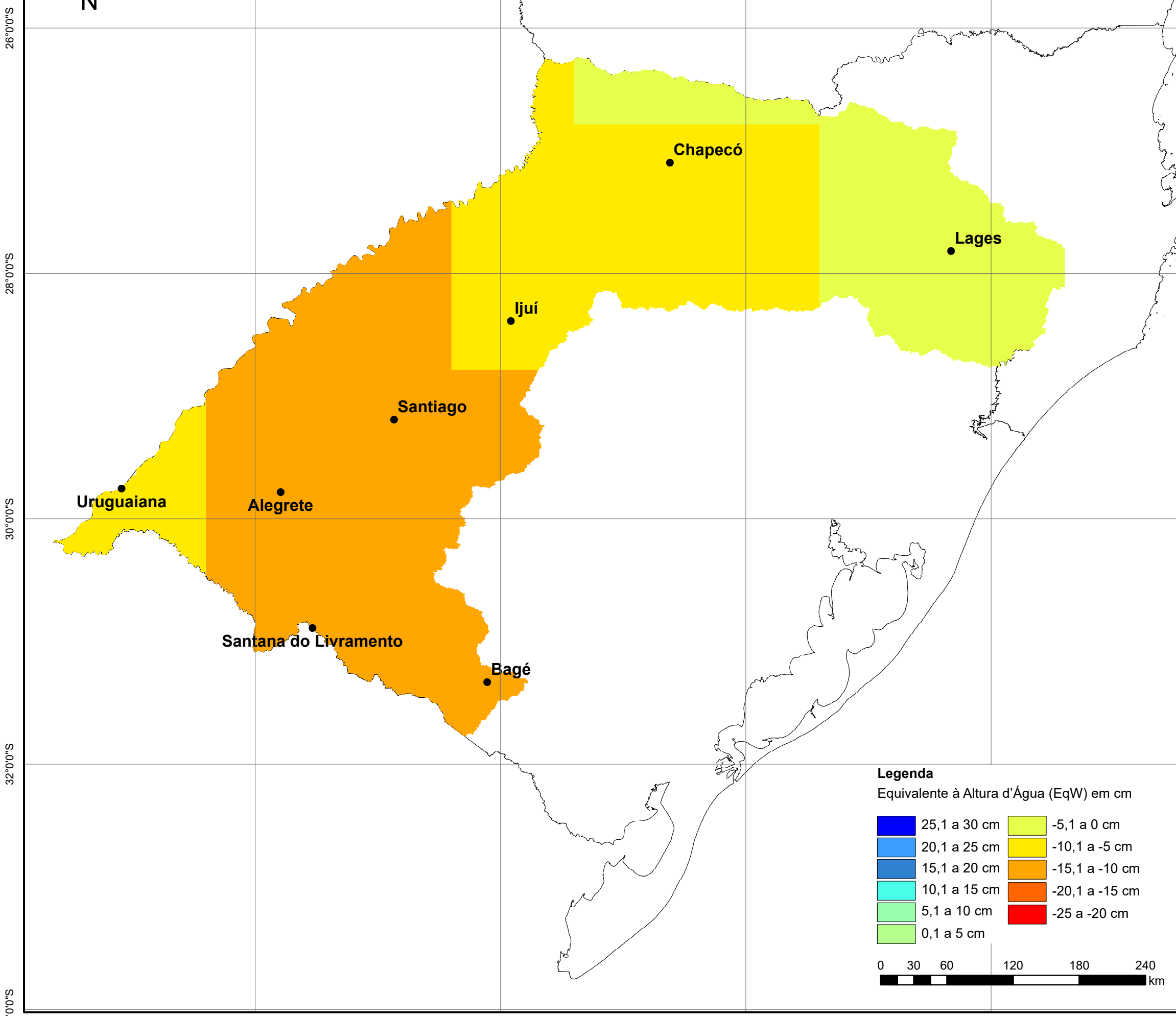
Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

**ELABORAÇÃO:** Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019

**APOIO**

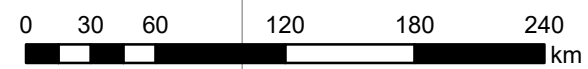
34°00'S 56°00'W 54°00'W 52°00'W 50°00'W

**MAPA DO EqW NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM FEVEREIRO DE 2012**



**Legenda**  
Equivalente à Altura d'Água (EqW) em cm

25,1 a 30 cm	-5,1 a 0 cm
20,1 a 25 cm	-10,1 a -5 cm
15,1 a 20 cm	-15,1 a -10 cm
10,1 a 15 cm	-20,1 a -15 cm
5,1 a 10 cm	-25 a -20 cm
0,1 a 5 cm	



**BASE CARTOGRÁFICA**  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

**ELABORAÇÃO:** Indira Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019



34°0'0"S 56°0'0"W 54°0'0"W 52°0'0"W 50°0'0"W



**MAPA DO SVI NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM FEVEREIRO DE 2012**



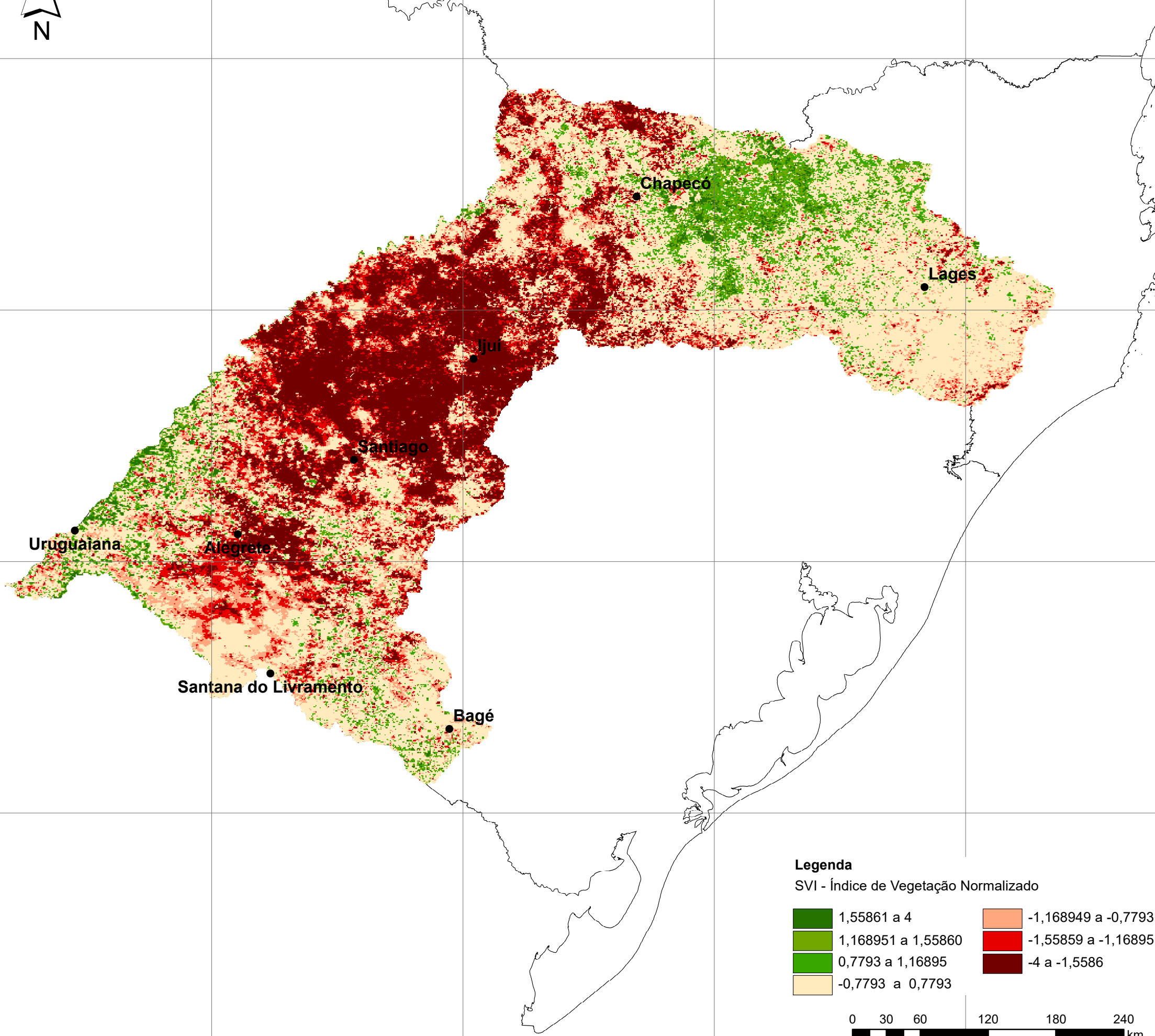
26°0'0"S

28°0'0"S

30°0'0"S

32°0'0"S

34°0'0"S



56°0'0"W








54°0'0"W

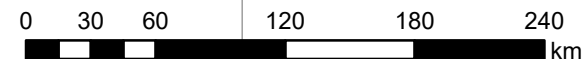
52°0'0"W

50°0'0"W

**Legenda**

SVI - Índice de Vegetação Normalizado

	1,55861 a 4		-1,16894 a -0,7793
	1,168951 a 1,55860		-1,55859 a -1,16895
	0,7793 a 1,16895		-4 a -1,5586
	-0,7793 a 0,7793		



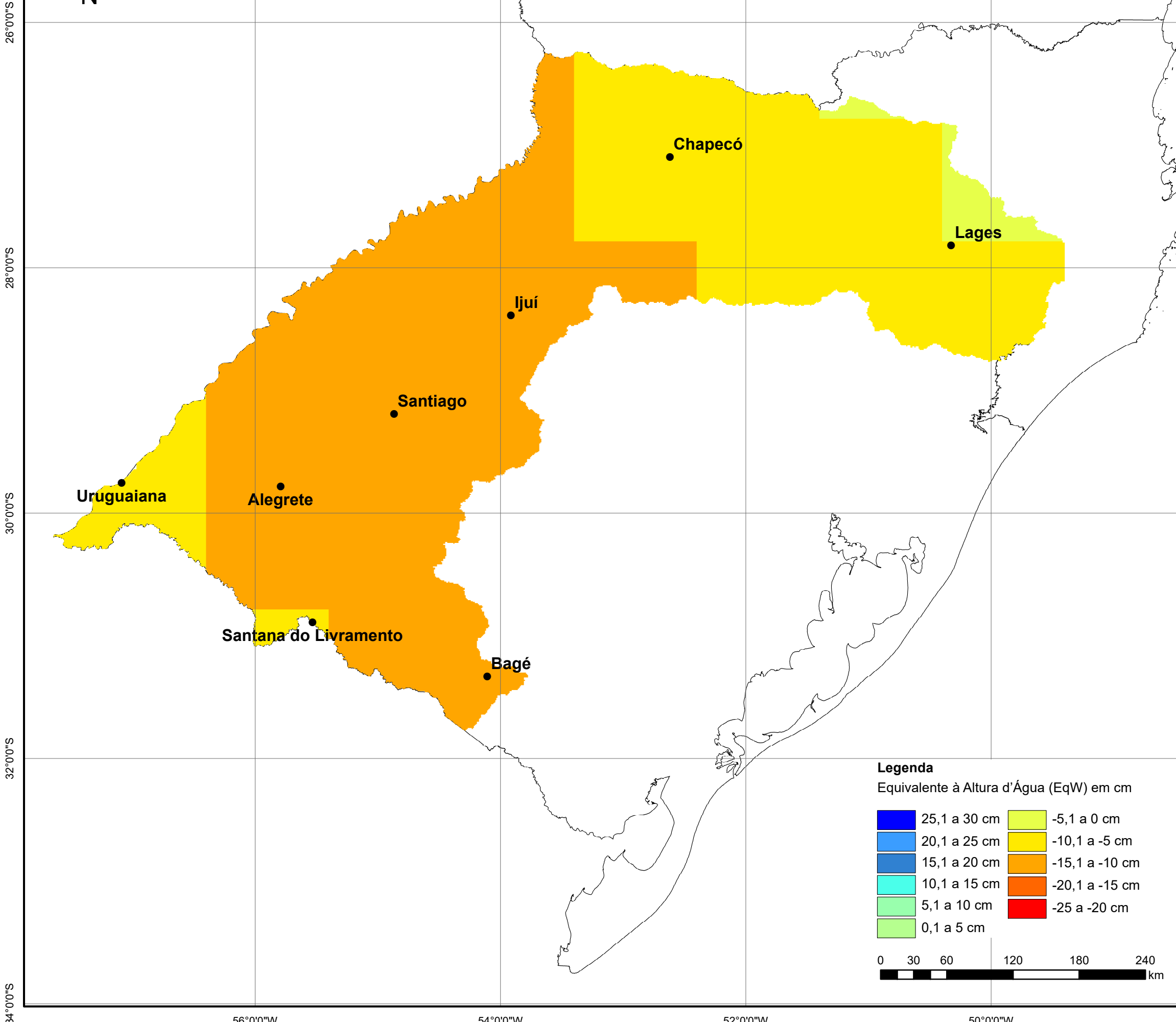
**BASE CARTOGRÁFICA**  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

**ELABORAÇÃO:** Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019



**MAPA DO EqW NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM MARÇO DE 2012**



**Legenda**  
Equivalente à Altura d'Água (EqW) em cm

25,1 a 30 cm	-5,1 a 0 cm
20,1 a 25 cm	-10,1 a -5 cm
15,1 a 20 cm	-15,1 a -10 cm
10,1 a 15 cm	-20,1 a -15 cm
5,1 a 10 cm	-25 a -20 cm
0,1 a 5 cm	

0 30 60 120 180 240 km



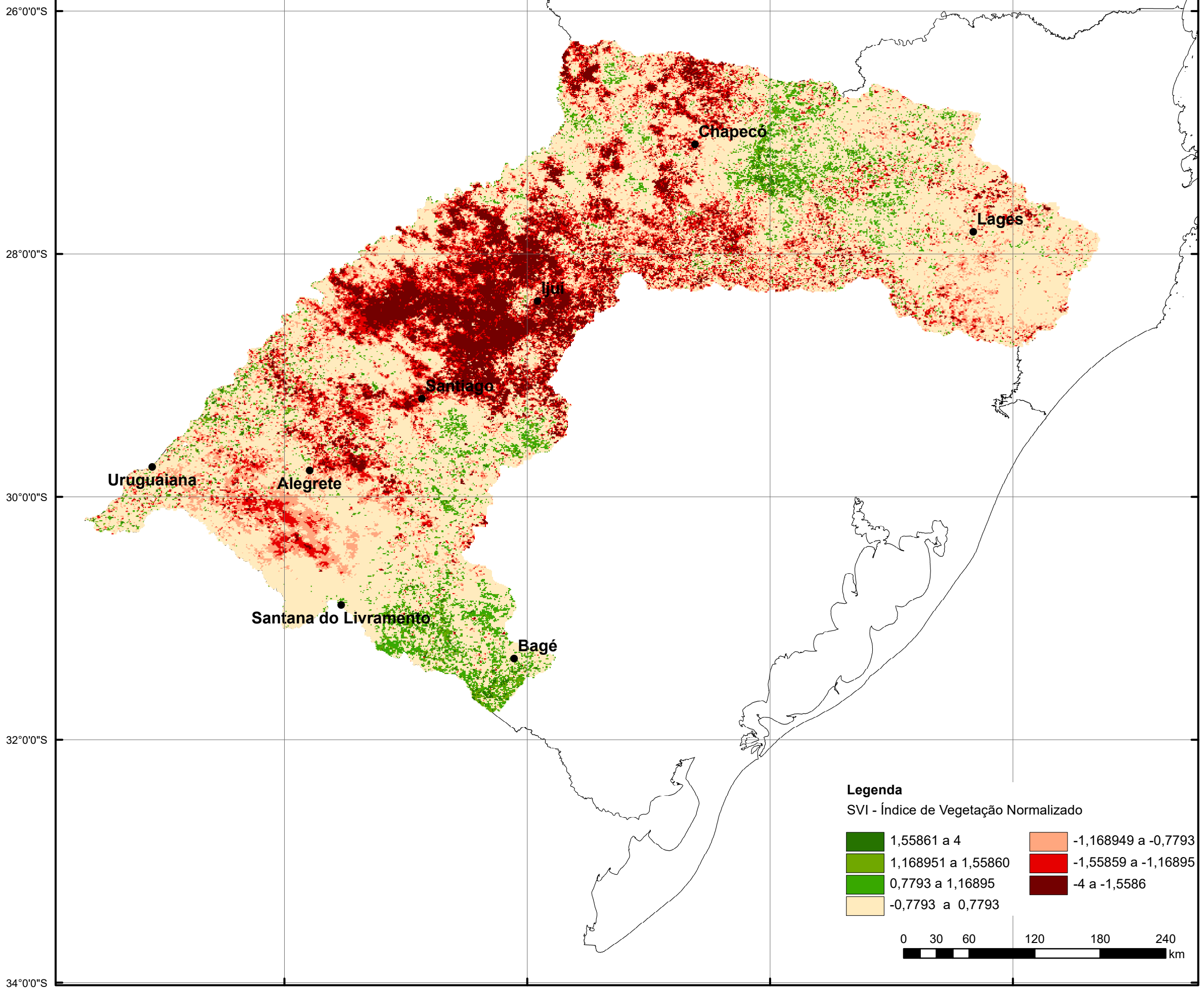
**BASE CARTOGRÁFICA**  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000








**ELABORAÇÃO:** Indira Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019

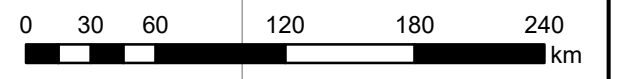
**APOIO**

**MAPA DO SVI NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM MARÇO DE 2012**



**Legenda**  
SVI - Índice de Vegetação Normalizado

	1,55861 a 4		-1,168949 a -0,7793
	1,168951 a 1,55860		-1,55859 a -1,16895
	0,7793 a 1,16895		-4 a -1,5586
	-0,7793 a 0,7793		



BASE CARTOGRÁFICA  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

ELABORAÇÃO: Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019



MAPA DO EqW NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM ABRIL DE 2012



26°0'0"S

28°0'0"S

30°0'0"S

32°0'0"S

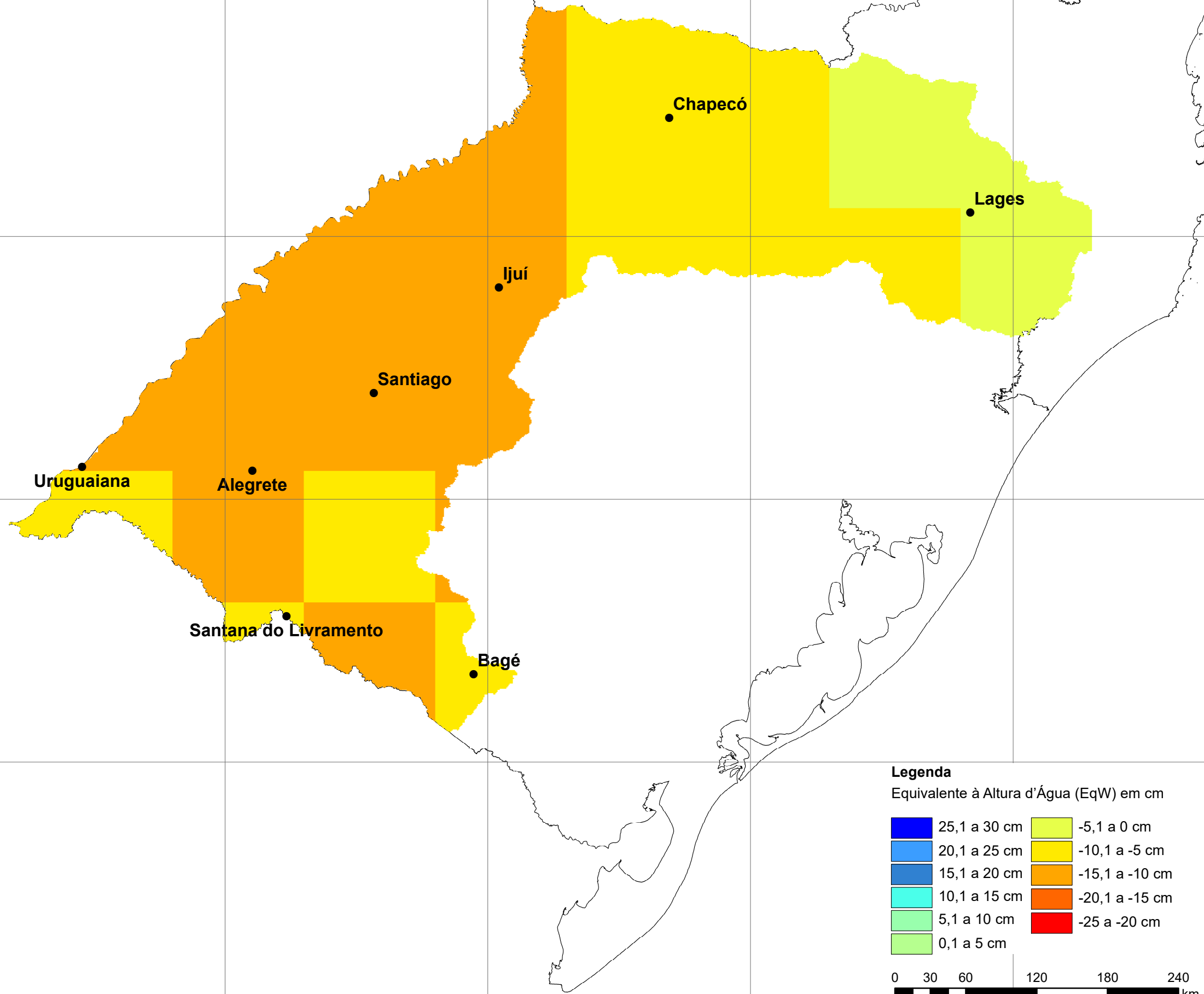
34°0'0"S

56°0'0"W

54°0'0"W

52°0'0"W

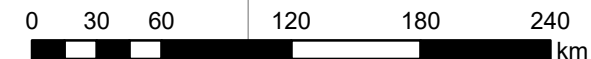
50°0'0"W



**Legenda**

Equivalente à Altura d'Água (EqW) em cm

25,1 a 30 cm	-5,1 a 0 cm
20,1 a 25 cm	-10,1 a -5 cm
15,1 a 20 cm	-15,1 a -10 cm
10,1 a 15 cm	-20,1 a -15 cm
5,1 a 10 cm	-25 a -20 cm
0,1 a 5 cm	



BASE CARTOGRÁFICA  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

ELABORAÇÃO: Indira Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019



MAPA DO SVI NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM ABRIL DE 2012



26°0'0"S

28°0'0"S

30°0'0"S

32°0'0"S

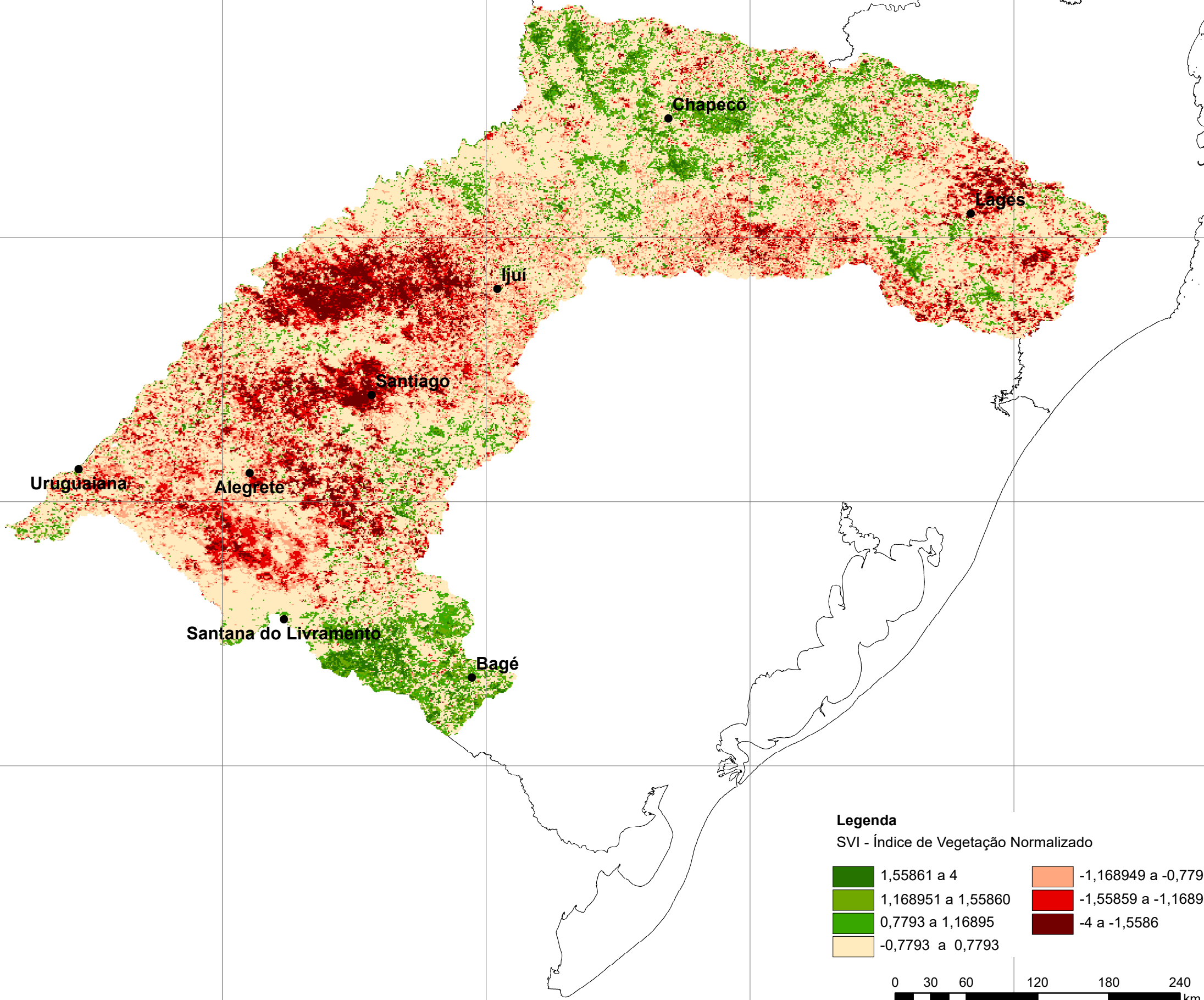
34°0'0"S

56°0'0"W

54°0'0"W








52°0'0"W

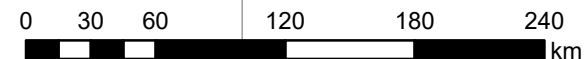
50°0'0"W



**Legenda**

SVI - Índice de Vegetação Normalizado

	1,55861 a 4		-1,168949 a -0,7793
	1,168951 a 1,55860		-1,55859 a -1,16895
	0,7793 a 1,16895		-4 a -1,5586
	-0,7793 a 0,7793		



BASE CARTOGRÁFICA  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

ELABORAÇÃO: Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019



MAPA DO SVI NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM MAIO DE 2012



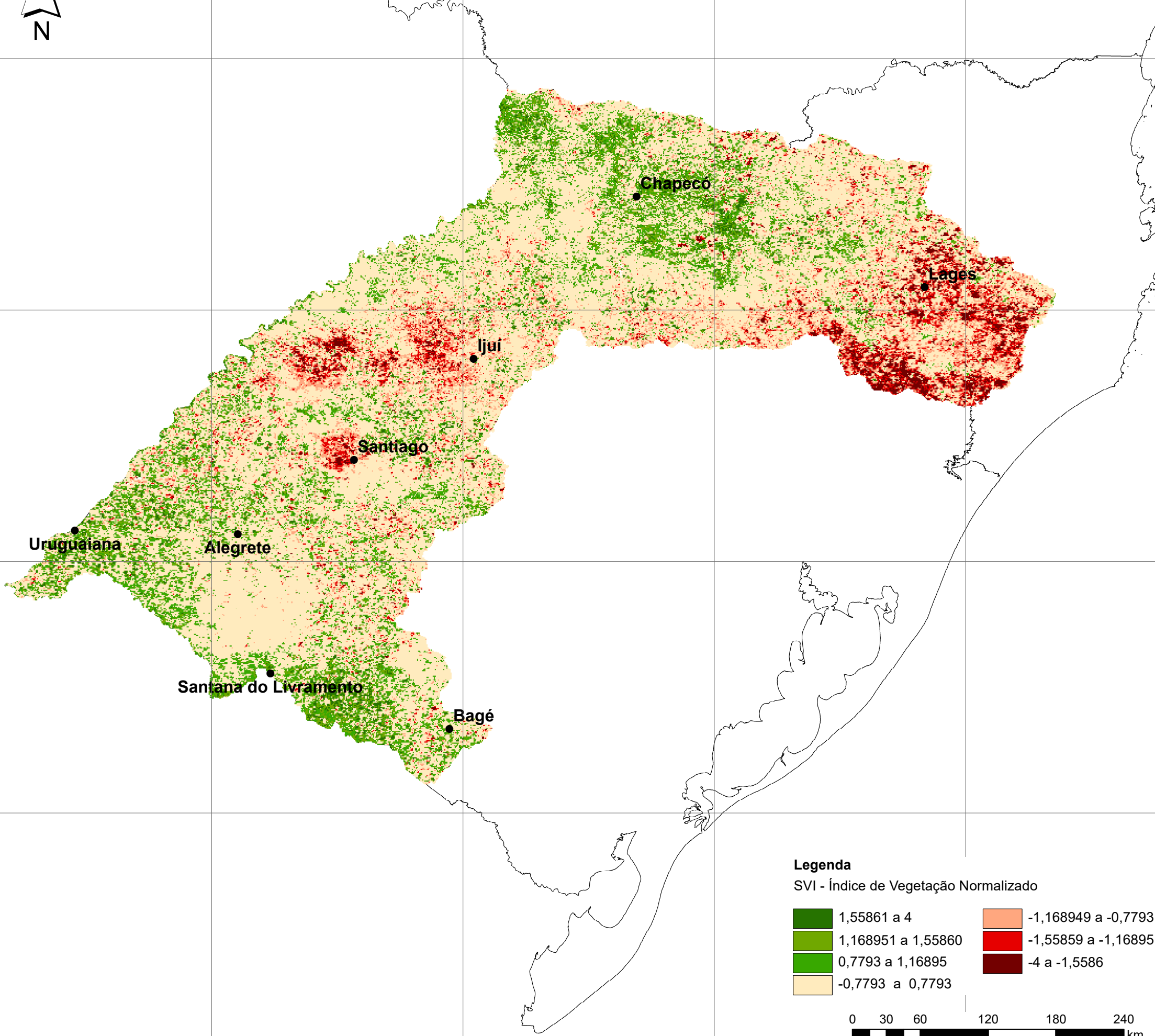
26°0'0"S

28°0'0"S

30°0'0"S

32°0'0"S

34°0'0"S



56°0'0"W








54°0'0"W

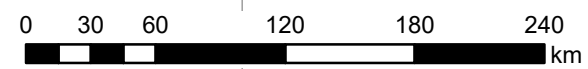
52°0'0"W

50°0'0"W

**Legenda**

SVI - Índice de Vegetação Normalizado

	1,55861 a 4		-1,168949 a -0,7793
	1,168951 a 1,55860		-1,55859 a -1,16895
	0,7793 a 1,16895		-4 a -1,5586
	-0,7793 a 0,7793		



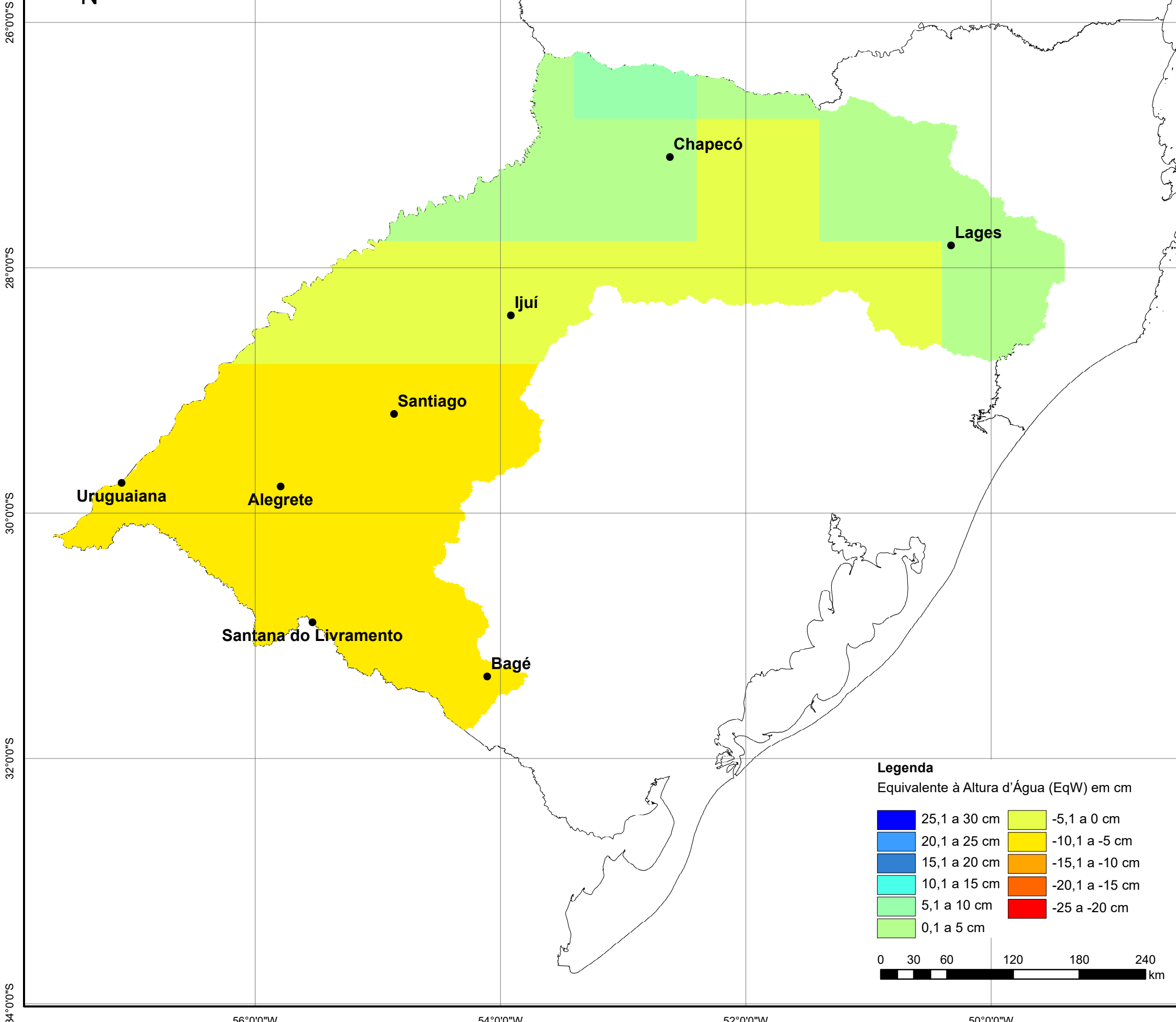
BASE CARTOGRÁFICA  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

ELABORAÇÃO: Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019



**MAPA DO EqW NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM JUNHO DE 2012**



**Legenda**  
Equivalente à Altura d'Água (EqW) em cm

25,1 a 30 cm	-5,1 a 0 cm
20,1 a 25 cm	-10,1 a -5 cm
15,1 a 20 cm	-15,1 a -10 cm
10,1 a 15 cm	-20,1 a -15 cm
5,1 a 10 cm	-25 a -20 cm
0,1 a 5 cm	

0 30 60 120 180 240 km



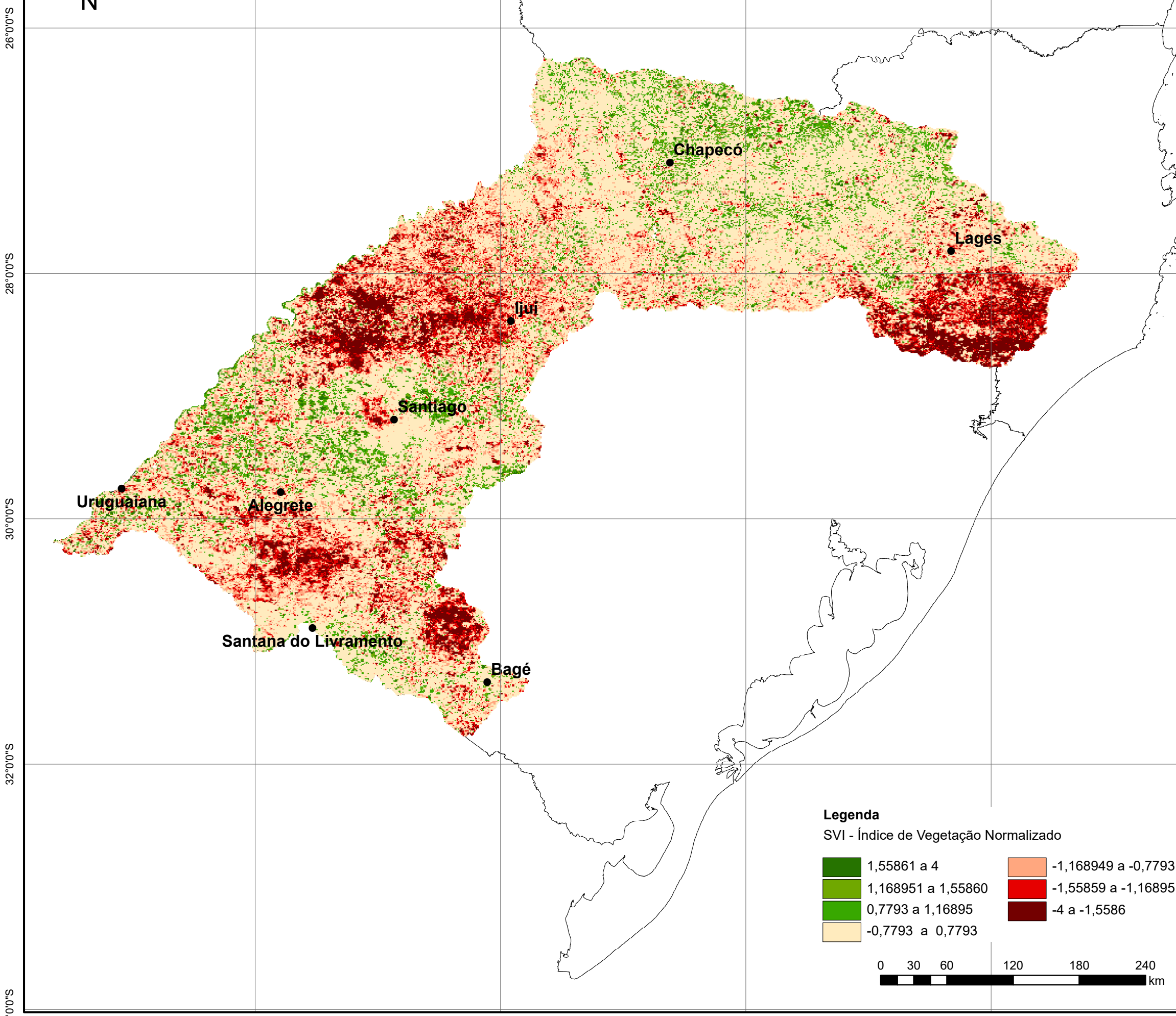
**BASE CARTOGRÁFICA**  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000








**ELABORAÇÃO:** Indira Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019



**MAPA DO SVI NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM JUNHO DE 2012**



**Legenda**  
SVI - Índice de Vegetação Normalizado

	1,55861 a 4		-1,168949 a -0,7793
	1,168951 a 1,55860		-1,55859 a -1,16895
	0,7793 a 1,16895		-4 a -1,5586
	-0,7793 a 0,7793		

0 30 60 120 180 240 km



BASE CARTOGRÁFICA  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

ELABORAÇÃO: Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019





MAPA DO EqW NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM JULHO DE 2012



26°0'0"S

28°0'0"S

30°0'0"S

32°0'0"S

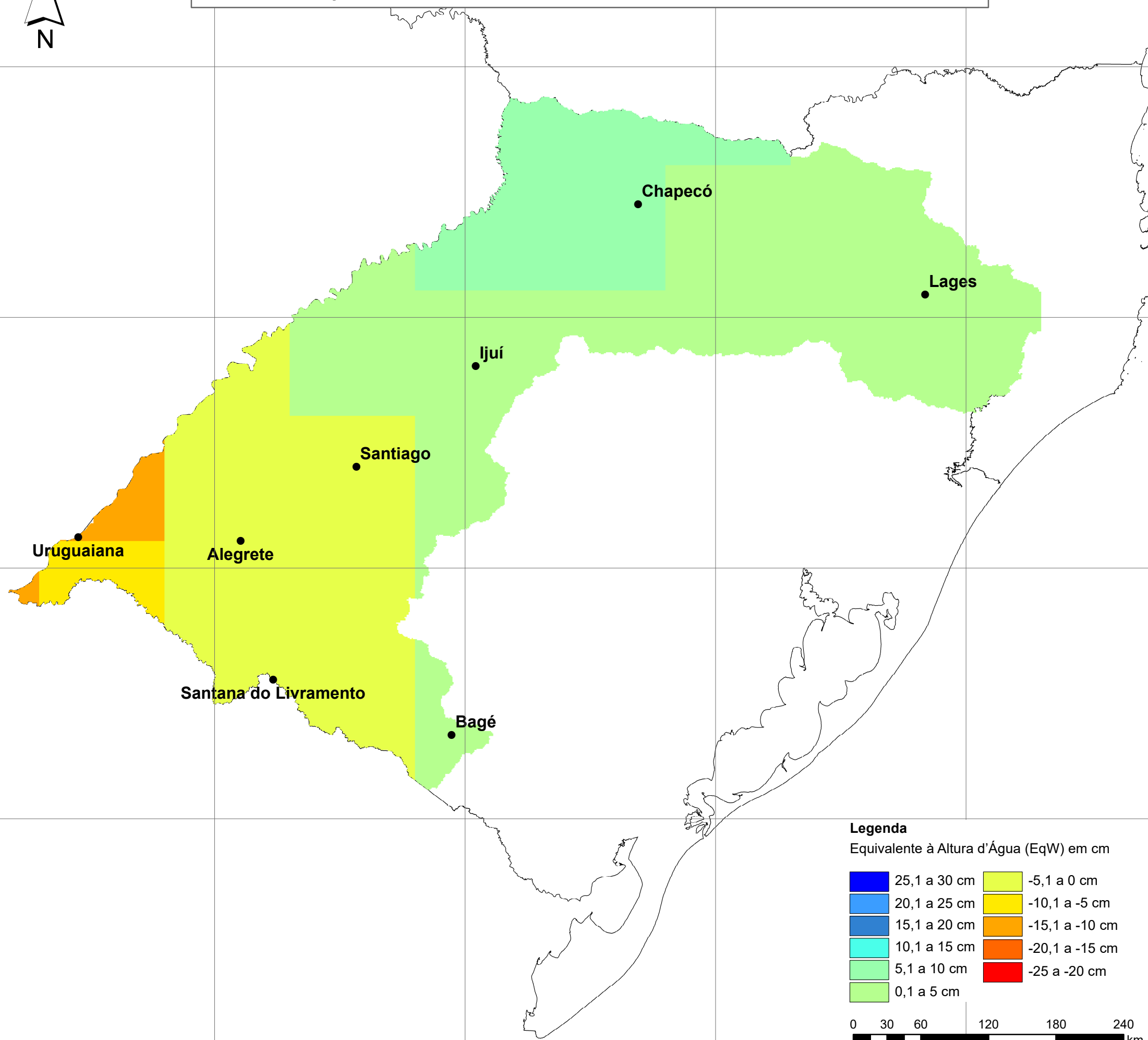
34°0'0"S

56°0'0"W

54°0'0"W

52°0'0"W

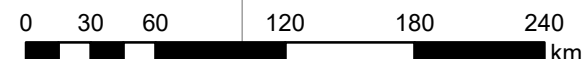
50°0'0"W



**Legenda**

Equivalente à Altura d'Água (EqW) em cm

25,1 a 30 cm	-5,1 a 0 cm
20,1 a 25 cm	-10,1 a -5 cm
15,1 a 20 cm	-15,1 a -10 cm
10,1 a 15 cm	-20,1 a -15 cm
5,1 a 10 cm	-25 a -20 cm
0,1 a 5 cm	



BASE CARTOGRÁFICA  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

ELABORAÇÃO: Indira Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019



MAPA DO SVI NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM JULHO DE 2012



26°0'0"S

28°0'0"S

30°0'0"S

32°0'0"S

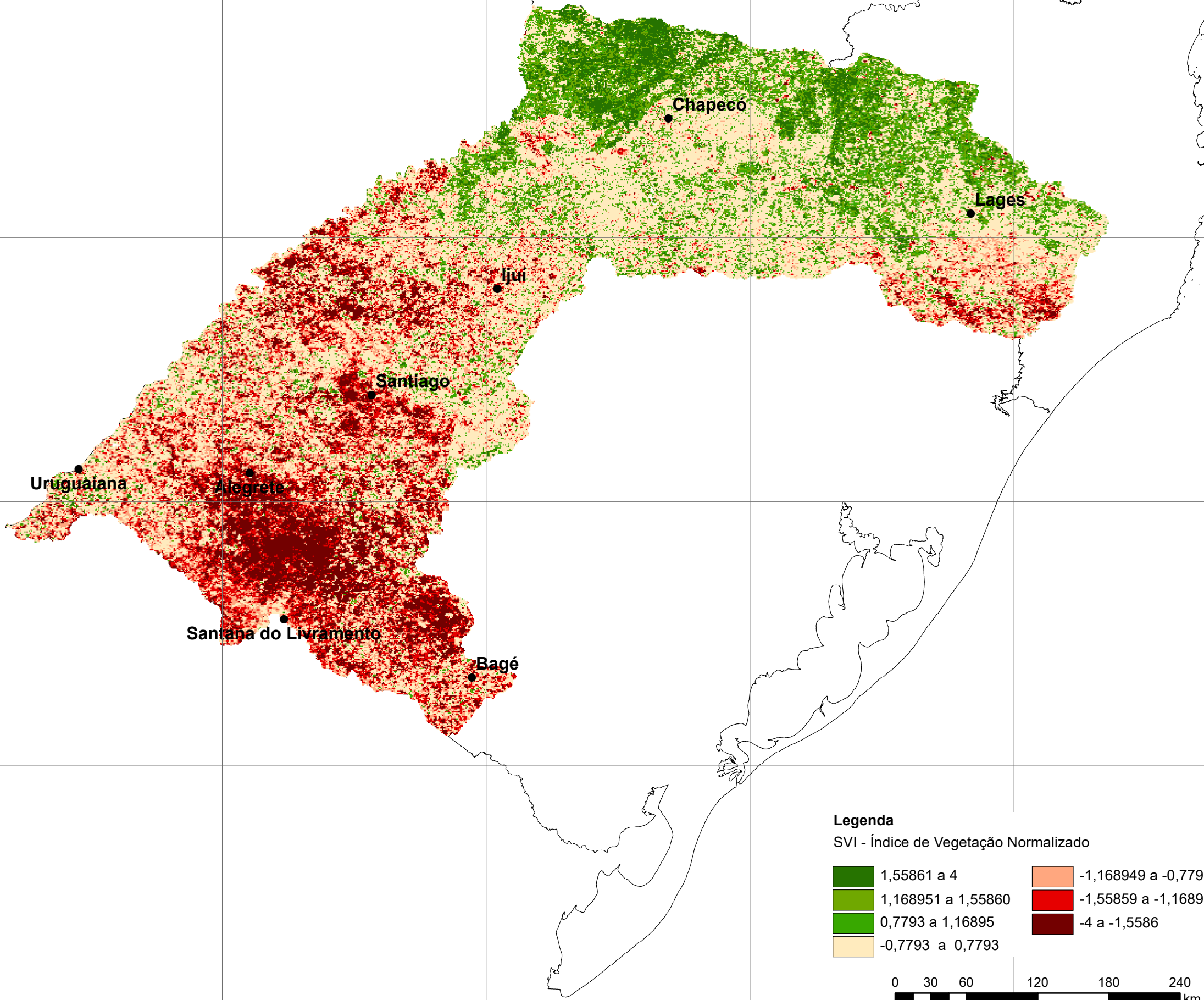
34°0'0"S

56°0'0"W

54°0'0"W

52°0'0"W

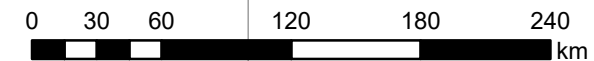
50°0'0"W



**Legenda**

SVI - Índice de Vegetação Normalizado

	1,55861 a 4		-1,168949 a -0,7793
	1,168951 a 1,55860		-1,55859 a -1,16895
	0,7793 a 1,16895		-4 a -1,5586
	-0,7793 a 0,7793		



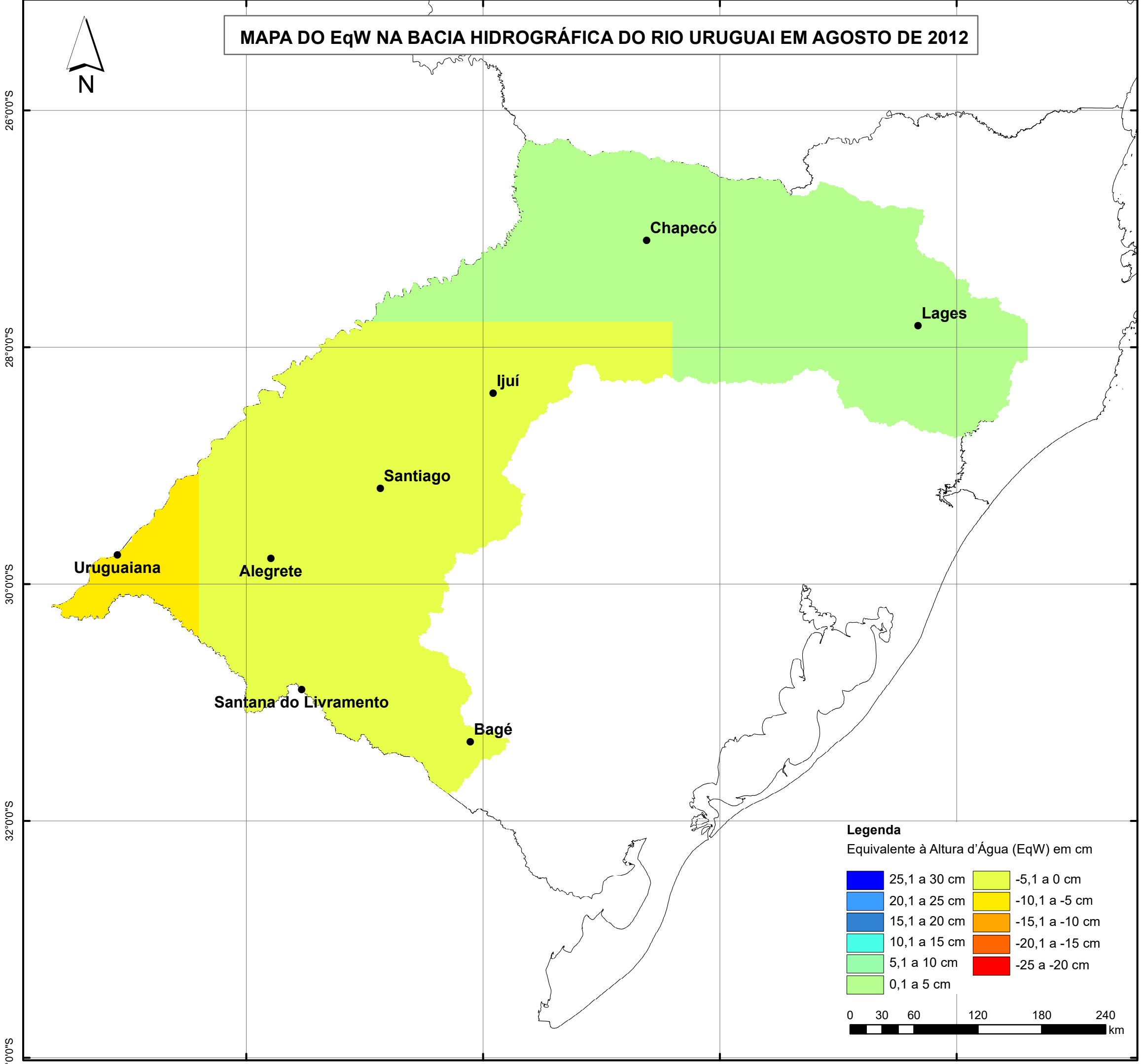
BASE CARTOGRÁFICA  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

ELABORAÇÃO: Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019



**MAPA DO EqW NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM AGOSTO DE 2012**



**Legenda**  
Equivalente à Altura d'Água (EqW) em cm

25,1 a 30 cm	-5,1 a 0 cm
20,1 a 25 cm	-10,1 a -5 cm
15,1 a 20 cm	-15,1 a -10 cm
10,1 a 15 cm	-20,1 a -15 cm
5,1 a 10 cm	-25 a -20 cm
0,1 a 5 cm	

0 30 60 120 180 240 km



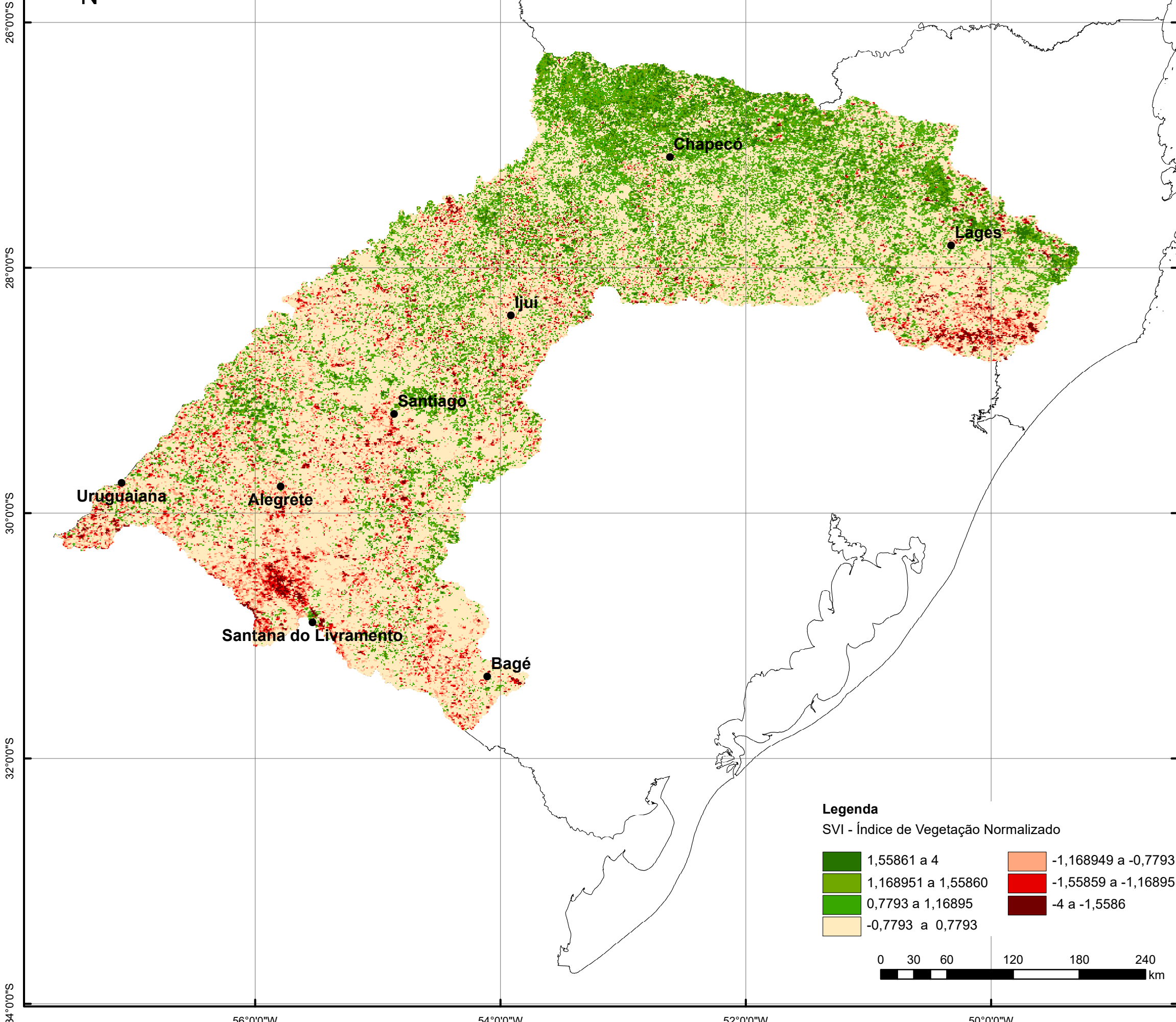
**BASE CARTOGRÁFICA**  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000








**ELABORAÇÃO:** Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019

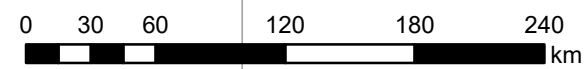


**MAPA DO SVI NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM AGOSTO DE 2012**



**Legenda**  
SVI - Índice de Vegetação Normalizado

	1,55861 a 4		-1,168949 a -0,7793
	1,168951 a 1,55860		-1,55859 a -1,16895
	0,7793 a 1,16895		-4 a -1,5586
	-0,7793 a 0,7793		



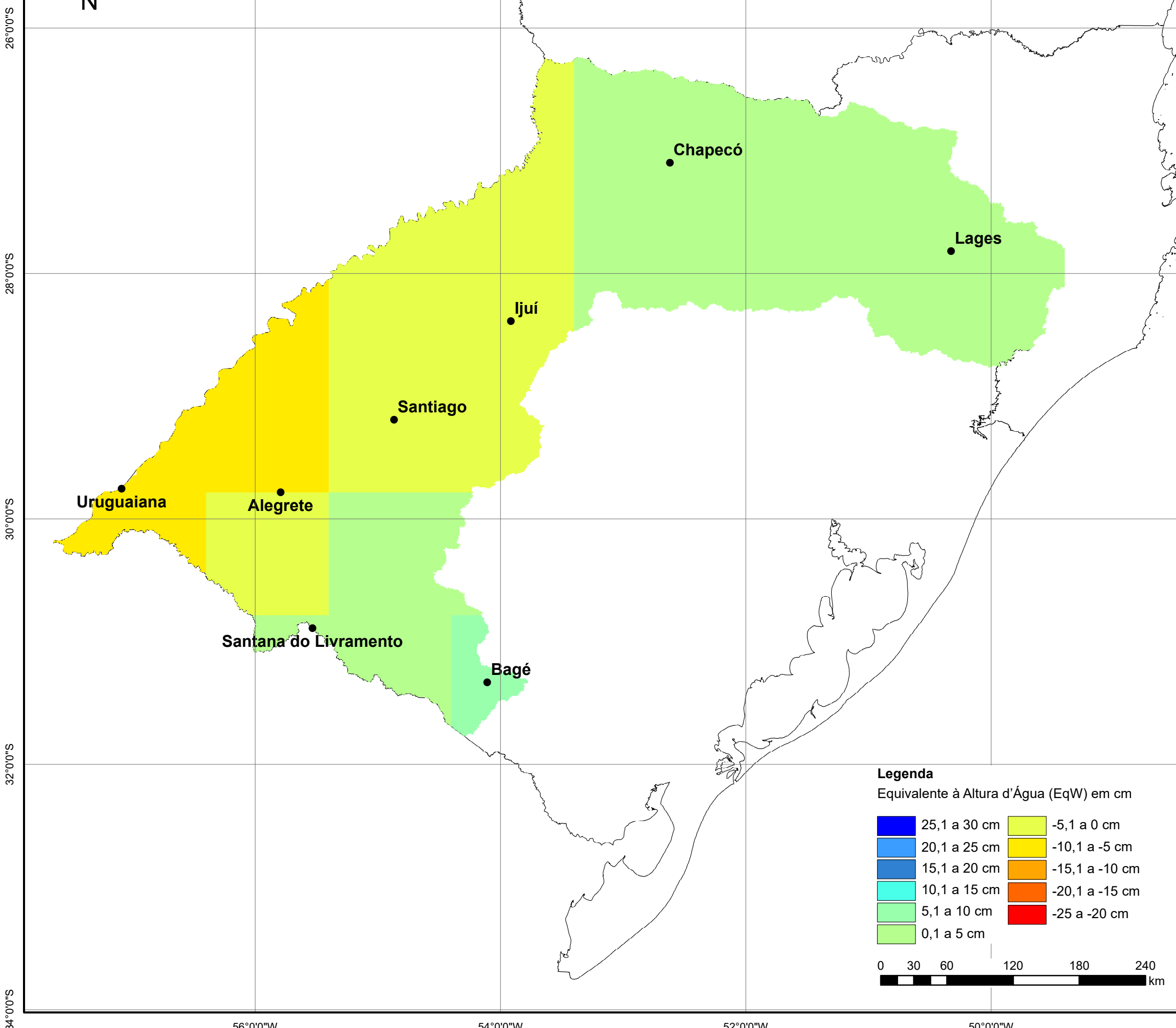
**BASE CARTOGRÁFICA**  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

**ELABORAÇÃO:** Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019

**APOIO**

**MAPA DO EqW NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM SETEMBRO DE 2012**



**Legenda**  
Equivalente à Altura d'Água (EqW) em cm

25,1 a 30 cm	-5,1 a 0 cm
20,1 a 25 cm	-10,1 a -5 cm
15,1 a 20 cm	-15,1 a -10 cm
10,1 a 15 cm	-20,1 a -15 cm
5,1 a 10 cm	-25 a -20 cm
0,1 a 5 cm	

0 30 60 120 180 240 km



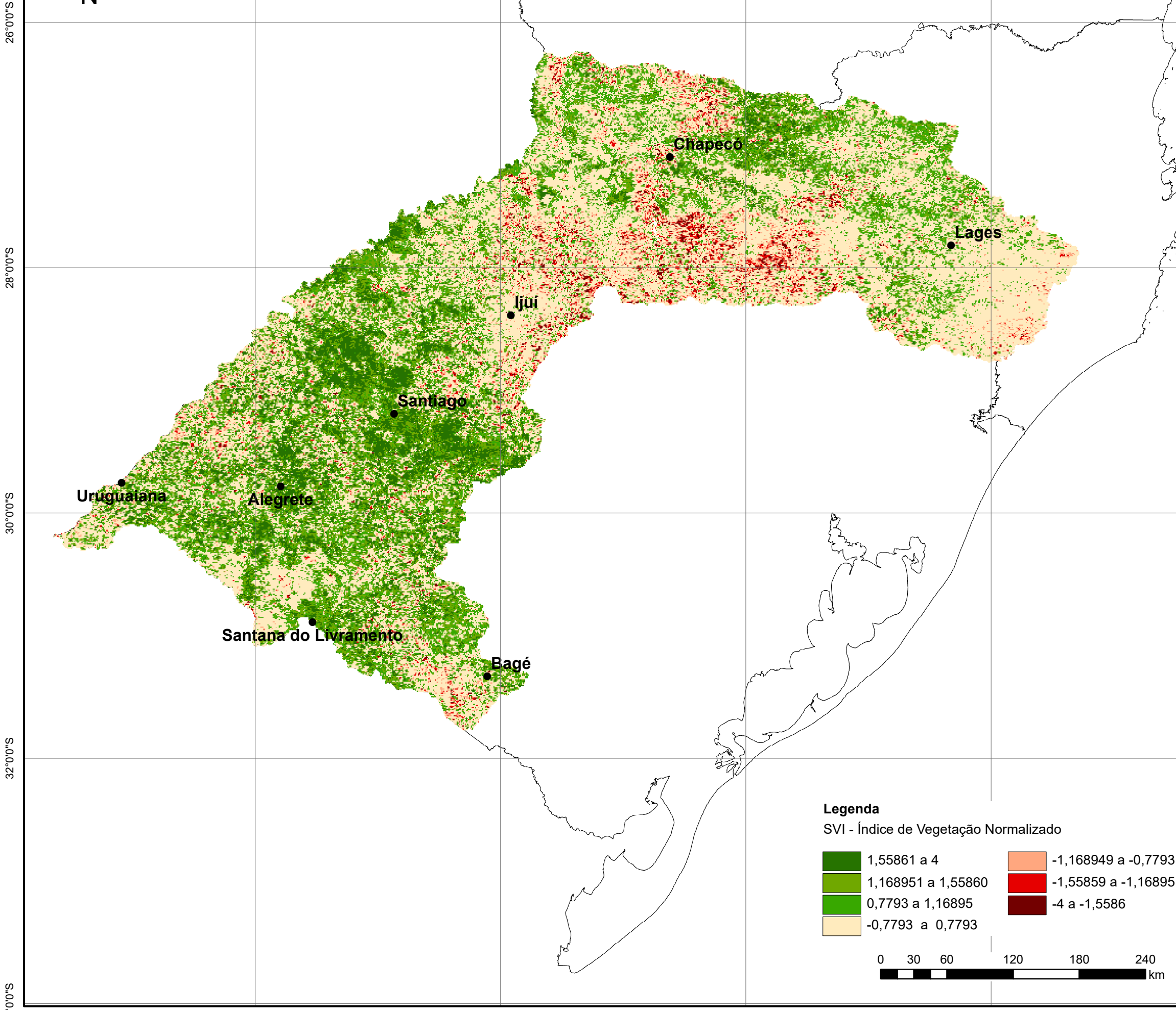
**BASE CARTOGRÁFICA**  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000








**ELABORAÇÃO:** Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019

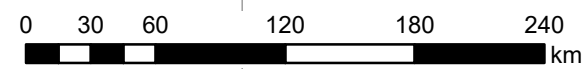


**MAPA DO SVI NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM SETEMBRO DE 2012**



**Legenda**  
SVI - Índice de Vegetação Normalizado

	1,55861 a 4		-1,168949 a -0,7793
	1,168951 a 1,55860		-1,55859 a -1,16895
	0,7793 a 1,16895		-4 a -1,5586
	-0,7793 a 0,7793		



BASE CARTOGRÁFICA  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

ELABORAÇÃO: Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019



**MAPA DO SVI NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM OUTUBRO DE 2012**



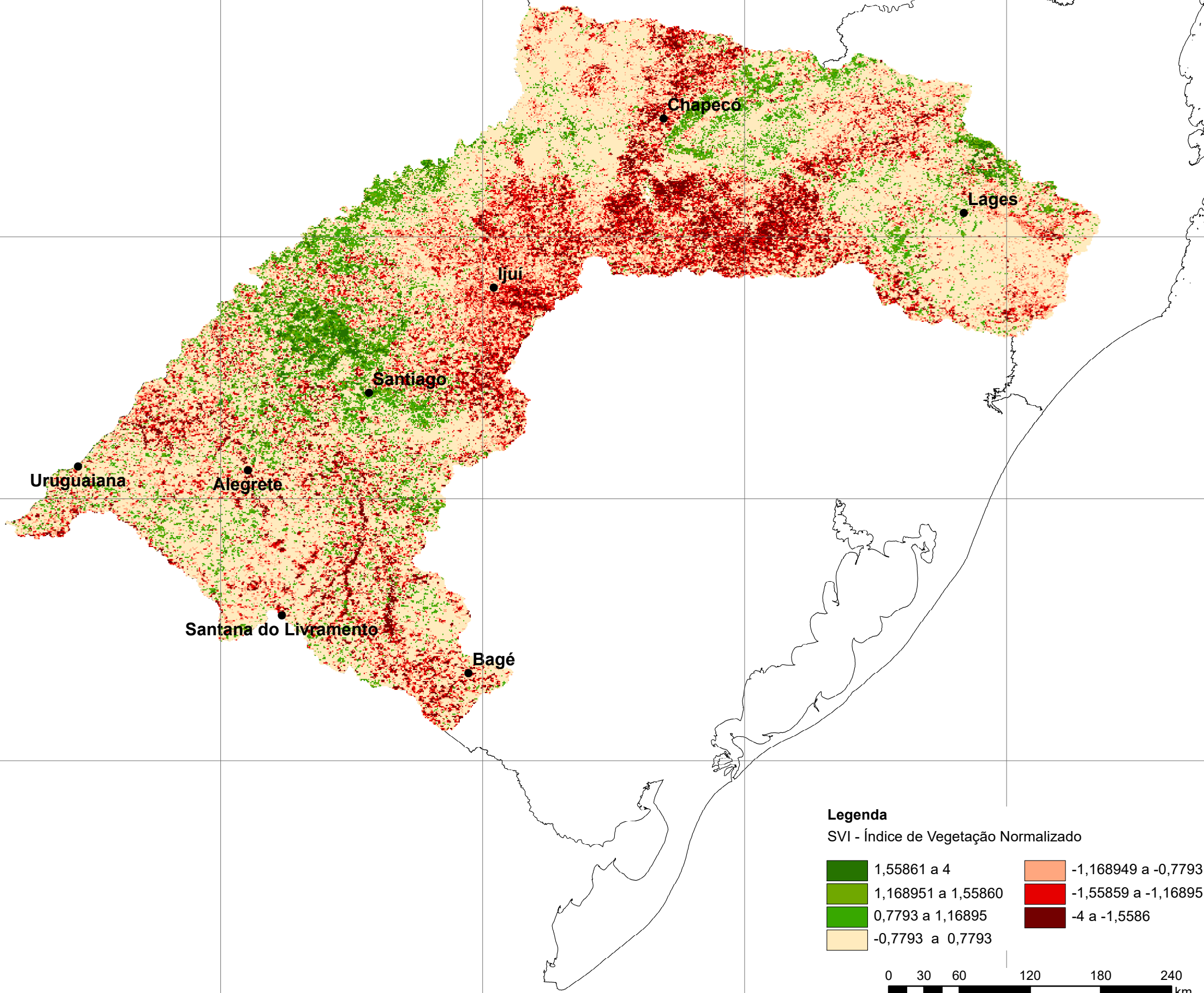
26°0'0"S

28°0'0"S

30°0'0"S

32°0'0"S

34°0'0"S



56°0'0"W








54°0'0"W

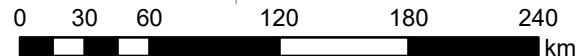
52°0'0"W

50°0'0"W

**Legenda**

SVI - Índice de Vegetação Normalizado

	1,55861 a 4		-1,168949 a -0,7793
	1,168951 a 1,55860		-1,55859 a -1,16895
	0,7793 a 1,16895		-4 a -1,5586
	-0,7793 a 0,7793		



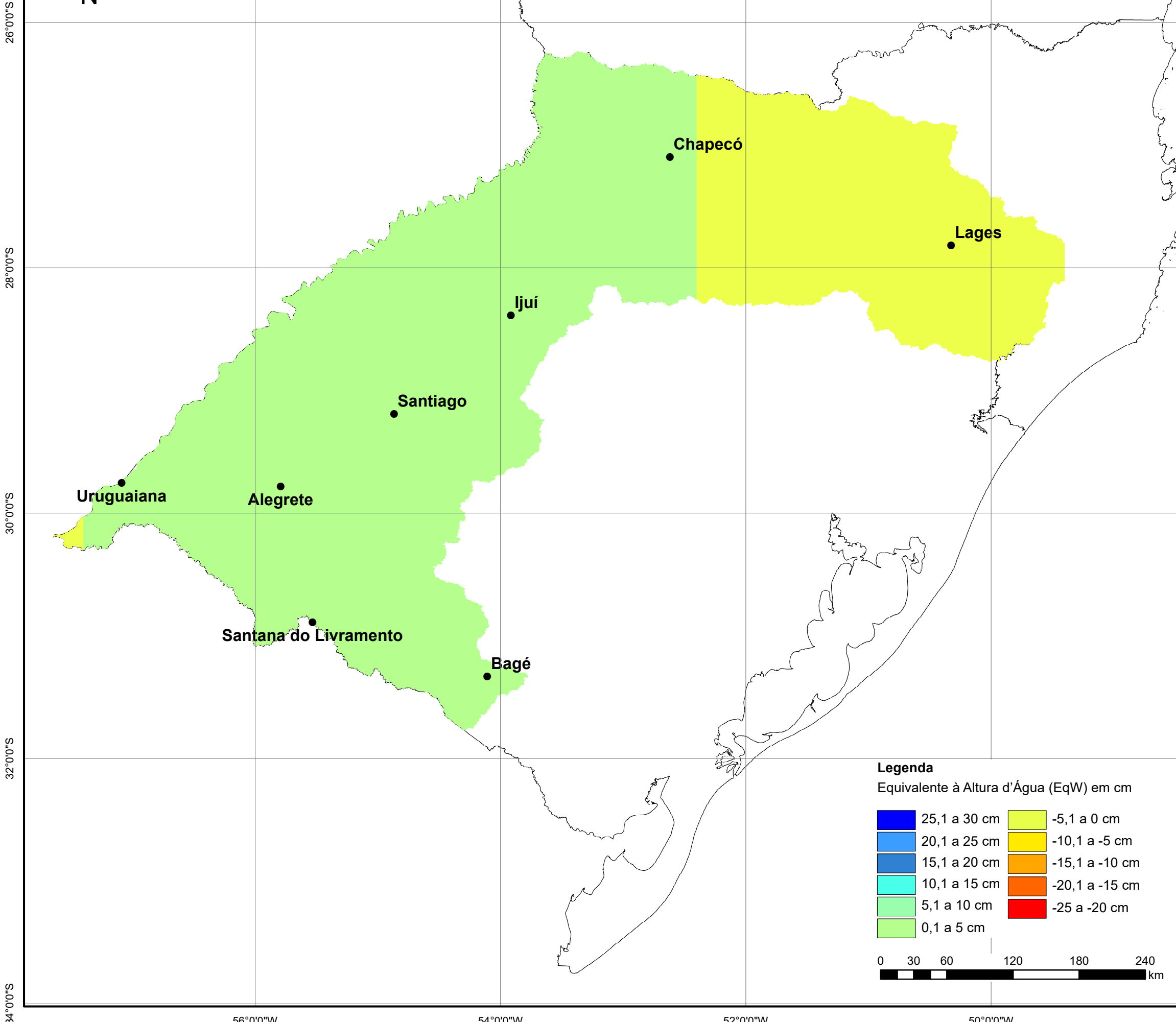
BASE CARTOGRÁFICA  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

ELABORAÇÃO: Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019

**APOIO**

**MAPA DO EqW NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM NOVEMBRO DE 2012**



**Legenda**  
Equivalente à Altura d'Água (EqW) em cm

25,1 a 30 cm	-5,1 a 0 cm
20,1 a 25 cm	-10,1 a -5 cm
15,1 a 20 cm	-15,1 a -10 cm
10,1 a 15 cm	-20,1 a -15 cm
5,1 a 10 cm	-25 a -20 cm
0,1 a 5 cm	

0 30 60 120 180 240 km



**BASE CARTOGRÁFICA**  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

**ELABORAÇÃO:** Indira Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019





MAPA DO SVI NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM NOVEMBRO DE 2012



26°0'0"S

28°0'0"S

30°0'0"S

32°0'0"S

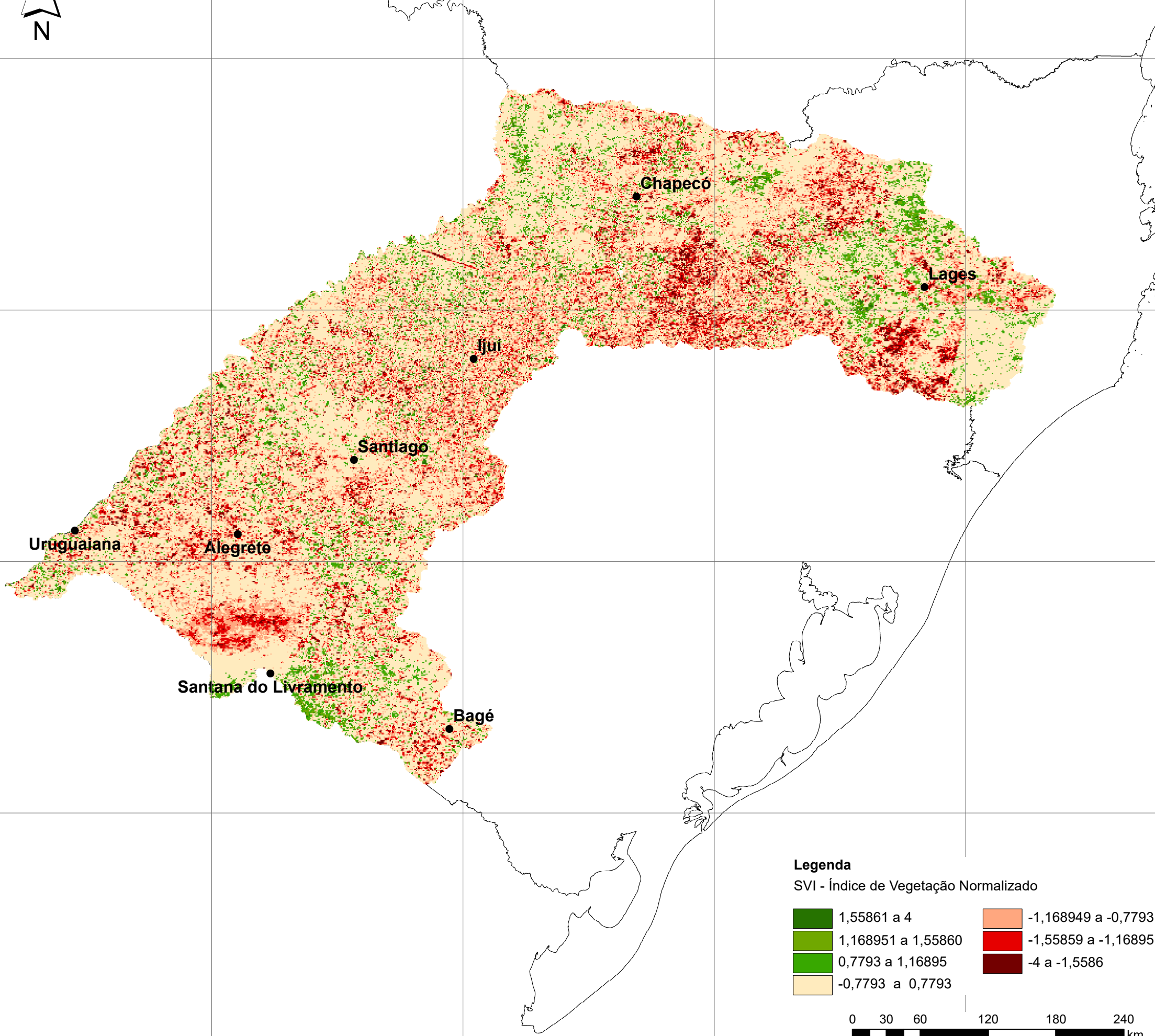
34°0'0"S

56°0'0"W

54°0'0"W








52°0'0"W

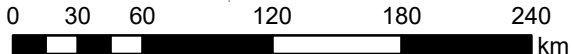
50°0'0"W



**Legenda**

SVI - Índice de Vegetação Normalizado

	1,55861 a 4		-1,168949 a -0,7793
	1,168951 a 1,55860		-1,55859 a -1,16895
	0,7793 a 1,16895		-4 a -1,5586
	-0,7793 a 0,7793		



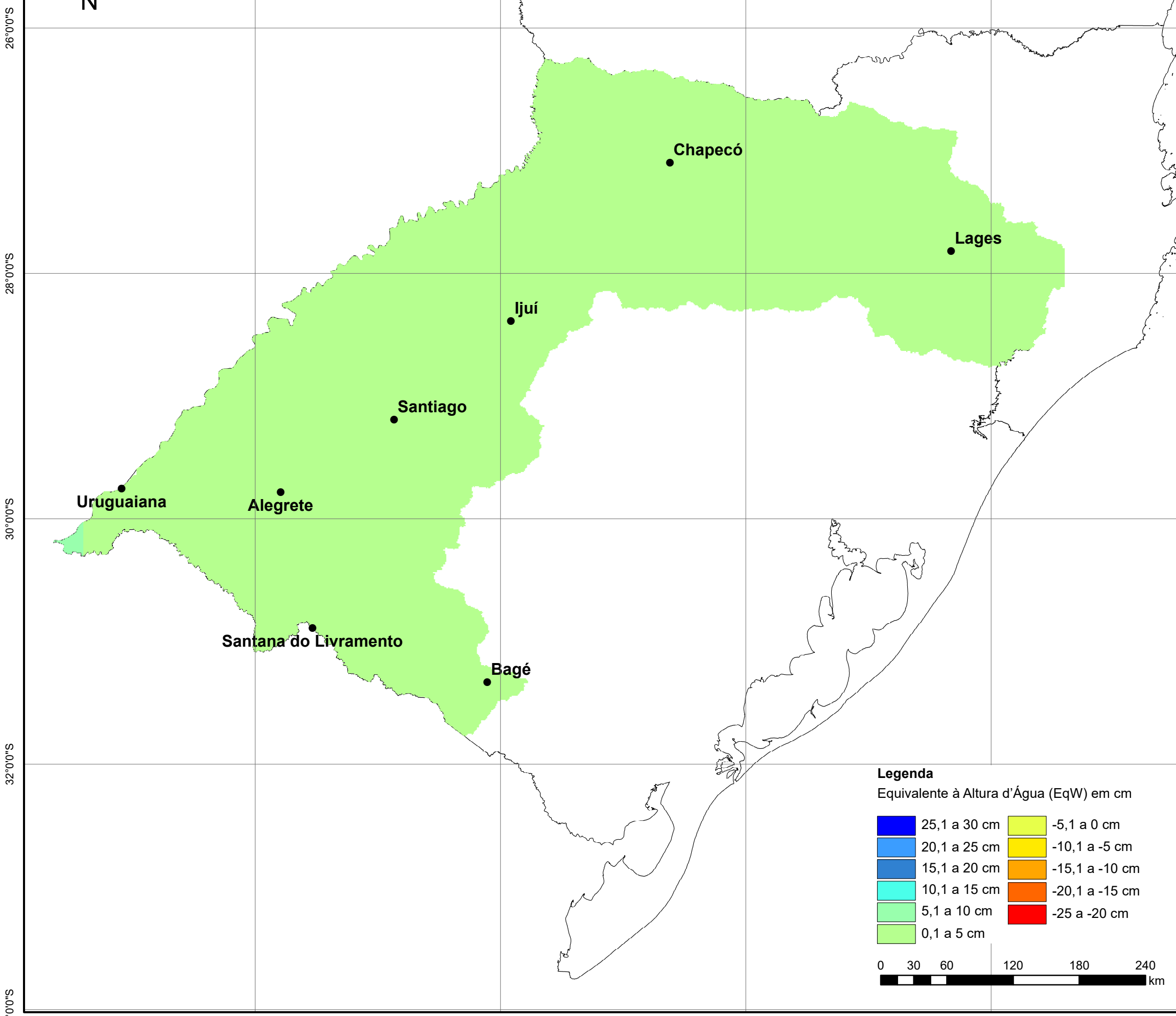
BASE CARTOGRÁFICA  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

ELABORAÇÃO: Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019



**MAPA DO EqW NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM DEZEMBRO DE 2012**



**Legenda**  
Equivalente à Altura d'Água (EqW) em cm

	25,1 a 30 cm		-5,1 a 0 cm
	20,1 a 25 cm		-10,1 a -5 cm
	15,1 a 20 cm		-15,1 a -10 cm
	10,1 a 15 cm		-20,1 a -15 cm
	5,1 a 10 cm		-25 a -20 cm
	0,1 a 5 cm		

0 30 60 120 180 240 km



**BASE CARTOGRÁFICA**  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

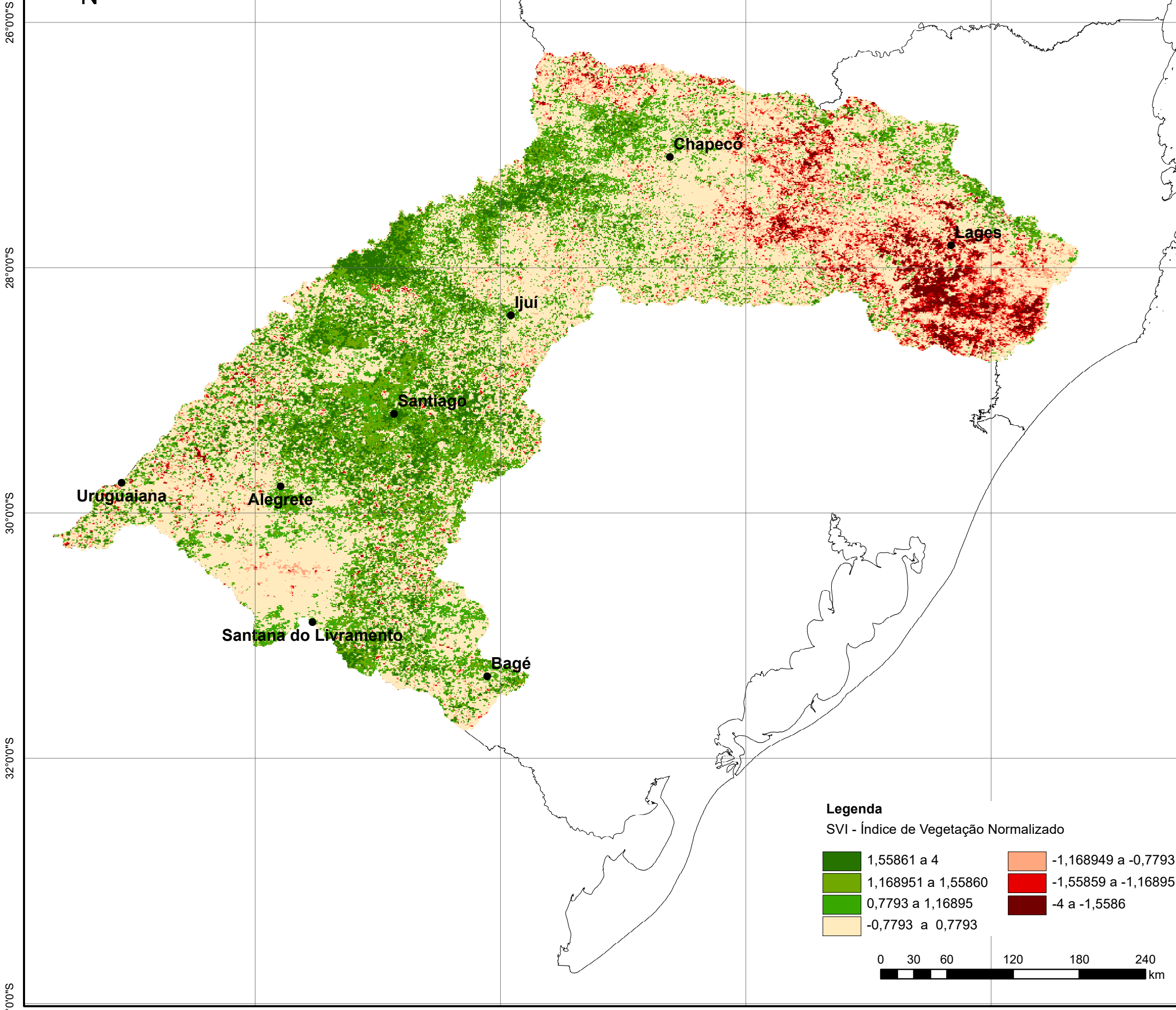
Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

**ELABORAÇÃO:** Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019










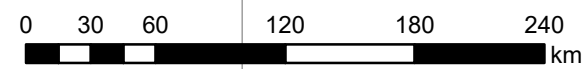
34°00'S 56°00'W 54°00'W 52°00'W 50°00'W

**MAPA DO SVI NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM DEZEMBRO DE 2012**



**Legenda**  
SVI - Índice de Vegetação Normalizado

	1,55861 a 4		-1,168949 a -0,7793
	1,168951 a 1,55860		-1,55859 a -1,16895
	0,7793 a 1,16895		-4 a -1,5586
	-0,7793 a 0,7793		



BASE CARTOGRÁFICA  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

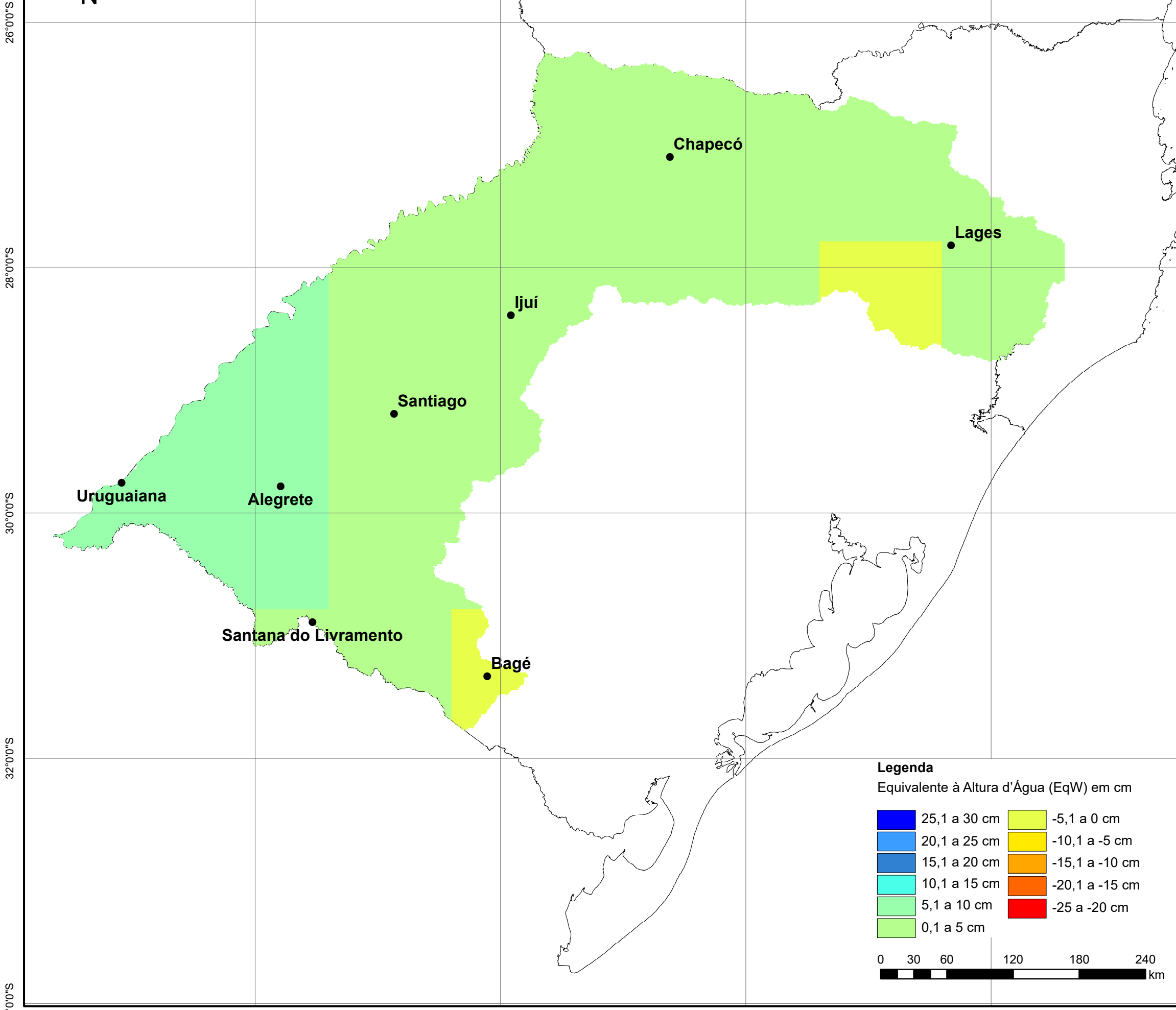
Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

ELABORAÇÃO: Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019



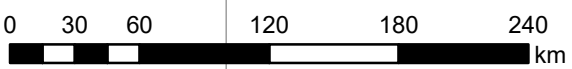
34°00'S 56°00'W 54°00'W 52°00'W 50°00'W

**MAPA DO EqW NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM JANEIRO DE 2013**



**Legenda**  
Equivalente à Altura d'Água (EqW) em cm

25,1 a 30 cm	-5,1 a 0 cm
20,1 a 25 cm	-10,1 a -5 cm
15,1 a 20 cm	-15,1 a -10 cm
10,1 a 15 cm	-20,1 a -15 cm
5,1 a 10 cm	-25 a -20 cm
0,1 a 5 cm	



**BASE CARTOGRÁFICA**  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

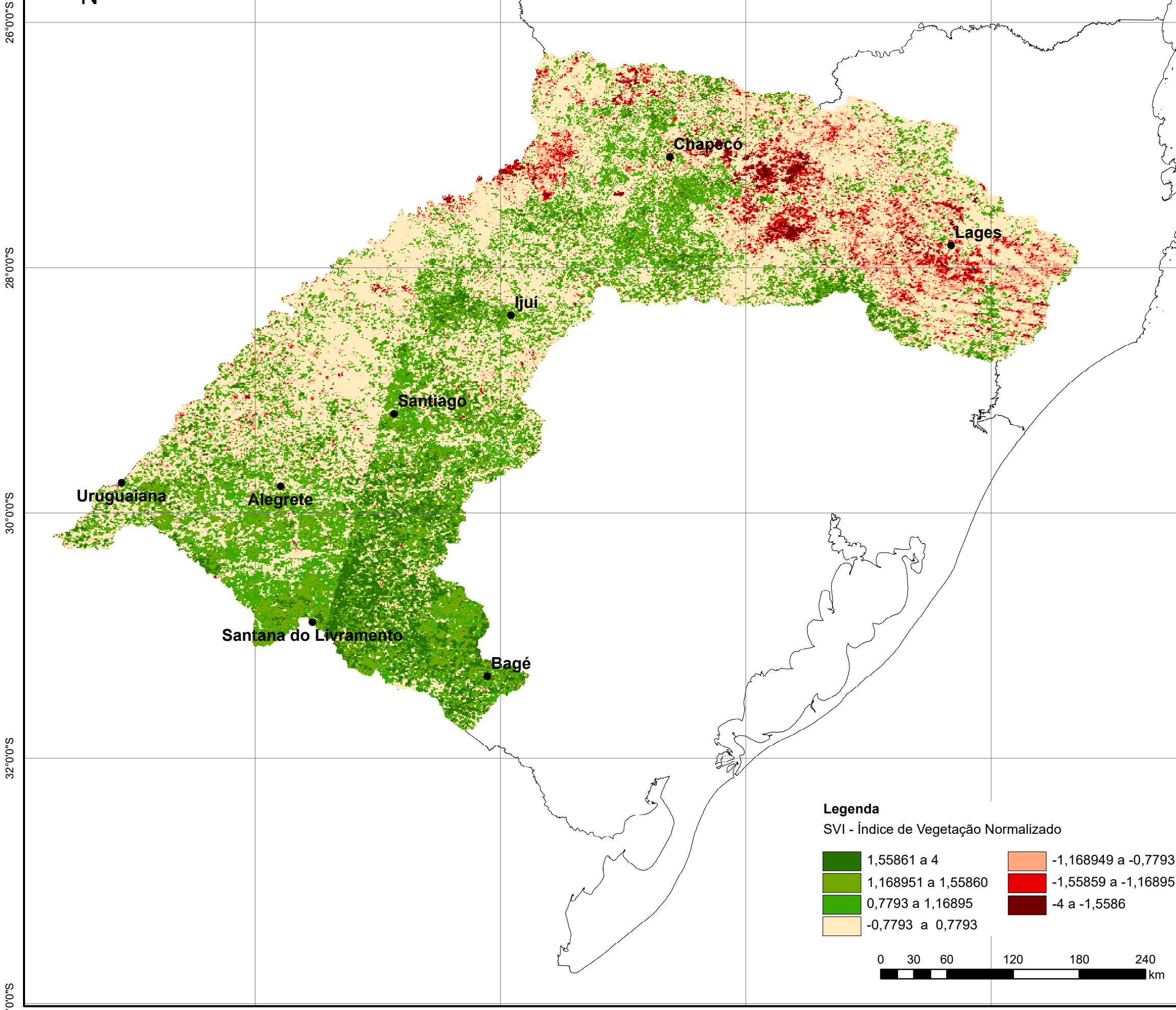
**ELABORAÇÃO:** Indira Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019



26°0'0"S  
28°0'0"S  
30°0'0"S  
32°0'0"S  
34°0'0"S

56°0'0"W 54°0'0"W 52°0'0"W 50°0'0"W

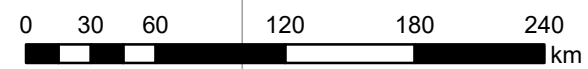
**MAPA DO SVI NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM JANEIRO DE 2013**



**Legenda**

SVI - Índice de Vegetação Normalizado

	1,55861 a 4		-1,168949 a -0,7793
	1,168951 a 1,55860		-1,55859 a -1,16895
	0,7793 a 1,16895		-4 a -1,5586
	-0,7793 a 0,7793		



BASE CARTOGRÁFICA  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

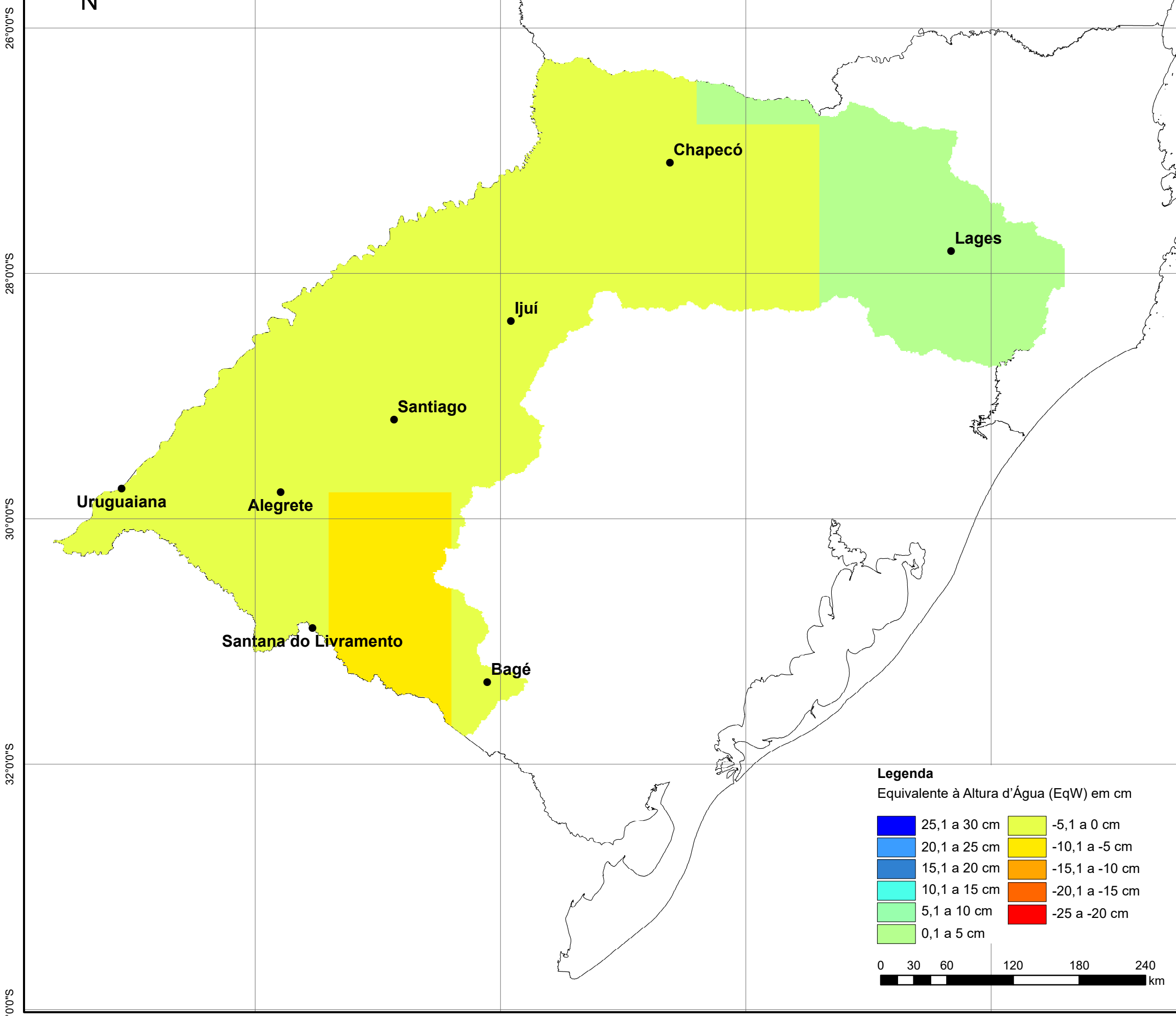
Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

ELABORAÇÃO: Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019

**APOIO**

34°00'S 56°00'W 54°00'W 52°00'W 50°00'W

**MAPA DO EqW NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM FEVEREIRO DE 2013**



**Legenda**  
Equivalente à Altura d'Água (EqW) em cm

25,1 a 30 cm	-5,1 a 0 cm
20,1 a 25 cm	-10,1 a -5 cm
15,1 a 20 cm	-15,1 a -10 cm
10,1 a 15 cm	-20,1 a -15 cm
5,1 a 10 cm	-25 a -20 cm
0,1 a 5 cm	

0 30 60 120 180 240 km



**BASE CARTOGRÁFICA**  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

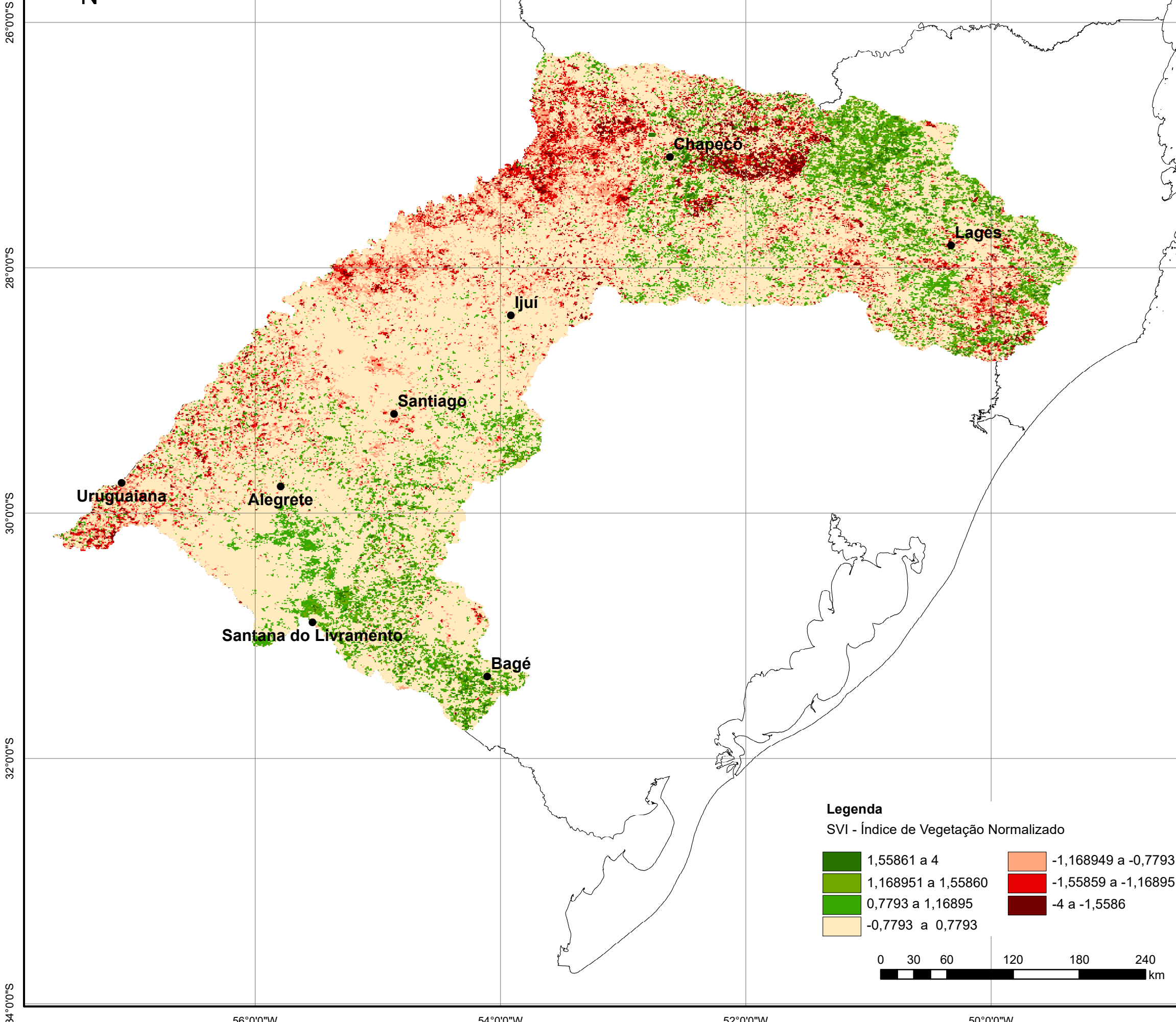
Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

**ELABORAÇÃO:** Indira Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019










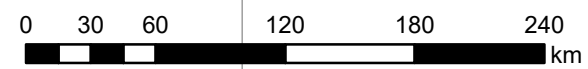
34°0'0"S 56°0'0"W 54°0'0"W 52°0'0"W 50°0'0"W

**MAPA DO SVI NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM FEVEREIRO DE 2013**



**Legenda**  
SVI - Índice de Vegetação Normalizado

	1,55861 a 4		-1,168949 a -0,7793
	1,168951 a 1,55860		-1,55859 a -1,16895
	0,7793 a 1,16895		-4 a -1,5586
	-0,7793 a 0,7793		



BASE CARTOGRÁFICA  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

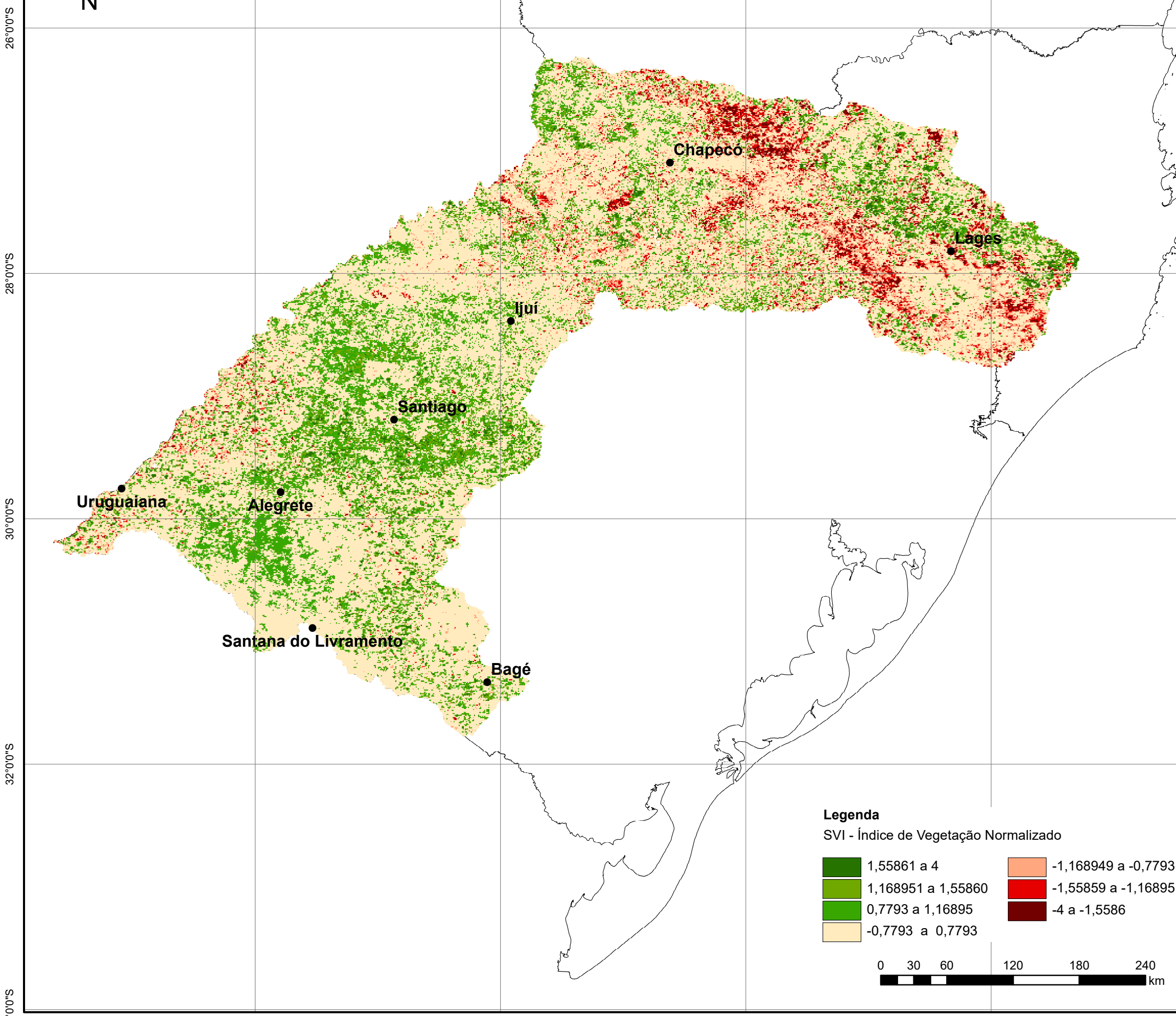
Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

ELABORAÇÃO: Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019








**APOIO**

34°00'S 56°00'W 54°00'W 52°00'W 50°00'W

**MAPA DO SVI NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM MARÇO DE 2013**



**Legenda**  
SVI - Índice de Vegetação Normalizado

	1,55861 a 4		-1,168949 a -0,7793
	1,168951 a 1,55860		-1,55859 a -1,16895
	0,7793 a 1,16895		-4 a -1,5586
	-0,7793 a 0,7793		

0 30 60 120 180 240 km



BASE CARTOGRÁFICA  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

ELABORAÇÃO: Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019



34°0'0"S 56°0'0"W 54°0'0"W 52°0'0"W 50°0'0"W



**MAPA DO QUANTITATIVO DE DECRETOS DE SE DE ESTIAGEM POR MUNICÍPIOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI ENTRE 2003 A 2015.**



26°00'S

28°00'S

30°00'S

32°00'S

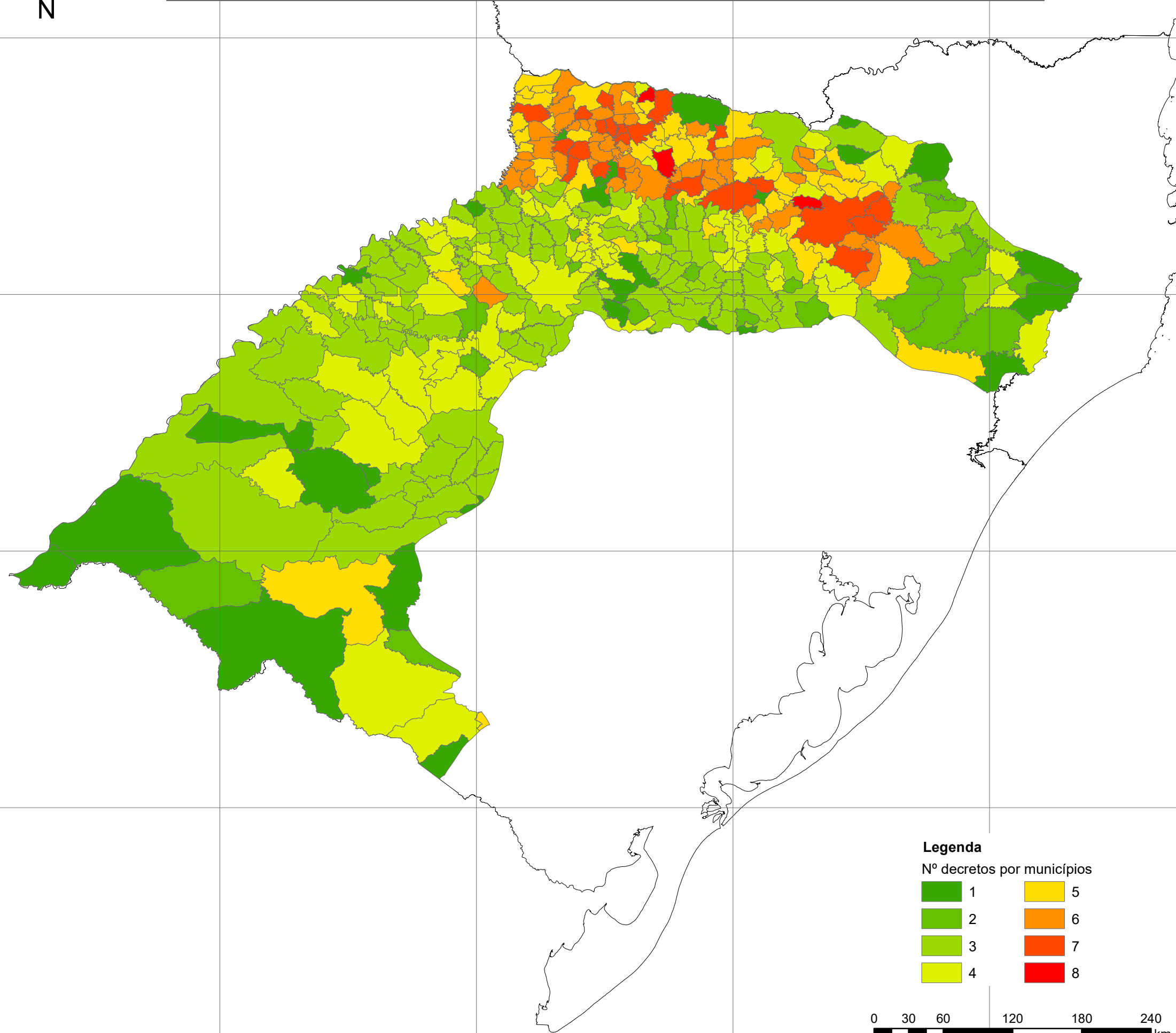
34°00'S

56°00'W

54°00'W

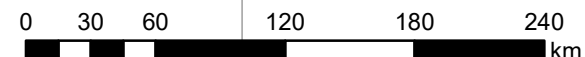
52°00'W

50°00'W



**Legenda**

Nº decretos por municípios



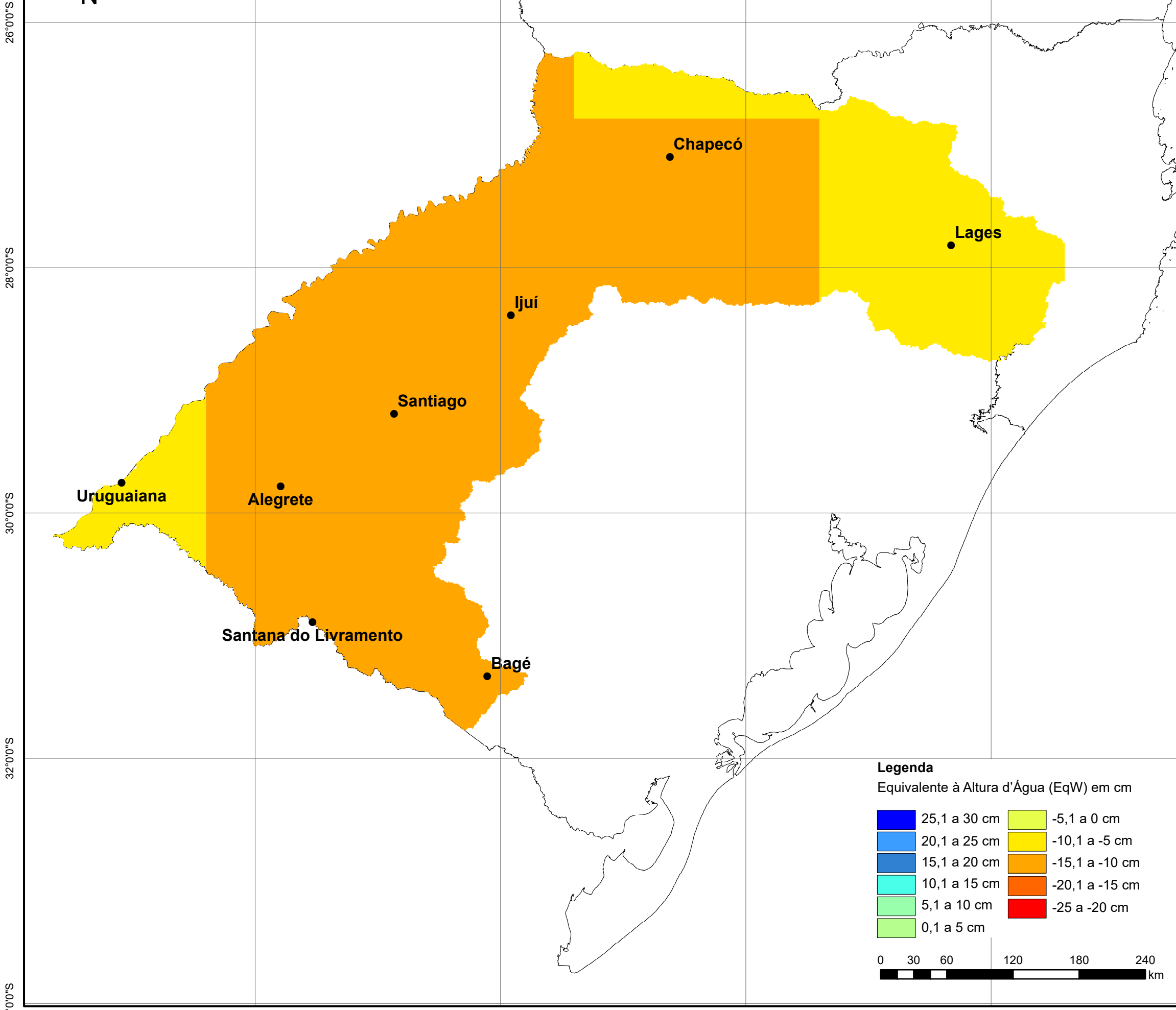
BASE CARTOGRÁFICA  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

ELABORAÇÃO: Indira Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019



**MAPA DO EqW NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM MARÇO DE 2005**



**Legenda**  
Equivalente à Altura d'Água (EqW) em cm

25,1 a 30 cm	-5,1 a 0 cm
20,1 a 25 cm	-10,1 a -5 cm
15,1 a 20 cm	-15,1 a -10 cm
10,1 a 15 cm	-20,1 a -15 cm
5,1 a 10 cm	-25 a -20 cm
0,1 a 5 cm	

0 30 60 120 180 240 km



**BASE CARTOGRÁFICA**  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

**ELABORAÇÃO:** Indiara Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019



34°0'0"S 56°0'0"W 54°0'0"W 52°0'0"W 50°0'0"W

**MAPA DO EqW NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO URUGUAI EM MAIO DE 2009**



26°0'0"S

28°0'0"S

30°0'0"S

32°0'0"S

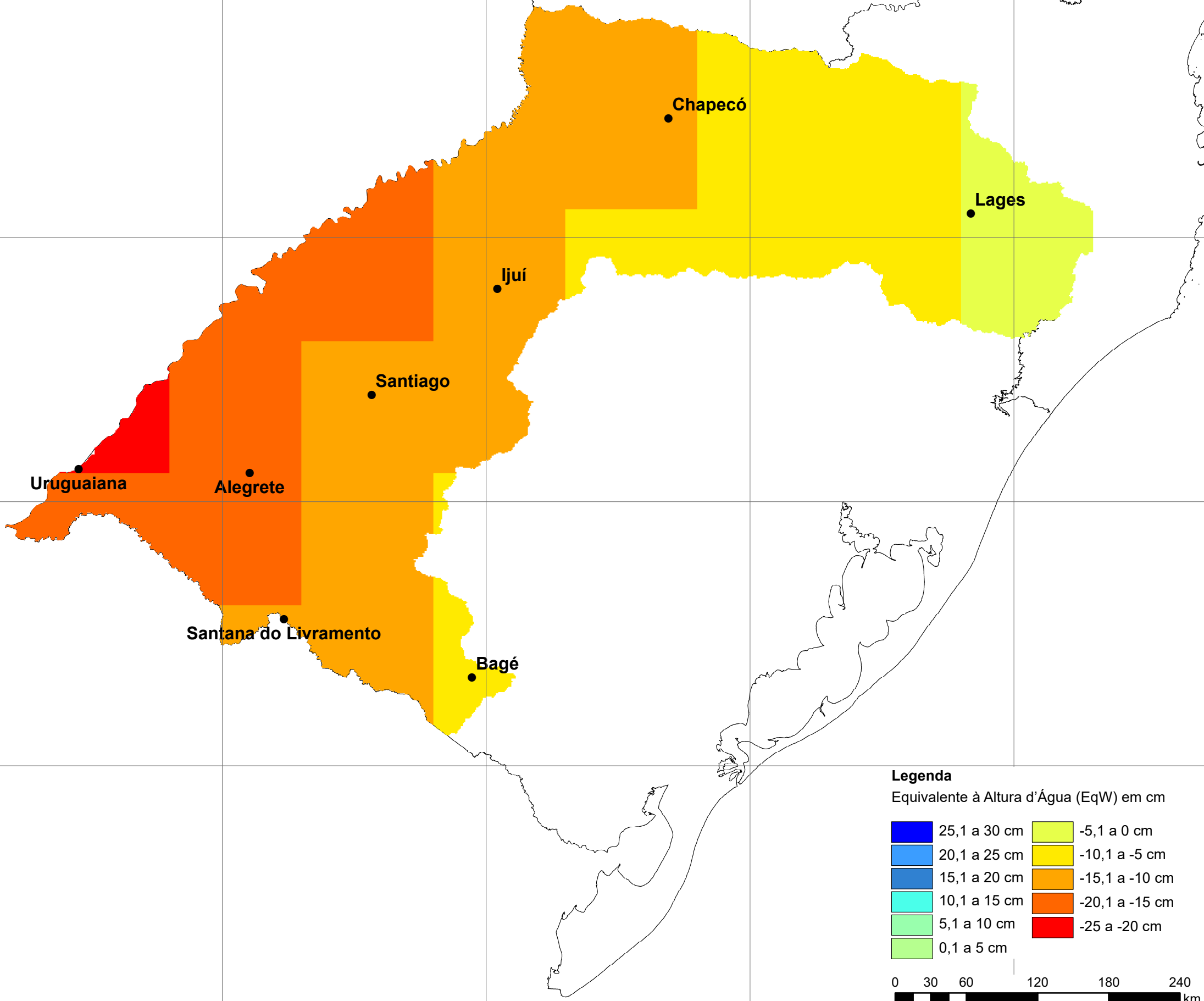
34°0'0"S

56°0'0"W

54°0'0"W

52°0'0"W

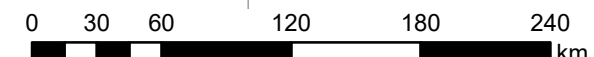
50°0'0"W



**Legenda**

Equivalente à Altura d'Água (EqW) em cm

25,1 a 30 cm	-5,1 a 0 cm
20,1 a 25 cm	-10,1 a -5 cm
15,1 a 20 cm	-15,1 a -10 cm
10,1 a 15 cm	-20,1 a -15 cm
5,1 a 10 cm	-25 a -20 cm
0,1 a 5 cm	



BASE CARTOGRÁFICA  
Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milionésimo, BCIM. IBGE, 2010.

Sistema de Coordenadas Geográficas  
Sistema Geodésico de Referência: SIRGAS 2000.  
Escala 1/3.500.000

ELABORAÇÃO: Indira Bruna Costa M. Moraes  
Ano: 2019

