

Universidade de São Paulo

Instituto de Geociências

**ESTUDO HIDROGEOLÓGICO E MODELO CONCEITUAL DE FLUXO DE ÁGUA  
SUBTERRÂNEA E SUPERFICIAL NA BACIA TRANSFRONTEIRIÇA DO QUARAÍ,  
BRASIL/URUGUAI**

Trabalho Final

TF-18/43

Aluno: Vitor Ariza Malagutti

Orientadora: Alexandra Vieira Suhogusoff

Coorientador: Roberto Kirchheim

São Paulo

2018

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Prof. Dra. Alexandra Vieira Suhogusoff e ao MSc. Roberto Kirchheim pelo total apoio, suporte, críticas e conversas produtivas que tivemos durante as etapas deste projeto ao longo do ano, sem as quais não seria possível a realização deste trabalho. Este foi um ano de muito aprendizado e gostaria de agradecer-lhos pela paciência, dedicação e oportunidades que me proporcionaram.

Ao Centro Regional de Gestão de Águas Subterrâneas em Montevideo (CeReGAS), em especial ao diretor Alberto Manganelli e à geóloga Natalie Aubet que me receberam de braços abertos durante o período de *pasantía*, no qual realizamos viagens de campo, compartilhamos dados sobre e pude aprender muito com um dos geólogos mais experientes sobre o Aquífero Guarani. Os meses que estive lá foram de extrema relevância e sou muito grato a todos que me ajudaram,

# ÍNDICE

<b>RESUMO/ABSTRACT.....</b>	<b>6</b>
<b>1.0. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2.0. OBJETIVOS .....</b>	<b>8</b>
<b>3.0. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>8</b>
<b>3.1.Contexto Regional .....</b>	<b>8</b>
3.1.1. <i>Sistema Aquífero Guarani</i> .....	8
3.1.2. <i>Sistema Aquífero Serra Geral</i> .....	10
<b>3.2.Caracterização da Área de Estudo.....</b>	<b>11</b>
3.2.1. <i>Arcabouço Geológico</i> .....	11
3.2.2. <i>Unidades Hidrogeológicas</i> .....	13
3.2.3. <i>Características Hidráulicas dos Aquíferos</i> .....	14
3.2.4. <i>Balanço Hídrico</i> .....	16
3.2.5. <i>Qualidade e idade das águas subterrâneas</i> .....	17
<b>4.0 METODOLOGIA .....</b>	<b>19</b>
<b>4.1. Caracterização Física da Área .....</b>	<b>19</b>
<b>4.2. Elaboração de Base de Dados.....</b>	<b>19</b>
<b>4.3. Viagem de Campo .....</b>	<b>21</b>
<b>4.4. Definição do Arcabouço Geológico .....</b>	<b>22</b>
<b>4.5. Confecção do Modelo Hidrogeológico Conceitual.....</b>	<b>23</b>
<b>5.0. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>24</b>
<b>5.1. Caracterização Física da Bacia .....</b>	<b>25</b>
5.1.1. <i>Modelo Digital de Terreno (Hipsometria) e Definição da Área da Bacia</i> .....	25
<b>5.2. Arcabouço Geológico.....</b>	<b>26</b>
5.2.1. <i>Fotolineamentos</i> .....	28
5.2.2. <i>Seções Geológicas</i> .....	30
5.2.3. <i>Isoespessuras do SASG/SAG</i> .....	36
5.2.4. <i>Mapa Geológico</i> .....	37
<b>5.3. Hidrogeologia.....</b>	<b>38</b>
5.3.1. <i>Potenciométrico</i> .....	39
5.3.2. <i>Pluviométrico</i> .....	40
5.3.3. <i>Base de dados</i> .....	41
5.3.4. <i>Ensaios de Bombeamento</i> .....	44
5.3.4. <i>Mapa Hidrogeológico</i> .....	47
<b>5.4. Modelo Hidrogeológico Conceitual.....</b>	<b>47</b>
<b>6.0. CONCLUSÃO .....</b>	<b>49</b>
<b>7.0. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>50</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Distribuição do SAG na América do Sul e os locais onde ele é confinado pelo SASG (Borghetti et al., 2004).....	<b>9</b>
<b>Figura 2</b> Localização da área de estudo.....	<b>11</b>
<b>Figura 3</b> Carta de foto-lineamentos da Formação Arapey/Serra Geral na Bacia do Quaraí, com diagrama de direções (CIC, 2015a).....	<b>16</b>
<b>Figura 4</b> Mapa hipsométrico da Bacia do Rio Quaraí. ....	<b>25</b>
<b>Figura 5</b> Variações geomorfológicas da bacia. A foto A exemplifica os extensos planaltos da região e a B representa a região de afloramentos de arenitos, com relevo mais ondulado; nota-se, também, o solo avermelhado, indicativo dos arenitos da Formação Botucatu. ....	<b>26</b>
<b>Figura 6</b> (A) Afloramento da Formação Botucatu; (B) Estratificações plano-paralelas de arenitos da Formação Botucatu; (C) Afloramento de basaltos com estrutura tabular plano-paralela; (D) Surgência de água em fraturas em afloramento de basalto; (E) Contato entre sedimentos fluviais mal selecionados e basaltos da Formação Serra Geral; (F) Amostra de ágata encontrada próximo ao afloramento de sedimentos fluviais. Estruturas indicadas por setas e retas. ....	<b>27</b>
<b>Figura 7</b> Mapa de fotolineamentos interpretados da Bacia do Rio Quaraí .....	<b>29</b>
<b>Figura 8</b> Diagramas de Rosa dos fotolineamentos interpretados na região SW (Esquerda) e NE (Direita) da Bacia do Rio Quaraí .....	<b>29</b>
<b>Figura 9</b> Seção transversal A – A` . Os dados utilizados neste perfil são 1- Chajarí (Carrión, 2017), 2- Gaspar (ANCAP), 3- Itacumbú (ANCAP), 4- MT UR – 4 (CPRM), 5- Yacaré (ANCAP), 6- 4300000140 (SIAGAS) e 7- Alegrete (ANP). Os pontos de interrogação indicam inferências na profundidade da camada.....	<b>30</b>
<b>Figura 10</b> Seção transversal B – B` . Os dados utilizados neste perfil são 1- Belem (ANCAP), 2- Gaspar (ANCAP), 3- Itacumbú (ANCAP), 4- MT UR – 4 (CPRM), 5- Pelado (ANCAP) 6- Artigas (ANCAP), 7- 4300022214 (SIAGAS), 8- 139 (Machado, 2005) e 9- Alegrete (ANP).....	<b>31</b>
<b>Figura 11</b> Seção transversal C – C` . Os dados utilizados neste perfil são 1- Monte Caseros (Mársico, 2013), 2- AMT BR – 1 (CPRM), 3- Yacare (ANCAP), 4- AMT UR – 3 (CPRM), 5- 165 (DINAMIGE), 6- Artigas (ANCAP), 7- MT BR – 5 (CPRM) e 8- 4300000305 (SIAGAS). Os pontos de interrogação indicam inferências na profundidade do embasamento.....	<b>32</b>
<b>Figura 12</b> Seção transversal D – D` . Os dados utilizados neste perfil são 1- 4300010237 (SIAGAS), 2- 111 (Machado, 2005), 3- 4300009923 (SIAGAS), 4- 430000916 (SIAGAS), 5- 4300020122 (SIAGAS), 6- 4300009789 (SIAGAS), 7- 4300009803 (SIAGAS), 8- 4300009823 (SIAGAS), 9- 4300020533 (SIAGAS), 10- 4300009827 (SIAGAS), 11- MT BR – 5 (CPRM), 12- 4300010594 (SIAGAS), 13- 4300002351 (SIAGAS), 14- 4300022346 (SIAGAS), 15- 4300000305 (SIAGAS). Os pontos de interrogação indicam inferências na profundidade da camada.....	<b>33</b>
<b>Figura 13</b> Seção transversal E – E` . Os dados utilizados neste perfil são 1- 307 (DINAMIGE), 2- MT UR – 4 (CPRM), 3- Pelado (ANCAP), 4- 221 (DINAMIGE), 5- 4300001157 (SIAGAS), 6- 4300009343 (SIAGAS), 7- MT BR – 5 (CPRM) e 8- 4300000305 (SIAGAS). Os pontos de interrogação indicam inferências na profundidade da camada.....	<b>34</b>
<b>Figura 14</b> Seção transversal F – F` . Os dados utilizados neste perfil são 1- MT UR – 6 (CPRM), 2- Pelado (ANCAP), 3- 231 (DINAMIGE), 4- 4300009821 (SIAGAS), 5- 4300009826 (SIAGAS), 6- 4300022211 (SIAGAS), 7- 4300000887 (SIAGAS), 8- 4300009805 (SIAGAS), 9- 4300009806 (SIAGAS) e 10- 4300022208 (SIAGAS). .....	<b>35</b>
<b>Figura 15</b> Mapa de isópacas para a Formação Serra Geral na Bacia do Rio Quaraí. ....	<b>36</b>

<b>Figura 16</b> Mapa de isopacas do SAG na Bacia do Rio Quaraí .....	<b>37</b>
<b>Figura 17</b> Mapa potenciométrico da Bacia do Rio Quaraí. As setas indicam a direção do fluxo subterrâneo.....	<b>39</b>
<b>Figura 18</b> Variação dos valores de Carga Hidráulica em relação à cota da base do filtro do poço. ....	<b>39</b>
<b>Figura 19</b> Mapa pluviométrico da Bacia do Rio Quaraí. Os dados apresentados são referentes às médias anuais entre 2010 e 2016.....	<b>41</b>
<b>Figura 20</b> Densidade de poços cadastrados na Bacia do Rio Quaraí .....	<b>42</b>
<b>Figura 21</b> Volume de água subterrânea por hora extraídos na Bacia do Rio Quaraí .....	<b>42</b>
<b>Figura 22</b> Gráfico da variação dos valores de N.A. durante os ensaios de rebaixamento e recuperação nos poços que explotam águas do SAG.....	<b>45</b>
<b>Figura 23</b> Gráfico da variação dos valores de N.A. durante os ensaios de rebaixamento e recuperação nos poços que explotam águas do SSAG.....	<b>45</b>
<b>Figura 24</b> Bloco diagrama conceitual da Bacia do Rio Quaraí. As setas indicam os fluxos hidrológicos referentes ao ciclo da água no SASG (verde) e SAG (azul). ....	<b>48</b>

## **RESUMO**

O presente trabalho consiste no estudo hidrogeológico da bacia transfronteiriça do Rio Quaraí, cujas águas são pertencentes ao Sistema Aquífero Guarani (SAG) e Sistema Aquífero Serra Geral (SASG). Além de grande parte de suas águas subterrâneas fazerem parte do SAG, que apresenta dimensões continentais e se encontra em quatro países (Brasil, Uruguai, Argentina e Paraguai), a bacia é denominada transfronteiriça por estar contida aproximadamente 40% no Brasil e 60% no Uruguai. As águas da bacia são utilizadas para abastecimento público e industrial nas cidades e vilarejos da região, assim como, para irrigação nos cultivos de rizicultura locais, apresentando uma grande demanda deste recurso. Para a realização do trabalho serão coletados e interpretados dados referentes a perfis construtivos de poços, perfis litológicos, ensaios de bombeamento, sondagens áudio e magnetotelúricas, séries históricas pluviométricas, piezometrias, modelos digitais de terreno e imagens de satélite. Ao final, será apresentado um modelo conceitual hidrogeológico integrando águas subterrâneas e superficiais da região através de seções transversais integradas com blocos diagramas, nos quais serão apresentados o arcabouço geológico assim como seus sistemas aquíferos, a interação entre eles e seus respectivos parâmetros inerentes para o entendimento do fluxo da água. Serão apresentados, também, integração dos resultados de bombeamento e recuperação, mapas temáticos de fluxo d'água, isópicas de cada sistema aquífero.

## **ABSTRACT**

*This project consists on a hydrogeological study of the Quaraí river transboundary basin, which is part of both the Guarani Aquifer System (GAS) and the Serra Geral Aquifer System (SGAS). Even though part of its waters belongs to the GAS, that has a continental scale and lies under four countries (Brazil, Uruguay, Argentina and Paraguay), this basin is considered transboundary because it is situated, approximately, 40% in Brazil and 60% in Uruguay. The basin's waters are exploited, not only for public and industrial supply on the nearby cities and villages, but it is also highly demanded on agricultural irrigation of rice plantations. Information of well's logs, drilling reports, pumping tests, audio and magnetotelluric surveys, historical series of pluviometric data, satellite images and digital elevation models will be utilized on this project. It will be presented a hydrological conceptual model integrating underground and surface water utilizing cross sections, block diagram and thematic maps, which will show the geologic framework, aquifer systems, hydraulic parameters and water flux.*

## 1.0. INTRODUÇÃO

Bacias transfronteiriças (Campana, 2005) são aquelas cujas águas se situam sob ou fluem por baixo de duas ou mais jurisdições políticas, podendo ser explotadas por ambas jurisdições. Na maioria dos casos, a gestão de suas águas apresentam diferentes regras para permissão de uso e bombeamento, porém há movimentos de incentivo político mundial para que ocorram gestões unificadas nessas ocasiões.

Os Sistemas Aquíferos Guarani e Serra Geral, por esta definição, são transfronteiriços, possuem parte de suas águas em quatro países da América do Sul (Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai), porém as regras de outorga e concessão de exploração e exploração de suas águas são definidas independentemente por cada país. Este modelo de gestão pode permitir que as águas de um mesmo aquífero sejam mais bombeadas por uma cidade que por outra, vizinha, apenas por esta estar do outro lado da fronteira.

Para a realização de uma gestão integrada entre os países detentores do aquífero é necessário, primeiramente, que haja vontade por parte dos envolvidos e, posteriormente, que sejam feitos estudos hidrogeológicos dos aquíferos que deverão ser consultados antes das tomadas de decisões.

Ter um conhecimento das características hidráulicas do aquífero é de suma importância para um gestão consciente e sustentável de suas águas, de forma que a exploração não seja maior que a capacidade de recarga, levando a um esgotamento do aquífero.

A Bacia do Rio Quaraí, é transfronteiriça, pois, além de suas águas superficiais definirem a fronteira entre Brasil e Uruguai, suas águas subterrâneas fluem sob os dois países. Em área, ela está contida 60% no Uruguai e 40% no Brasil.

O uso de suas águas é amplamente utilizado, tanto no lado brasileiro quanto no uruguai, para o abastecimento público e industrial das cidades fronteiriças (Quaraí e Artigas) e vilarejos próximos. Outra grande finalidade das águas é na irrigação de riziculturas, que demandam grande quantidade de água para que as plantações mantenham uma fina lamina d'água sobre o solo. Com este propósito, produtores rurais criam pequenas barragens nos córregos da região formando açudes, permitindo que seja possível atender a demanda necessária de água durante o ano inteiro.

## 2.0. OBJETIVOS

Este trabalho visa contribuir com o conhecimento hidrogeológico dos Sistema Aquífero Guarani e Sistema Aquífero Serra Geral na área da bacia, apresentando aspectos e dados que podem vir a ser considerados em estudos de escala continental.

O resultado esperado visa compreender quais são os fatores reguladores de recarga e descarga do aquífero, mas também como estes interagem entre si e em qual magnitude.

Espera-se que o modelo conceitual, junto dos demais resultados deste trabalho, possa auxiliar outros estudos sobre o tema e em tomadas de decisões governamentais locais para uma melhor gestão pública de suas águas, tanto superficiais, quanto subterrâneas.

## 3.0. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. Contexto Regional

A Bacia do Rio Quaraí possui três unidades aquíferas distintas: Sistema Aquífero Guarani (SAG), Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e Aquíferos Quaternários. Este trabalho visa estudar com mais detalhe os dois primeiros, pois são mais relevantes e de maior continuidade lateral, além de serem os mais explotados na região.

#### 3.1.1. Sistema Aquífero Guarani

O Sistema Aquífero Guarani (SAG), definido por Rocha (1997), originalmente denominado como Aquífero Gigante do Mercosul (Araújo *et al.*, 1995), é um dos maiores depósitos de água doce do mundo, tendo aproximadamente 1,2 milhões de km<sup>2</sup> de área, estendendo-se da Bacia do Paraná até a Bacia do Chaco-Paraná. Trata-se de um aquífero transfronteiriço, situado na região centro-leste da América do Sul e que abrange os países: Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai (Figura 1).

As águas do SAG encontram-se armazenadas em rochas sedimentares eólio-flúvio-lacustres de idades Triássicas a Jurássicas (245 a 144 Ma), que podem chegar a espessuras de 1.400 m próximo ao depocentro da Bacia do Paraná. O SAG é fonte de água potável no abastecimento de diversas cidades, tem utilização na indústria e na irrigação de plantações, sendo de suma importância sua preservação e estudo (Araújo *et al.*, 1995).

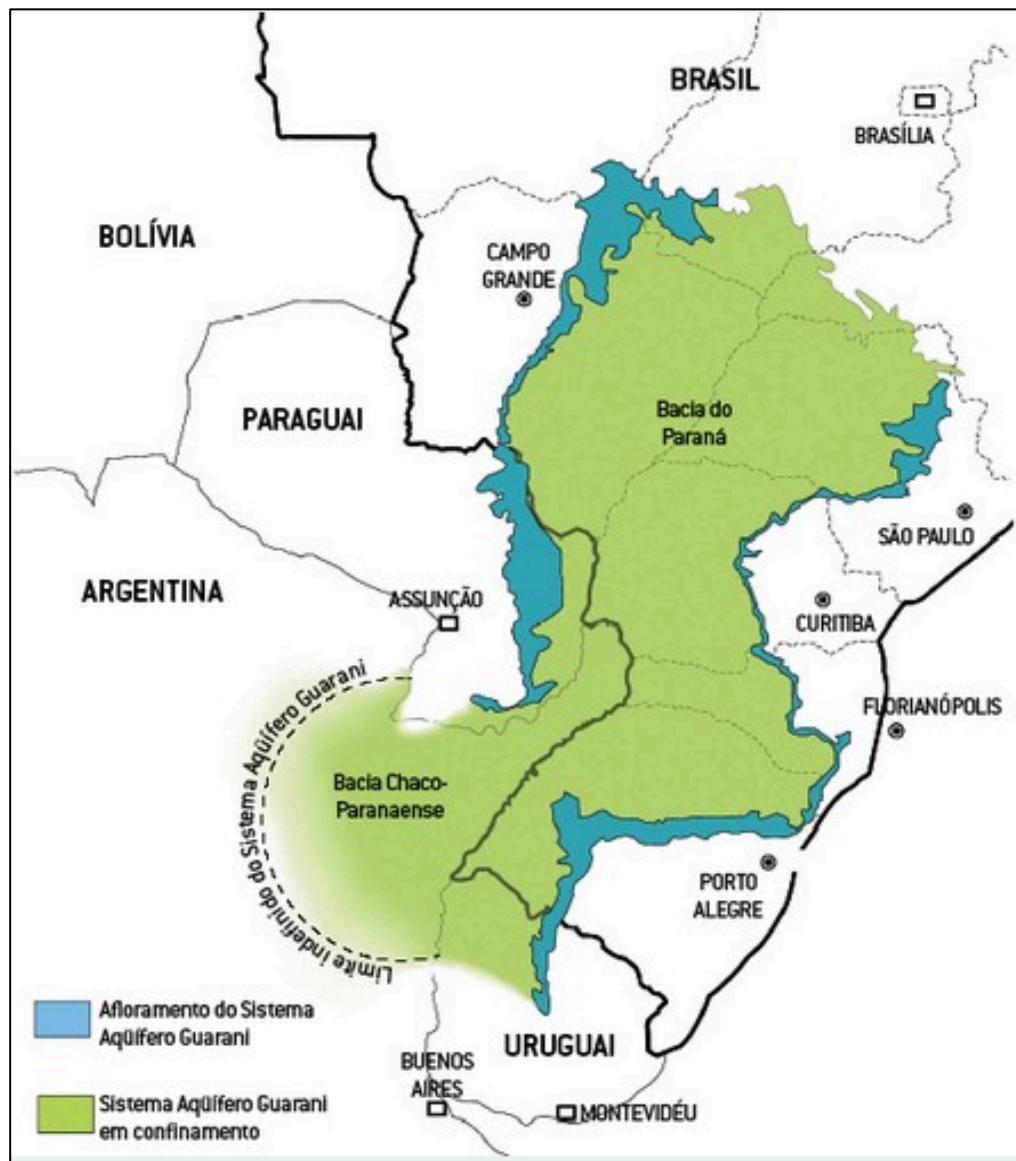


Figura 1. Distribuição do SAG na América do Sul e os locais onde ele é confinado pelo SASG (Borghetti et al., 2004).

Há muitas divergências sobre quais formações fazem, de fato, parte do SAG, pois as rochas e formações apresentam variações laterais entre os quatro países onde ele ocorre. Neste trabalho será utilizada a definição proposta no Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Aquífero Guarani (Bessouat, 2015) que limita o SAG entre os derrames basálticos da Formação Serra Geral e a descontinuidade Permo-Triássica abaixo da Formação Guará, pois esta está presente em quase toda área do SAG. Neste caso, portanto, as rochas do Grupo Rosário do Sul não fariam parte deste aquífero, como sugerem alguns autores.

Por apresentar vasta extensão, há heterogeneidade entre as rochas, por onde percolam as águas, e suas permeabilidades. É possível, por exemplo, encontrar na mesma unidade poços com vazões da ordem de 200 m<sup>3</sup>/h (Compartimento Oeste-

Norte Alto do Uruguai), e poços com vazões menores que 10 m<sup>3</sup>/h ou até improdutíveis (Compartimentos Centrais e Leste). O SAG, portanto, não apresenta homogeneidade em sua potencialidade, visto sua heterogeneidade hidroestratigráfica (Machado, 2006).

Vale ressaltar que por se tratar de um estudo de magnitude continental, há variações de nomenclaturas de formações geológicas nos países onde o aquífero ocorre. A variação de nomenclatura das unidades geológicas entre Brasil e Uruguai podem ser observadas na tabela 1.

Tabela 1. Variações de nomenclatura para as formações geológicas respectivas da área de estudo (Machado, 2005 e CIC, 2015a e 2015b)

Aquífero/País	Uruguai	Brasil
<b>SASG</b>	Formação Arapey	Formação Serra Geral
<b>SAG</b>	Formação Rivera	Formação Botucatu
<b>SAG</b>	Formação Tacuarembó	Formação Guará

### 3.1.2. Sistema Aquífero Serra Geral

O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) é predominantemente fissural, composto por derrames vulcânicos referentes à Formação Serra Geral, de idade entre Jurássico Superior e Cretáceo Inferior (161 a 99,6 Ma). Esse aquífero estende-se por uma área de aproximadamente 1,5 milhões de km<sup>2</sup>, cobrindo grande parte do SAG, como uma capa confinante (Milani, 1997). O SASG caracteriza-se em sua maior parte como um aquífero livre, porém em regiões mais profundas, pode ocorrer a evolução para condições confinadas quando a circulação das águas está limitadas por contatos e/ou juntas horizontais (Rebouças, 1978).

O SASG não possui, em sua maioria, porosidade primária (salvo as zonas de rocha alterada), necessitando de falhas, fissuras e/ou descontinuidades na rocha para que haja percolação de suas águas, sendo, portanto, muito heterogêneo e de difícil caracterização hidráulica. Esse aquífero é amplamente utilizado para o abastecimento público, e obtém grande parte de sua recarga através da pluviometria (Mocellin e Ferreira, 2009).

### 3.2. Caracterização da Área de Estudo

A bacia hidrográfica do Rio Quaraí (Figura 2) encontra-se na estrutura geomorfológica Cuesta do *Haedo*, sendo delimitada a norte pela bacia hidrográfica do Rio Ibicuí (Brasil), a sul pela bacia hidrográfica do Rio Arapey Grande (Uruguai), a oeste pelo Rio Uruguai e a leste pelo *front* da Cuesta do *Haedo*. A bacia está inserida parte na região da *Cuenca Norte* (Bacia Norte) uruguaia e parte na região sudoeste do Rio Grande do Sul. Por definição, é a área limitada por divisores topográficos que recolhem a precipitação e para que as águas superficiais escoam em direção ao Rio Quaraí.

As cidades de relevância que se encontram dentro desta região são Quaraí (Brasil) e Artigas (Uruguai), cidades vizinhas separadas pelo Rio Quaraí. Dentro da área, encontram-se outros povoados menores como Barra do Quaraí (BR), Bella Unión (UR), Javier de Vianna (UR) e Passo de León (UR), além de pequenos produtores rurais. A população total, na área da bacia, é de aproximadamente 150 mil habitantes. O abastecimento público da área é amplamente realizado através da utilização das águas do SAG e SASG, tanto para fins industriais, agrícolas e público.

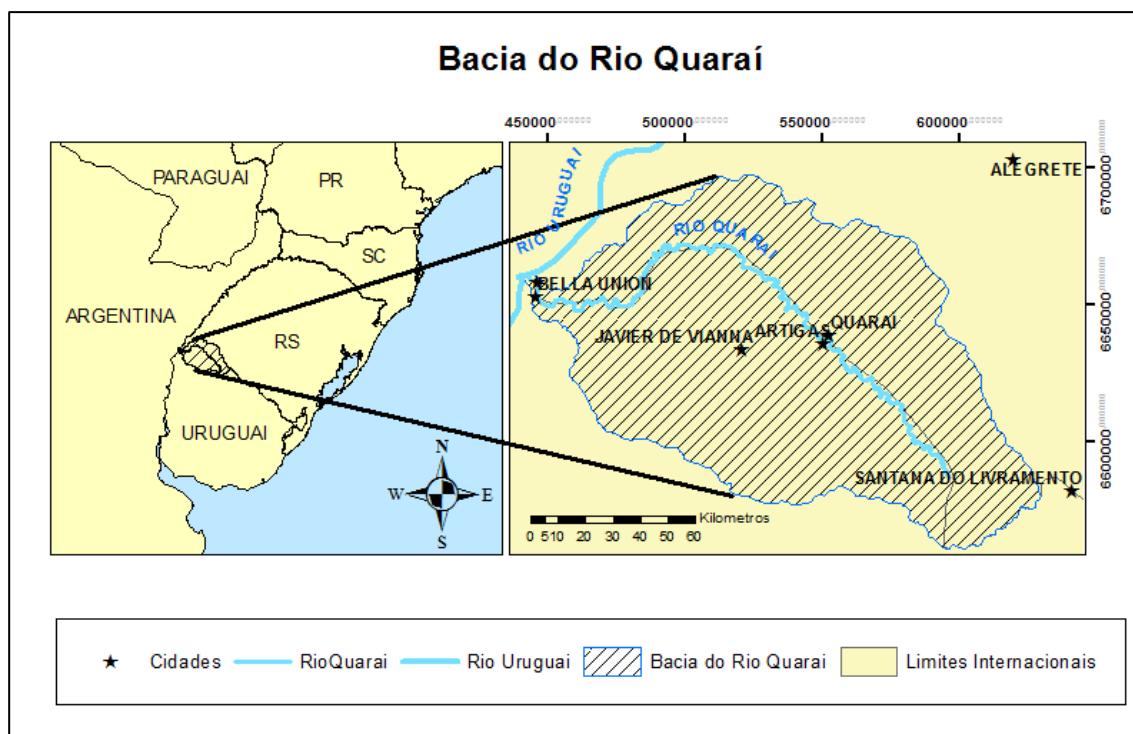


Figura 2. Localização da área de estudo.

#### 3.2.1. Arcabouço Geológico

Geologicamente a região está localizada na Bacia do Paraná, porém como o intuito deste trabalho é estudar o SAG e SASG, serão detalhadas apenas as rochas

pertencentes ao SAG ou posteriores. Este arcabouço é composto por, da base ao topo, arenitos eólicos a flúvio-lacustres das formações Guará e Botucatu (SAG), derrames basálticos da formação Serra Geral (SASG) e, localmente, sedimentos aluviais cenozoicos inconsolidados (Silvério da Silva *et al.*, 2004). De maneira geral, o relevo apresenta vertentes côncavo-convexas (coxilhas), com não mais de 200 m de altura, recoberto por gramíneas (Suetergaray, 1998).

A Formação Guará, descrita por alguns autores como uma parte basal da Formação Botucatu, é associada à Formação Tacuarembó no Uruguai. Ela apresenta arenitos de granulometria fina a média, quartzosa, mediamente a mal selecionada, podendo apresentar matriz argilosa ou não, com estratificações cruzadas, acanaladas e horizontais tabulares planas, de paleoambiente fluvial e flúvio-lacustre, localmente eólica (Wildner *et al.*, 2006 e Scherer e Lavina, 2005). Esta unidade não é aflorante na bacia, porém faz parte do SAG.

A Formação Botucatu, também conhecida como Formação Rivera no Uruguai, é composta por arenitos de granulometria fina a média, quartzosos, arredondados, bem selecionados, com estratificações cruzadas de grande porte (até 30 m de espessura) e alto ângulo (40-90°), cobre cerca de 7% da área aflorante e é caracterizada por um paleoambiente de dunas eólicas (Silvério da Silva *et al.*, 2004 e Scherer *et al.*, 2000 e 2006).

A Formação Serra Geral, ou Formação Arapey, no Uruguai, cobre cerca de 82% da área da bacia, constituída por derrames basálticos, predominantemente toleíticos, e seus equivalentes intrusivos, diabásios e gabros, podendo apresentar variações locais para composições alcalinas ou andesíticas (Almeida, 1986 e Milani, 1997). Os derrames chegam a apresentar mais de 1.000 m de espessura na borda sudoeste da Bacia do Quaraí, capeando as rochas do SAG (Corbo *et al.*, 2011). Há variação de fácies e em algumas porções é presente grande quantidade de vesículas e amigdalas. Pode apresentar fissuras, falhas e lineamentos bem definidos.

Os depósitos sedimentares quaternários correspondem a sedimentos fluviais inconsolidados a semiconsolidados, mal selecionados, variando de argila a cascalho, em geral, próximos aos cursos d'água. Podem estar sobre os basaltos ou arenitos.

Estudos geofísicos magnetotelúricos e sondagens indicam que os basaltos possuem centenas de metros de espessura, apresentando um *trend* de aumento de leste para oeste, podendo chegar a mais de 500 m próximo ao Rio Uruguai (Fondo de Universidades, 2006).

Na região fronteiriça norte entre Uruguai e Argentina, poucos quilômetros a sul da área de estudo, foram realizadas mais sondagens magnetotelúricas para estimação da espessura geral dos basaltos e profundidade do SAG na bacia Chaco-Paraná. Os resultados mostram camadas de basalto variando de 400 a 2.600 m de espessura em um *trend* de incremento Leste-Oeste, respectivamente. Os basaltos, na região mais próxima à Bacia do Quaraí, possuem espessura máxima de 1.150 m, porém a maioria apresenta, em média, até 900 m, onde começariam as rochas do SAG (Corbo *et al.*, 2011).

Os afloramentos da Formação Botucatu estão localizados em “janelas”, regiões com afloramentos de arenitos muito próximos de locais onde o Serra Geral aflorante chega a apresentar até 80 m de espessura (Pérez *et al.*, 2000). Estas “janelas” são relevos residuais, locais onde teriam ocorrido processos tectônicos mais intensos com subidas e descidas de grandes blocos (Silvério da Silva *et al.*, 2004).

Associados a estas “janelas” de arenitos, os areais, primeiramente descritos por Suetergaray (1998), são feições geomorfológicas caracterizadas por sedimentos arenosos inconsolidados ou já consolidados, que formam depósitos eólicos de retrabalhamento dos arenitos da Formação Botucatu.

A recarga do SAG pode ocorrer em regiões onde o arenito é aflorante, nos areais, ou através de um fluxo vertical descendente pelas fraturas do basalto, quando este aflora, até as camadas inferiores (Silvério da Silva *et al.*, 2004 e Gómez *et al.*, 2010). Outra possibilidade seria através de sedimentos quaternários assentados sobre arenitos do SAG.

### *3.2.2. Unidades Hidrogeológicas*

Para este trabalho, as unidades litológicas foram agrupadas em Sistemas Aquíferos segundo características hidrogeológicas semelhantes e serão discutidas a seguir. Ressalta-se que apesar da Formações Botucatu ocorrer restritamente em superfície, o SAG é presente em toda área da bacia, sob os basaltos do SASG.

Os Aquíferos Quaternários estão relacionados aos depósitos aluvionares, que consistem em sedimentos mal selecionados com granulometria variando de argila até cascalho, e possuem porosidade primária de fluxo granular. Apresentam espessura variada, mas em geral são restritos e lenticulares, inexpressivos por conta de seus baixos potenciais de vazão (frequentemente abaixo de 6 m<sup>3</sup>/h). Podem estar sobre

basaltos ou arenitos, estando consolidados ou não. Podem, também, funcionar como um meio de recarga dos outros Sistemas Aquíferos, através de fluxos verticais descendentes, permitindo a infiltração de águas pluviométricas em estratos mais profundos (CIC, 2005a).

O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) é a unidade aquífera de maior extensão na Bacia do Quaraí, responsável por cerca de 80% da cobertura da região. É composto pelos derrames basálticos cretáceos da Formação Serra Geral e apresenta porosidade secundária, condicionada à existência de fraturas, falhas, e outras descontinuidades na rocha, criando fluxos preferenciais para a percolação d'água, razão pela qual o sistema apresenta caráter heterogêneo. Horizontes de rocha alterada, quando abaixo do nível potenciométrico, podem gerar fluxo granular, sendo possível obter um bom potencial de extração. Sua espessura pode variar de inexistente até 1.400 m, aumentando em direção ao depocentro dos derrames, sentido Rio Uruguai (Corbo *et al.*, 2011 e Ramos *et al.*, 2015). Por apresentar estrutura cristalina, pode apresentar planos preferenciais de escoamento superficial, dificultando a infiltração de águas pluviométricas. Regionalmente, apresenta grande densidade de lineamentos extensos no sentido NW-SE, porém na região norte e leste da bacia existem feições menores associadas com sentido NE-SW. O Rio Quaraí, por exemplo, está condicionado por um grande lineamento N70W. Na Bacia do Rio Quaraí, o SASG apresenta um potencial médio com poços explotando vazões abaixo de 10 m<sup>3</sup>/h (CIC, 2005b).

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é uma unidade aquífera composta por rochas sedimentares de idades Cretácicas a Jurássicas (Formações Botucatu e Guará), de origem variando entre eólicas e lacustre fluviais. Apresenta fluxo granular homogêneo em escala regional (Araújo *et al.*, 1995), porém este pode variar, em escalas maiores, dependendo do grau de cimentação de sua matriz. É utilizado como fonte de água no abastecimento público e privado local quando mais próximo à superfície, mas em grande parte da área de estudo o SAG é capeado por rochas basálticas, cujas espessuras podem chegar até a 1.400 m. É aflorante em cerca de 6% da Bacia do Rio Quaraí, em “janelas” de afloramentos da Formação Botucatu, próximas às cidades de Quaraí (BR) e Artigas (UR). Os poços, na Bacia do Rio Quaraí, apresentam vazões médias de 15,3 m<sup>3</sup>/h (CIC, 2005b).

### *3.2.3. Características hidráulicas dos aquíferos*

Pérez *et al.* (2000) analisaram ensaios de bombeamento no SAG, em poços de com intervalos de seção filtrante a profundidades variadas, localizados próximo à

cidade de Artigas, na porção uruguaia da Bacia do Quaraí. Os resultados apontaram uma variação de transmissividade (T) entre estratos permeáveis indicando três horizontes principais: confinado entre 54 e 120 m ( $194 \text{ m}^2/\text{dia}$ ), livre até 120 m ( $374 \text{ m}^2/\text{dia}$ ) e livre profundo entre 150 a 210 m ( $855 \text{ m}^2/\text{dia}$ ). Os autores constataram, também, que havia uma variável vertical de conexão entre os estratos mais rasos aos profundos. Neste mesmo estudo, foram realizadas análises das águas em todas perfurações, que foram categorizadas como bicarbonatada cálcica, própria para diversos usos e sem contaminantes.

Valerio (2004) também estudou o SAG na zona de Santana do Livramento-Rivera. Em seu estudo, foram apresentados dados piezométricos que indicavam uma leve variação nos níveis estáticos entre poços com captação profunda de água de poços com captação rasa. Além disso, notou grande influência das extrações de água nas cidades, que acabavam gerando um fluxo regional de descarga artificial em direção aos poços.

No Boletim Interno, do Projeto Marco, Memória de La Carta Hidrogeológica de la Cuenca Cuareim (CIC, 2015a) foi realizado um resumo dos domínios hidrogeológicos da Bacia do Quaraí e suas características. Demarcaram-se os lineamentos e fraturas nas rochas da Formação Arapey/Serra Geral através de processamento de imagens de satélite e modelos de elevação digital (Figura 3), obtendo-se resultados que indicam direções principais N 50-70 E, N 30-50 W e N 70 W (lineamento onde o Rio Quaraí está encaixado). Concluiu-se que há maior densidade de lineamentos nas porções sul e leste da bacia, onde a espessura do basalto é menor.

O SASG é a principal fonte de água subterrânea de baixo custo (poços de pouca profundidade) e boa qualidade na região, sendo muito explotado em pequenos povoados (342 poços identificados). Suas águas destinam-se ao uso doméstico e à agropecuária, apesar da baixa vazão dos poços (90% destes poços apresentam vazões abaixo de  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  e média de  $4,2 \text{ m}^3/\text{h}$ ) (CIC, 2015a).

No mesmo trabalho (CIC, 2015a) foram identificados mais de 200 poços extraíndo água do SAG. Foram separados os poços onde o aquífero era considerado livre de onde ele apresentava a cobertura basáltica. Os resultados mostraram baixos valores de vazão (80% dos poços com vazões menores de  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  e média de  $7,2 \text{ m}^3/\text{h}$ ) onde o SAG é livre, e valores bem dispersos onde ele é confinado, porém com um valor médio das vazões aproximadamente duas vezes maior que o do SAG livre.



Figura 3. Carta de foto-lineamentos da Formação Arapey/Serra Geral na Bacia do Quaraí, com diagrama de direções (CIC, 2015a)

Bazterrica (2002) fez um estudo integrado sobre o SAG no Uruguai, envolvendo métodos geofísicos, isotopia, hidroquímica, piezometria e outros parâmetros para auxiliar no conhecimento do aquífero. Para a *Cuenca Norte*, região onde está inserida parte da área de estudo desse trabalho, é estimada a partir de dados gravimétricos e sondagens magnetotelúricos uma espessura variante de centenas de metros da camada de basalto, porém também se assume que há conectividade lateral entre as rochas sedimentares subjacentes ao basalto. É apresentado um mapa potenciométrico indicando sentido de fluxo preferencial para o Rio Uruguai, e área de recarga principal à leste.

### 3.2.4. Balanço Hídrico

As características do SAG no norte do Uruguai foram tema da dissertação de mestrado de Gomez (2007), na qual foram abordadas análises hidrogeológicas, estimativas de recarga e modelos hidrológicos conceituais e numéricos. Foi discutido se existia fluxo vertical descendente entre o basalto e as rochas sedimentares, concluindo-se que os basaltos poderiam servir como fonte de recarga para o aquífero Guarani. Valores de condutividade hidráulica ( $K$ ) foram calculados para três

horizontes: rochas basálticas, arenitos rasos e arenitos profundos; os resultados indicaram valores de mesma ordem de grandeza, variando de 1 a 10 m/dia.

Gomez (2007) também propôs, em seus modelos, que existe recarga do SAG através dos basaltos e que a maior parte do fluxo ocorreria em um horizonte mais raso das rochas sedimentares, que também receberiam recarga direta da chuva em suas áreas aflorantes. A descarga desse horizonte ocorreria, em sua maioria, nas águas superficiais, porém haveria, também, um fluxo descendente para um segundo nível do SAG, mais profundo, atravessando um setor pouco permeável. Esse aquitarde não é descrito em trabalhos realizados no lado brasileiro da bacia.

Collischonn *et al.* (2011) publicaram um trabalho sobre modelagem hidrológica numérica da bacia do Rio Quaraí aplicando o modelo MGB-IPH, porém com pequenas adaptações na inclusão dos parâmetros, sendo elas: discretização da bacia em sub-bacias menores (definidas geomorfologicamente, integrando dados físicos e conceituais para simular o ciclo hidrológico) e individualização das lavouras e dos açudes. Esse modelo visou à transformação da chuva em vazão, utilizando-se de dados físicos e conceitos teóricos. Neste estudo foi levada em consideração a grande quantidade de pequenos reservatórios utilizados na irrigação das lavouras de arroz e foram realizadas simulações de diversos cenários, variando a demanda d'água e quantidade de açudes. A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que as adaptações de subdivisões da bacia apresentaram vantagens no processamento dos dados permitindo uma análise detalhada, e também observou-se que a demanda de água da bacia era superior à sua disponibilidade.

Em sua tese de mestrado, Kayser (2014) discutiu métodos para realizar balanço hídrico em bacias com uso intenso de reservatórios de pequeno porte, estudando o caso da Bacia do Rio Quaraí. Na tese, foi aplicado o modelo MGB-IPH para grandes bacias, utilizado por Collischonn *et al.* (2011), também realizando subdivisões na bacia. Os parâmetros fixos necessários foram obtidos através de Modelos Digitais de Terreno, séries históricas pluviométricas regionais, e estimativas de evapotranspiração para o tipo de vegetação local. Os resultados indicaram que não há água suficiente na bacia para o atendimento das demandas, sendo que em anos mais críticos pode haver o esgotamento do curso principal do Quaraí.

### 3.2.5. Qualidade e idade das águas subterrâneas

Bazterrjca (2002) dissertou, também, sobre a temperatura e idade das águas. Foi obtida uma forte correlação entre espessura de basalto sobre os arenitos e

aumento da temperatura da água, com alguns poços registrando valores de até 49°C sob basaltos de até 1.100 m de espessura. Os resultados isotópicos de tritio e  $^{14}\text{C}$  indicaram águas com idades de dezenas de anos na região de Santana do Livramento-Rivera e idades relativamente muito mais antigas, entre 10 e 25 mil anos, para a região de Quaraí e Artigas.

Valério (2004) realizou análises químicas das águas subterrâneas do SAG na região de Santana do Livramento-Rivera. As águas apresentaram pH entre 5,5 e 6,8 e classificadas como bicarbonatadas cárnicas a bicarbonatadas magnesianas, apresentando e, em alguns locais, com foram encontradas concentrações de nitrato (45 mg/L).

Um dos maiores projetos realizados na bacia foi executado a partir de uma parceria internacional entre a *Universidad de la Republica* (UDELAR, Uruguai) e a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, Rio Grande do Sul). O estudo, publicado pelo Fondo de Universidades (2006), teve como tema a “Caracterização de áreas de recarga e descarga do SAG em Rivera-Santana do Livramento e Quaraí – Artigas - Um estudo da vulnerabilidade na área de influência de Quaraí – Artigas” e faz parte do Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani. O estudo contemplou diversas técnicas de investigação, como sondagens, estudos geofísicos, isótopos naturais e tritio, elementos traçadores e amostragem de qualidade d’água.

Ao final, as análises químicas realizadas por esse estudo indicaram uma composição de águas predominantemente bicarbonatadas cárnicas e magnesianas. Na região de Santana do Livramento e Rivera há maior proporção de rochas sedimentares (Formação Botucatu) aflorantes, representando grande área de recarga, enquanto que na região de Quaraí e Artigas o predomínio se faz de rochas vulcânicas (Formação Serra Geral). Os resultados isotópicos indicaram que as amostras analisadas correspondem a águas recentes, de fluxo regional e em alguns casos com influência de urbanização. Foi constatado, a partir do uso de traçadores, que há fluxo de componente vertical descendente entre estratos e que as regiões de alta vulnerabilidade do aquífero estão principalmente próximas aos centros urbanos.

Silvério da Silva *et al.* (2008) realizaram análises das águas da bacia do Rio Quaraí e um estudo da vulnerabilidade do aquífero aplicando o método GOD, além de interpretarem quais as principais direções de fluxo subterrâneo. Classificaram as águas, majoritariamente, como bicarbonatadas cárnicas e magnesianas, concluíram que a área é vulnerável à contaminação por agentes poluidores na superfície do

terreno e que há uma contribuição do fluxo de água do SAG para a perenização do Rio Quaraí.

Foram realizados estudos na Bacia do Rio Ibicuí, localizada adjacente a Bacia do Rio Quaraí, comparando dois métodos de estimativa de recarga, WTF (*water table fluctuation* – variação do nível d'água) e Separação de Escoamento do Nível de Base. O primeiro analisa a variação piezométrica, em um poço definido, com as variações pluviométricas, enquanto que o segundo utiliza de séries históricas fluviométricas para comparar com séries históricas pluviométricas no mesmo período. Matiuzzi *et al.* (2015) realizaram estes métodos dividindo a bacia em sub-bacias menores. A sub-bacia de Passo da Cachoeira, que apresenta características geológicas similares com a região da “janela” de arenitos da Bacia do Quaraí, apresentou valores de recarga, nos métodos WTF e Separação de Escoamento do Nível de Base, de 15,5 e 21% respectivamente.

## **4.0. METODOLOGIA**

### **4.1. Caracterização Física da Área**

A partir de imagens de modelos digitais de terreno, obtidas através do site do Serviço Geológico Norte Americano (USGS), foi realizado um processamento digital para definir os limites da Bacia Hidrográfica do Rio Quaraí. Os limites foram definidos através da ferramenta *watershed* no QGIS (QGIS Development Team, 2002 – Versão 3.0.0), que delimita a área na qual o escoamento superficial tem como destino um ponto, no caso o encontro do Rio Quaraí com o Rio Uruguai.

Durante a elaboração deste trabalho foi proposto fazer um mapa de uso de solo para a bacia. As informações disponíveis encontradas para o lado uruguai apresentam escala de detalhe muito mais elevada que as informações encontradas para o lado brasileiro. Portanto, optou-se pela não realização do mapa, visto que não há dados suficientes para a realização ou tempo e recursos para o levantamento de dados necessários para a confecção do mapa.

### **4.2. Elaboração de Base de Dados**

Para a realização deste trabalho fez-se necessário a aquisição dos seguintes dados para a elaboração do modelo conceitual:

- Perfis construtivos e litológicos de poços tubulares de coleta de água
- Perfis litológicos de sondagens de exploração
- Ensaios áudio e magnetotelúricos

- Séries históricas de estações pluviométricas
- Ensaios de bombeamento
- Imagens de satélite
- Fotografias aéreas

Os dados referentes aos poços tubulares foram adquiridos de bases de dados de poços cadastrados pelo Serviço Geológico Brasileiro (CPRM), *Obras Sanitarias del Estado* (OSE – Uruguai), *Proyecto de Producción Responsable* (PPR – Uruguai), *Dirección Nacional de Aguas* (DINAGUA – Uruguai) e *Dirección Nacional de Minería y Geología* (DINAMIGE – Uruguai). Inicialmente foram selecionados todos os poços que estivessem inseridos na bacia ou em até 10 km de distância dos limites dela. Muitos deles apresentavam inconsistência e falta de informações relevantes: perfil litológico, profundidade, nível estático e/ou vazão específica. Os poços que não possuam perfil litológico foram descartados e não foram levados em conta neste trabalho, pois é de suma importância poder diferenciar de qual formação está sendo realizada a entrada de água no poço. Por se utilizar mais de uma fonte para aquisição dos dados, foi necessário padronizar as informações, definir um sistema de coordenadas e unificar as descrições litológicas, definidas como: Sedimentos Quaternários, Formação Serra Geral e Formação Botucatu. A partir do modelo digital de terreno foi possível atribuir um valor de cota estimado para cada poço.

Dados de sondagens profundas, realizadas pela *Administración Nacional de Combustibles, Alcoholes y Petróleo* (ANCAP – Uruguai), Agência Nacional de Petróleo (ANP) e outras empresas particulares, foram coletados a partir de dissertações de mestrados e teses de doutorados no Rio Grande do Sul, Uruguai e Argentina (Carrión, 2017; Milani, 1997; Mársico, 2013; Ucha, N. e Santa Ana, H., 1990). Estas informações não estão necessariamente dentro da bacia, alguns pontos estão localizados a uma distância de até 100 km dos limites da área. Estes poços foram de grande utilidade para este trabalho, pois possuem informações e descrições litológicas da superfície até o embasamento cristalino da Bacia do Paraná.

Ensaios audiomagnetotelúricos e magnetotelúricos interpretados foram adquiridos da CPRM para somar aos dados de espessura do SASG e profundidade do embasamento cristalino. Estes dados não permitem identificar a espessura do SAG, pois este método geofísico não é indicado para diferenciar diferentes formações sedimentares.

Todas as informações pontuais foram georreferenciadas no sistema UTM e tiveram um valor de cota atribuído a elas a partir do Modelo Digital de Terreno (MDT), assim, todas as informações foram padronizadas e prontas para futuro processamento.

Séries históricas de estações pluviométricas de dentro da Bacia do Rio Quaraí foram adquiridas através da CPRM e do Instituto Uruguayo de Metereologia (INUMET), algumas datando desde 1940. As informações foram padronizadas e georreferenciadas.

Ensaios de bombeamento do momento de construção de alguns poços foram adquiridos através da CPRM. Os ensaios foram tabelados e interpretados utilizando o software Aquifer Test (Waterloo Hydrogeologic, 2014 – Versão 4.0) para estimativa de parâmetros hidráulicos do meio.

Foram adquiridas imagens de satélite em diversas bandas espectrais e de coloração real através do website da USGS. Estas imagens foram agrupadas em mosaicos e separadas para um pós processamento durante fotointerpretações.

As fotografias aéreas foram selecionadas para a região de “janela” dos arenitos Botucatu e foram adquiridas junto ao Serviço Geográfico Militar Uruguaio. Elas foram georreferenciadas e utilizadas posteriormente durante fotointerpretações.

#### **4.3. Viagem de Campo**

Uma viagem de campo de 3 dias foi realizada a fim de verificar alguns afloramentos, com ênfase na região próxima onde a Formação Botucatu aflora, para obter maior precisão na confecção do modelo geológico. Este trabalho de campo serviu, também, para um reconhecimento geral da área de estudo e uma familiarização com as distintas feições geomorfológicas e as texturas e estruturas das rochas aflorantes. Durante a viagem foi realizado um mapeamento da “janela” de arenito do lado uruguaio em detalhe, traçando perfis em estradas locais e verificando a coerência de dados litológicos de alguns poços cadastrados e de mapas geológicos da região.

#### 4.4. Definição do Arcabouço Geológico

Para a definição do arcabouço geológico foram realizadas as seguintes etapas:

- Extração de fotolineamentos
- Interpretação de seções geológicas
- Confecção de mapa com isoespessuras do SASG
- Confecção de mapa com isoespessuras do SAG
- Confecção de um mapa geológico

A extração de fotolineamentos foi realizada no QGIS com base no modelo digital de terreno, imagens de satélite e fotografias aéreas, mantendo uma escala fixa (1:750.000) que se adeque à escala de trabalho. Para facilitar a interpretação, foi realizado um processamento de iluminação artificial (*hillshade*) no MDT nas direções 0°, 45°, 90° e 135° acentuando vales, morros e grandes estruturas lineares. As imagens de satélite e fotografias aéreas foram utilizadas sem processamento digital.

As localizações das seções geológicas foram definidas de forma a apresentar, com maior representatividade, a geologia da área em uma escala regional e outra de maior detalhe superficial. Foram definidos três perfis regionais profundos com informações até o embasamento da bacia e três outros perfis mais superficiais, para uma melhor interpretação da variação de espessura das rochas basálticas.

Para a interpretação dos perfis foram utilizadas informações de sondagens profundas exploratórias, poços tubulares profundos, ensaios áudio e magnetotelúricos e informações de sondagens apresentadas nos trabalhos de Mársico (2013) e Carrión (2017). Os perfis foram traçados à mão e posteriormente digitalizados no *software* Adobe Illustrator (Adobe Systems, 1995 – Versão CS5).

O mapa de isoespessuras do SASG foi realizado a partir dos dados de poços profundos, poços tubulares e sondagens áudio e magnetotelúricas. Os dados foram interpolados pelo método de krigagem, no *software* Surfer (Golden Software, 2013 – Versão 9.0), e posteriormente tratados para corrigir pequenas anomalias e eventuais inconsistências com dados diretos.

De forma similar foi realizado o mapa de isoespessuras do SAG, porém, para este mapa só foi possível utilizar os dados de poços profundos, pois são os únicos que possuem informações e profundidade suficientes para delimitar a base do SAG. As informações foram, também, interpoladas pelo método de krigagem no *software* Surfer.

Para a confecção do mapa geológico foram utilizados informações de poços tubulares e profundos, sondagens áudio e magnetotelúricas, fotografias aéreas, imagens de satélite, dados obtidos em campo e mapas geológicos da região (Projeto Marco, 2005; Gagliardi, 2008; Machado, 2005). As imagens de satélite foram processadas e analisadas em diferentes bandas, procurando encontrar contraste entre as regiões de afloramento de arenitos e basaltos. As fotografias aéreas serviram de base para delimitar os limites dos afloramentos de arenitos, através de fotointerpretações, que posteriormente foram checados em viagem de campo. Os perfis litológicos dos poços foram essenciais para a diferenciação de rochas sedimentares da Formação Botucatu intrabasálticas da Formação Serra Geral.

#### **4.5. Confecção do Modelo Hidrogeológico Conceitual**

Para a elaboração do modelo hidrogeológico conceitual foram realizadas as seguintes etapas:

- Confecção e interpretação de mapa potenciométrico do SAG
- Confecção de mapa pluviométrico
- Confecção de mapas de densidade de poços e vazões extraídas
- Interpretação de ensaios de bombeamento
- Confecção de mapa hidrogeológico

Para a confecção do mapa potenciométrico só foram levados em consideração os poços cujas seções filtrantes penetram exclusivamente os arenitos da Formação Botucatu. Excluiu-se as informações dos basaltos, pois por se tratar de um aquífero fraturado, pode não haver conexão lateral de suas águas por toda a bacia, apresentando valores muito dispersos e de difícil análise correlativa.

É necessário fazer três ressalvas nesta etapa: a primeira é a diferença de profundidade dos poços, coletando água de diversos horizontes dentro do SAG que pode apresentar variações da carga hidráulica; a segunda é a possibilidade de haver contaminação do dado, pela de entrada de água do SASG no poço quando este está sobre os arenitos da Formação Botucatu, alterando o valor do nível estático; o terceiro ponto a destacar é a variação temporal dos dados, pois as informações de nível estático, utilizadas para calcular a carga hidráulica, são referentes à data de construção de cada poço, podendo haver valores de diferentes décadas lado a lado.

Os valores de carga hidráulica foram calculados a partir da subtração do valor de nível estático da cota do ponto. Utilizaram-se informações dos perfis litológicos e construtivos dos poços, onde constam valores de nível estático e de cotas atribuídas através do MDT. Para a interpolação destes valores foi escolhido o método de Mínima Curvatura (*Spline*), no software Surfer, por este aparentar ser o mais indicado suavizando as linhas e melhor representando as linhas equipotenciais (Gallas, 2000).

Para o mapa de pluviometria foi utilizado dados de séries históricas (mm de chuva por dia) de estações pluviométricas localizadas dentro da área da bacia. Como algumas estações funcionam intermitentemente e/ou já estão desativadas, foi selecionado o período contínuo, mais recente, com maior quantidade de dados em todas estações. As quantidades de chuva por dia, em cada estação, foram transformadas em médias anuais para um determinado período de tempo. A superfície interpolada destes resultados foi realizada pelo método de krigagem no software Surfer.

Para definir as densidades de poços utilizados no estudo na área, definiu-se uma grade com quadrículas de 5 x 5 km ( $25 \text{ km}^2$ ) para contagem da quantidade de poços. Estes poços retratam somente os poços cadastrados que apresentam perfil litológico. Posteriormente, somaram-se os valores de vazões extraídos destes poços para definir os volumes extraídos por quadrícula ( $\text{m}^3/\text{h}/25 \text{ km}^2$ ). Ressalta-se que os valores de vazão utilizados são referentes à data de instalação dos poços, podendo ter variado com o tempo, e que nem todos os poços apresentam valores de vazão.

Para a interpretação dos ensaios de bombeamento foi necessário, primeiramente, separar os poços que extraem águas dos arenitos daqueles que as retiram dos basaltos. Posteriormente, tabelaram-se os dados construtivos dos poços e os valores do ensaio, que foram inseridos no software Aquifer Test. Para a interpretação dos ensaios foram utilizados as equações de Theis, nos aquíferos porosos, e de Barker, aquíferos fraturados. Os dados de variação do N.A. durante o bombeamento e recuperação também foram inseridos em gráficos para efeito de comparação dos dados entre os tipos de formação rochosa fontes da água.

A realização do mapa hidrogeológico tomou como base informações de isoespessuras dos SASG e SAG, interpretações dos ensaios de bombeamento, mapa potenciométrico, mapa geológico, poços cadastrados e as seções geológicas que serão apresentadas neste projeto. Utilizaram-se, também, informações do Mapa Hidrogeológico da Bacia do Quaraí (Projeto Marco, 2015), escala 1:250.000, quando

se teve ausência de informações. Foram associados todos os dados mencionados de forma a sintetizar as informações hidrogeológicas pertinentes a este trabalho.

## 5.0. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Caracterização Física da Bacia

#### 5.1.1. *Modelo Digital de Terreno (Hipsometria) e Definição da Área da Bacia*

O mapa hipsométrico indica a variação da topografia em relação ao nível do mar (Figura 4). A partir dessa área construiu-se a base de dados e os demais resultados do projeto.

Observando o mapa nota-se um declive com sentido para W, em direção ao Rio Uruguai. As altitudes variam entre 378 m, em seu ponto máximo a SE, e 35 m, próximo das cidades de Barra do Quaraí (BR) e Bella Union (UR).

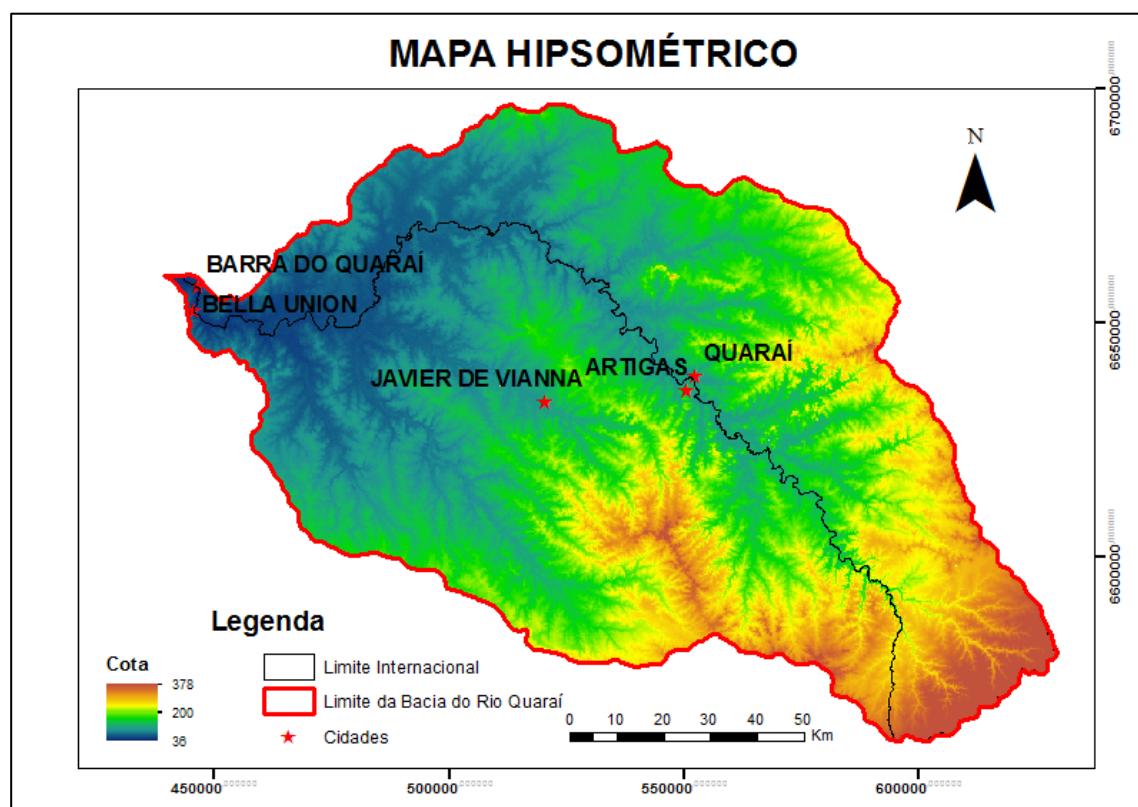


Figura 4. Mapa hipsométrico da Bacia do Rio Quaraí.

O mapa mostra que as áreas mais elevadas (marrom) estão onde se encontra a nascente do Rio Quaraí, que por gravidade segue drenando até as regiões mais baixas (azul), até que encontra o exutório da bacia.

Uma análise prévia sobre a declividade da região pode ser feita a partir deste mapa, observando que a região W da bacia varia em tons de azul, indicando uma região plana e de baixa altitude. Em contra partida, a região próxima das cidades de Quaraí (BR) e Artigas (UR) apresenta uma variação de marrom à azul, indicando grande variação topográfica em uma área relativamente pequena.

## 5.2. Arcabouço Geológico

Para a definição do arcabouço geológico da bacia, foram utilizadas informações obtidas em viagem de campo, tanto quanto informações bibliográficas e dados adquiridos como sondagens e perfis litológicos de poços tubulares.

Em campo, notou-se que há variações geomorfológicas. Observou-se que a região da “janela” de arenito contém feições de morros e coxilhas, com grandes declividades e drenagens sinuosas e profundas, enquanto as regiões de afloramentos de basalto mais distantes da “janela” são extensos planaltos com drenagens mais retilíneas e mais rasas (Figura 5).

Foram encontrados em campo três principais litotipos, arenitos e basaltos, pertencentes às formações Botucatu e Serra Geral, respectivamente, e sedimentos fluviais mais recentes.

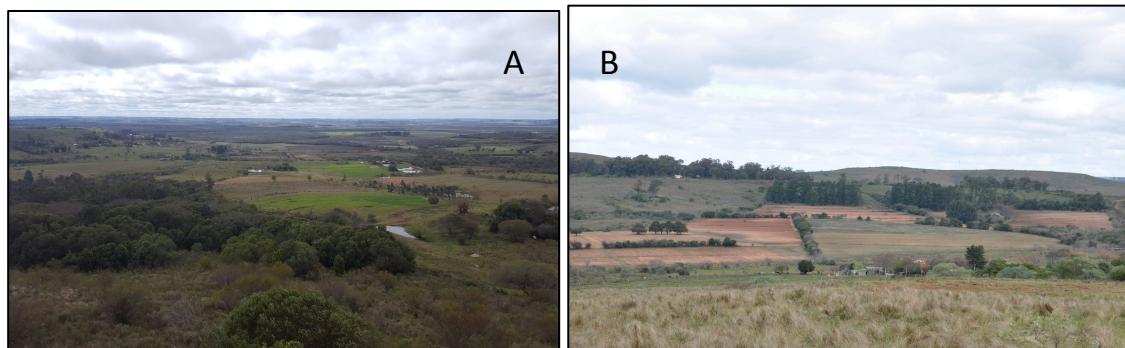


Figura 5. A foto A exemplifica os extensos planaltos da região e a B representa a região de afloramentos de arenitos, com relevo mais ondulado; nota-se, também, o solo avermelhado, indicativo dos arenitos da Formação Botucatu.

O arenito é composto majoritariamente por grãos de quartzo, bem a muito bem selecionados, arredondados e sub-esféricos, de granulometria areia fina a média. A rocha apresenta estratificações tabulares planas e cruzadas de médio e grande porte (Figura 6). As vezes silicificada, tem cor branca a alaranjada e às vezes apresenta

surgência de água. Aparece em afloramentos de chão de estrada, paredes no relevo e morros testemunhos, em geral, próximo à cidade de Artigas - Quaraí.

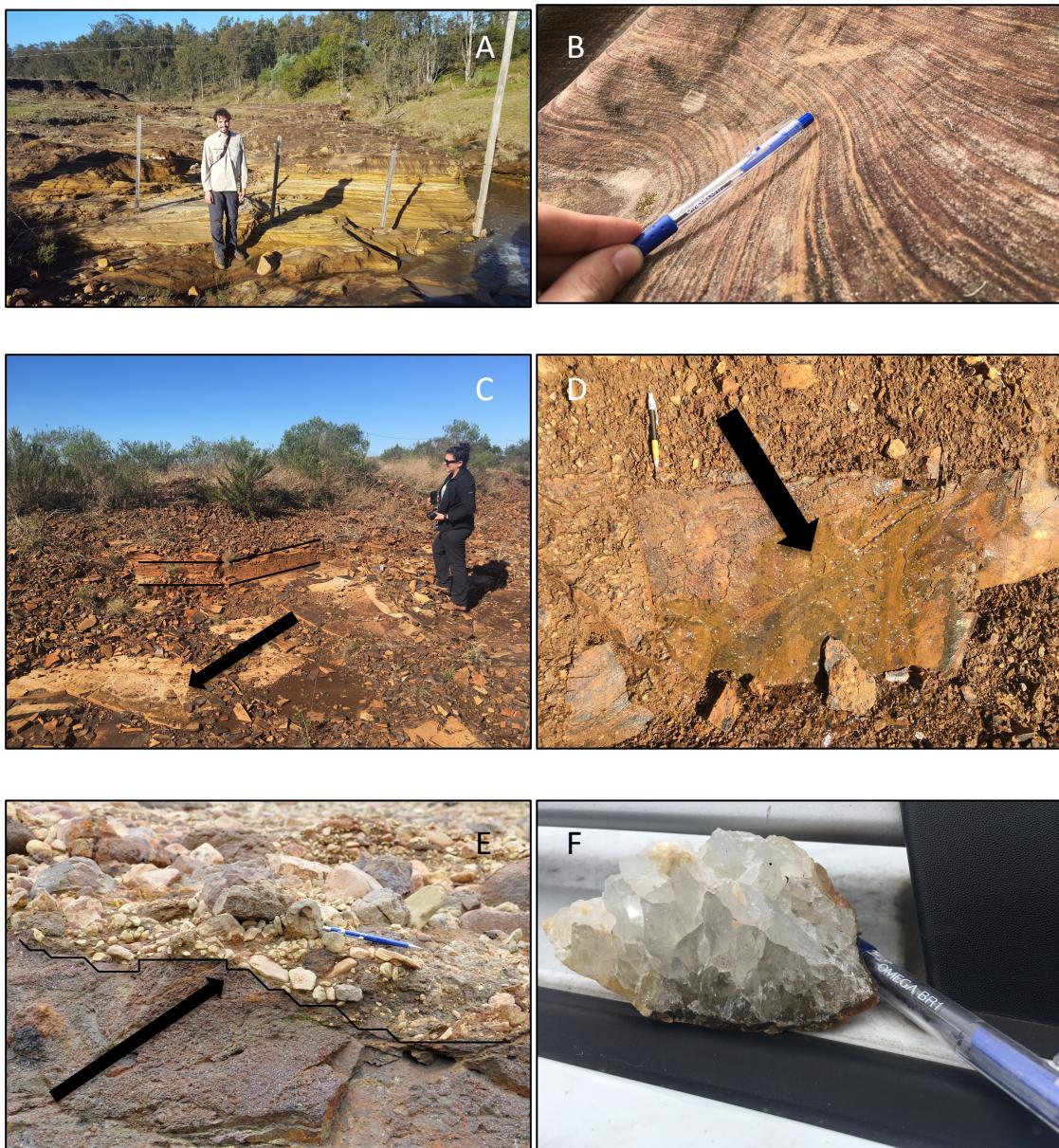


Figura 6. (A) Afloramento da Formação Botucatu; (B) Estratificações plano-paralelas de arenitos da Formação Botucatu; (C) Afloramento de basaltos com estrutura tabular plano-paralela; (D) Surgência de água em fraturas em afloramento de basalto; (E) Contato entre sedimentos fluviais mal selecionados e basaltos da Formação Serra Geral; (F) Amostra de ágata encontrada próximo ao afloramento de sedimentos fluviais. Estruturas indicadas por setas e retas.

O basalto encontrado na área possui cor preta acinzentada, e marrom avermelhada quando intemperizado, textura afanítica, às vezes vesiculada e/ou com amigdalas preenchidas com ágata, com fraturas ou fissuras, localmente com estrutura tabular plano-paralela. Pode apresentar esfoliações. Aparece em afloramentos de chão de estrada, paredes no relevo, cavas de exploração e blocos no chão. Pode conter surgência de água em suas fraturas (Figura 6).

Os sedimentos fluviais encontrados estão, em sua maioria, inconsolidados, possuem mal selecionamento de grãos, variando de argila a cascalho e blocos, e contêm grãos de quartzo, feldspato, ágatas, e pedaços de basaltos, levemente arredondados variando de esféricos a angulosos. Os afloramentos estão concentrados nas margens dos córregos e rios (Figura 6).

Na viagem de campo não foi possível mapear toda a área da bacia, portanto foi decidido por priorizar a região da “janela” do SAG e seus entornos. Não foi visitada a porção oeste da bacia, onde, segundo a literatura, encontram-se os afloramentos de sedimentos quaternários. Decidiu-se assimilar as informações dos trabalhos do Projeto Marco para a Gestão Sustentável dos Recursos Hídricos da Bacia do Prata (2015) e suas descrições geológicas deste litotipo. Os depósitos sedimentares quaternários correspondem a sedimentos fluviais inconsolidados a semiconsolidados, mal selecionados, variando de argila a cascalho. Podem estar sobre os basaltos ou arenitos.

### *5.2.1. Fotolineamentos*

Os lineamentos extraídos do modelo digital de terreno estão representados na Figura 7. Estas estruturas podem representar falhas, fraturas, divisores de águas, drenagens, entre outras estruturas lineares expressivas geomorfologicamente.

Os maiores lineamentos encontrados na bacia são oriundos de drenagens, sendo o mais expressivo o Rio Quaraí, que tem aproximadamente 120 km de curso d’água retilíneo com direção N120. Não somente o Rio Quaraí, como outros afluentes, possuem direções semelhantes, e podem estar associados a falhas normais, que serão discutidas posteriormente.

Podem-se verificar, também, dois padrões de lineamentos (Figura 8), separados pelo Rio Quaraí. Abaixo dele, na região SW da bacia, os lineamentos são em sua maioria de direção similar à do rio (variando entre N110 e N130), com poucos outros lineamentos em outras direções. Já na porção NE da área de estudo as estruturas apresentam um comportamento diferente, as direções de lineamentos variam de N070 a N110.

## FOTOLINEAMENTOS

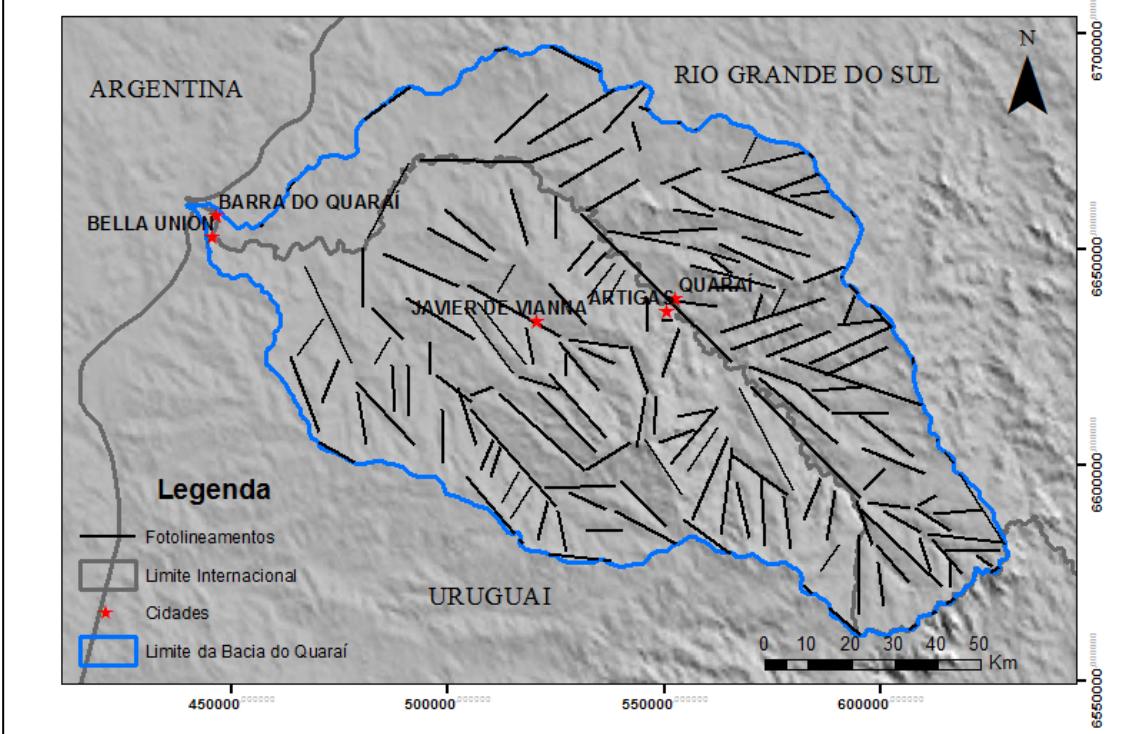


Figura 7. Mapa de fotolineamentos interpretados da Bacia do Rio Quarai

Como grande parte da superfície da região está associada a um aquífero fraturado, o estudo dos lineamentos é inerente para mapear possíveis locais de recarga do SASG. Parte destas estruturas é composta por falhas e fraturas, indicando regiões onde ocorre infiltração de água pluvial para recarga do aquífero fraturado.

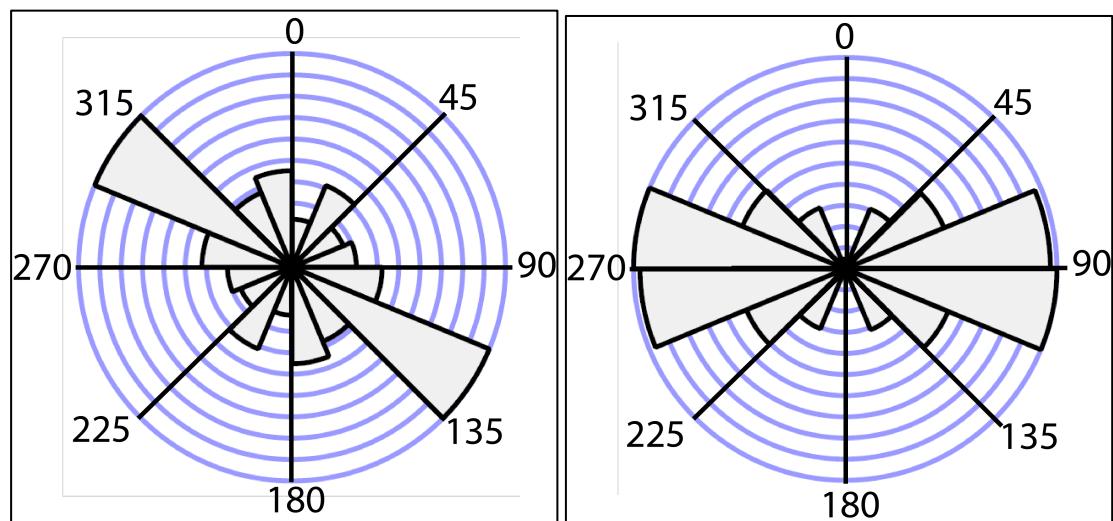


Figura 8. Diagramas de Rosa dos fotolineamentos interpretados na região SW (Esquerda) e NE (Direita) da Bacia do Rio Quarai

### 5.2.2. Seções Geológicas

As seções geológicas estão separadas em dois grupos: o primeiro, de caráter regional (A-A', B-B' e C-C'), com objetivo de definir a espessura do SAG e inferir um comportamento geral do embasamento da Bacia do Paraná, e outro, local (D-D', E-E' e F-F'), com maior detalhe na variação de espessura do basalto na área de estudo.

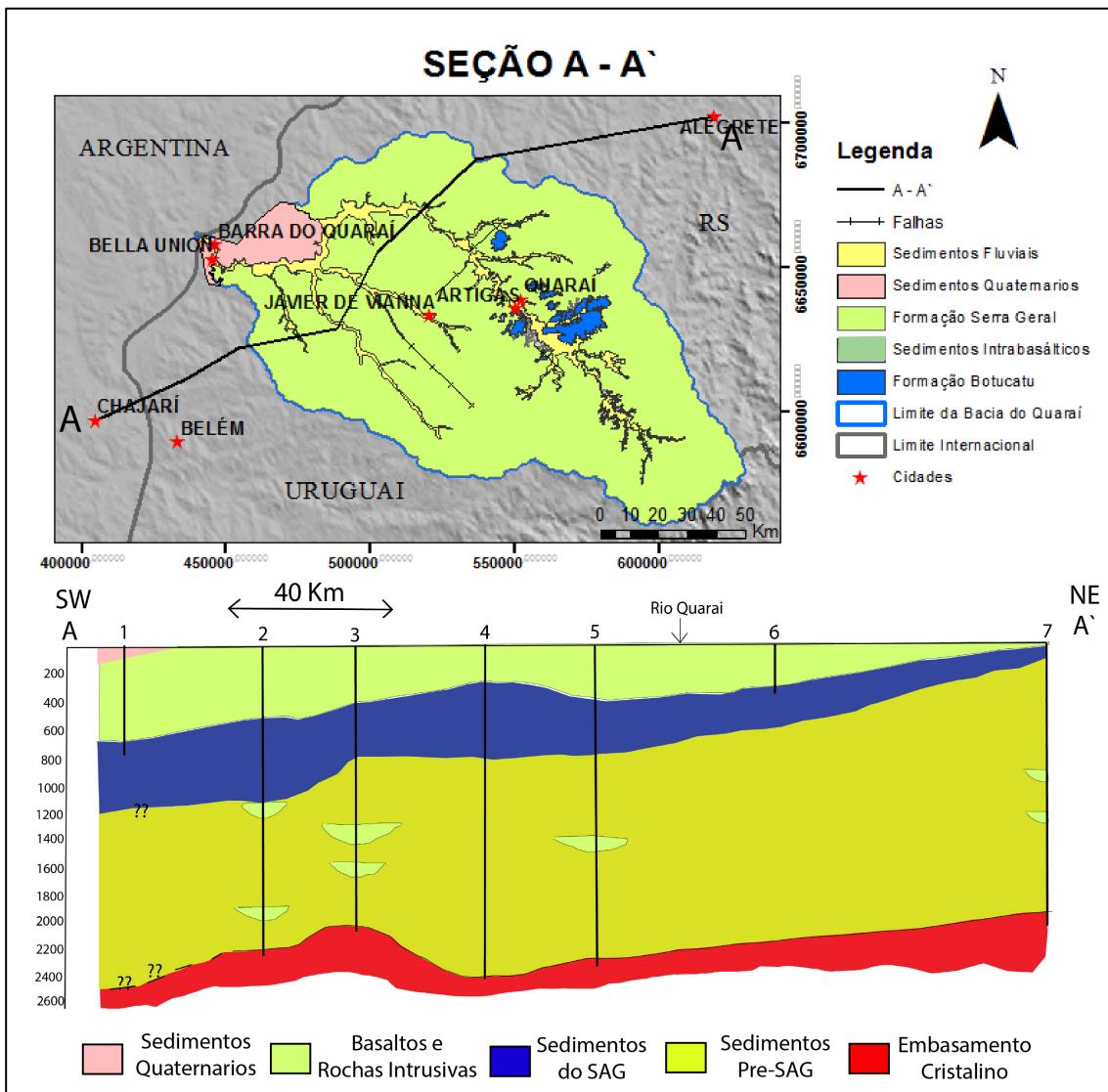


Figura 9. Seção transversal A – A'. Os dados utilizados neste perfil são 1- Chajarí (Carrión, 2017), 2- Gaspar (ANCAP), 3- Itacumbú (ANCAP), 4- MT UR – 4 (CPRM), 5- Yacaré (ANCAP), 6- 4300000140 (SIAGAS) e 7- Alegrete (ANP). Os pontos de interrogação indicam inferências na profundidade da camada.

Os sedimentos depositados antes da discordância do limite Permo-Triássico foram agrupados e definidos como rochas Pré-SAG, neles estão inclusos as Formações Buena Vista (UR), Palermo (UR), Rio Bonito (UR), San Gregório (UR) e os Grupos Rosário do Sul (BR), Passa Dois (BR), Guatá (BR) e Itararé (BR). As rochas

sedimentares do SAG correspondem ao agrupamento das Formações Botucatu (BR)/Tacuarembó (UR) e Guará (BR)/Rivera (UR).

As seções A–A` (Figura 9), B–B` (Figura 10) e C–C` (Figura 11) foram elaboradas a partir de informações de sondagens profundas localizadas dentro e fora da região de estudo, de sondagens áudio e magneto telúricas e de poços tubulares profundos instalados na região.

A partir das seções regionais é possível notar um espessamento geral da camada de basalto e dos sedimentos do SAG em direção à W. enquanto que em Alegrete, a NE da bacia, a Formação Serra Geral apresenta espessura menor que 30 m e o SAG possui aproximadamente 70 m de pacote (seção A–A`). O embasamento cristalino possui uma tendência de se aprofundar a W, em direção ao depocentro da Bacia do Paraná, como observado na seção C –C`.

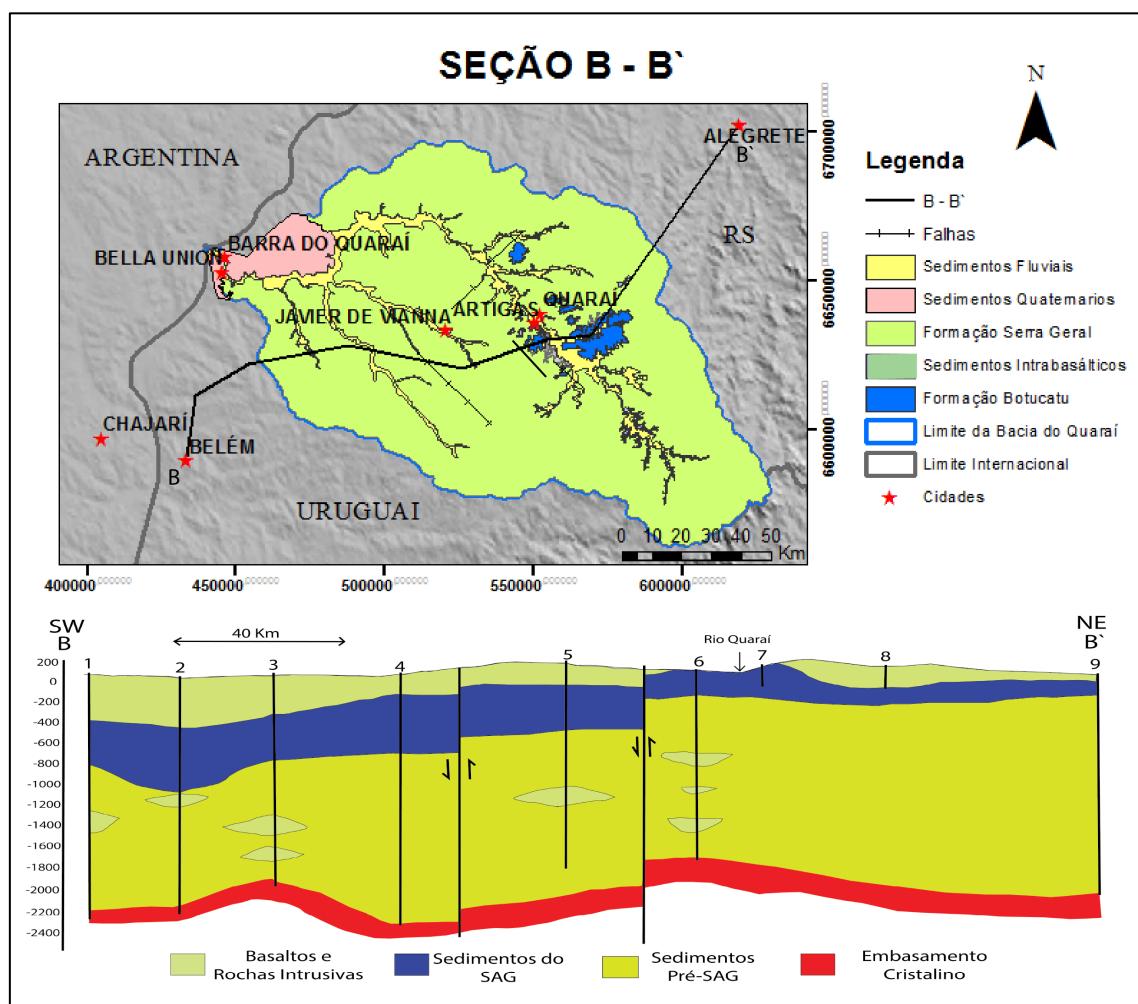


Figura 10. Seção transversal B – B`. Os dados utilizados neste perfil são 1- Belem (ANCAP), 2- Gaspar (ANCAP), 3- Itacumbú (ANCAP), 4- MT UR – 4 (CPRM), 5- Pelado (ANCAP) 6- Artigas (ANCAP), 7- 4300022214 (SIAGAS), 8- 139 (Machado, 2005) e 9- Alegrete (ANP).

Em geral, todas as camadas apresentam leve cimento para SW. Nota-se, também, grande quantidade de rochas intrusivas (gabros, diabásios e basaltos) nos Sedimentos Pré-SAG, na forma de diques e *sills*.

Próximo às cidades de Quaraí (BR) e Artigas (UR), definiram-se duas falhas normais de grande profundidade, que chegariam até o embasamento. Estas falhas apresentam direções N30W e N60E, similares às direções dos lineamentos previamente apresentados.

O levantamento destes blocos possivelmente foi responsável pelas “janelas” de sedimentos da Formação Botucatu. Os blocos mais elevados seriam erodidos mais facilmente, tendo parte da capa de basalto removida, e a partir de variações topográficas os sedimentos arenosos ficam aflorantes.

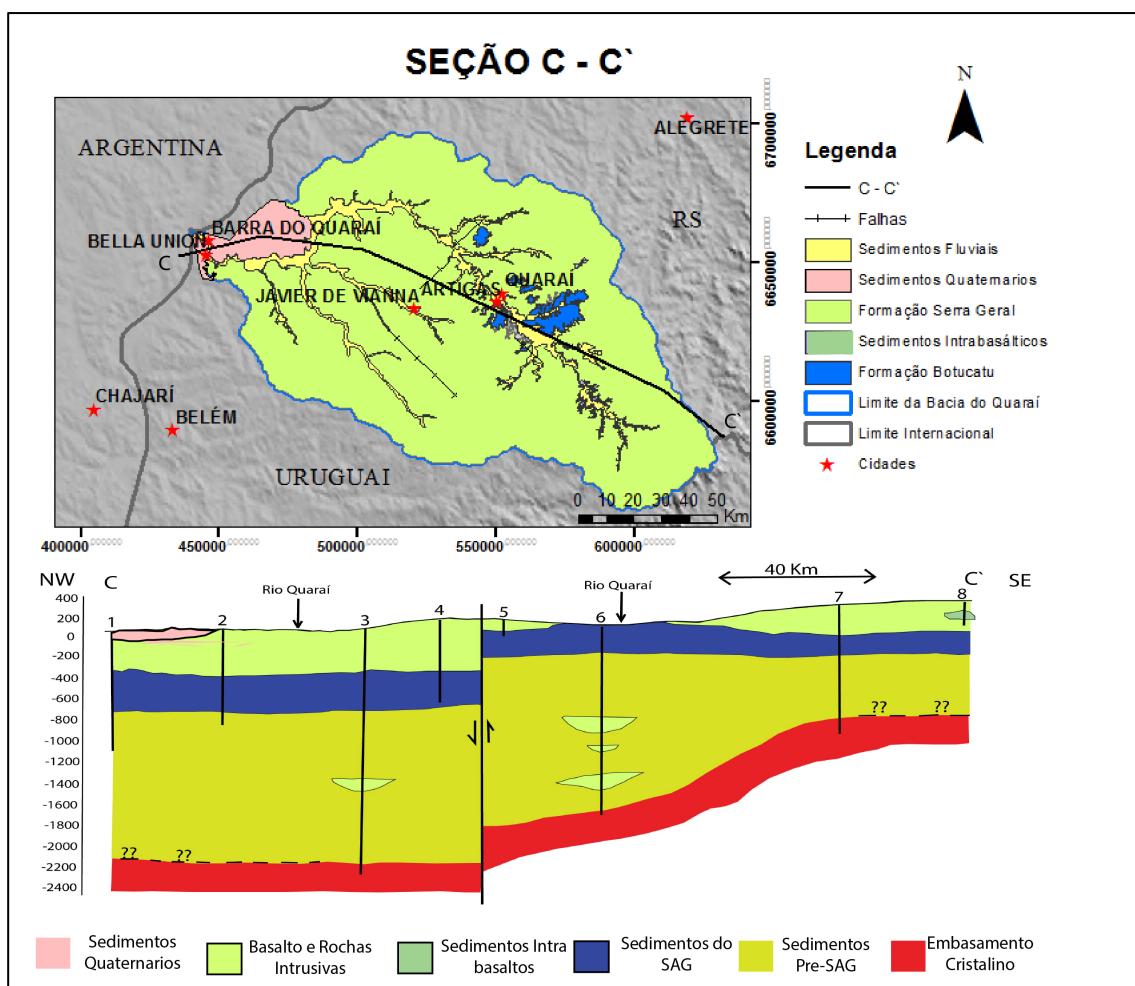


Figura 11. Seção transversal C – C'. Os dados utilizados neste perfil são 1- Monte Caseros (Mársico, 2013), 2- AMT BR – 1 (CPRM), 3- Yacare (ANCAP), 4- AMT UR – 3 (CPRM), 5- 165 (DINAMIGE), 6- Artigas (ANCAP), 7- MT BR – 5 (CPRM) e 8- 4300000305 (SIAGAS). Os pontos de interrogação indicam inferências na profundidade do embasamento.

As seções D–D` (Figura 12), E–E` (Figura 13) e F–F` (Figura 14) foram elaboradas visando um maior detalhe nas variações de espessura do basalto, fator importante para locação de um poço. Esses cortes foram escolhidos a fim de obter uma boa representatividade das variações de espessura do basalto na área e tentaram se limitar às fronteiras da Bacia do Rio Quaraí.

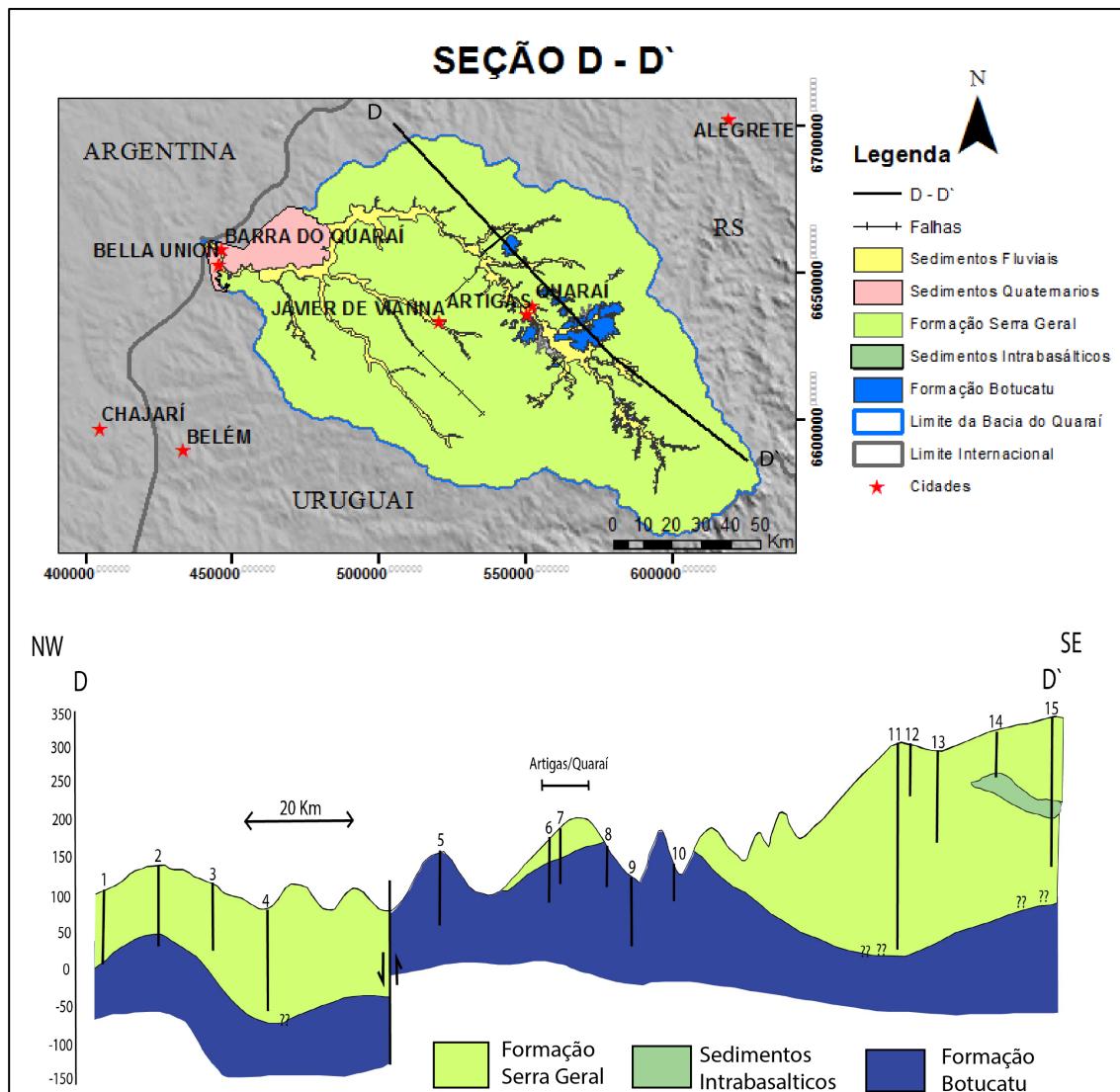


Figura 12. Seção transversal D – D`. Os dados utilizados neste perfil são 1- 4300010237 (SIAGAS), 2- 111 (Machado, 2005), 3- 430009923 (SIAGAS), 4- 43000916 (SIAGAS), 5- 4300020122 (SIAGAS), 6- 430009789 (SIAGAS), 7- 430009803 (SIAGAS), 8- 430009823 (SIAGAS), 9- 4300020533 (SIAGAS), 10- 430009827 (SIAGAS), 11- MT BR – 5 (CPRM), 12- 4300010594 (SIAGAS), 13- 4300002351 (SIAGAS), 14- 4300022346 (SIAGAS), 15- 4300000305 (SIAGAS). Os pontos de interrogação indicam inferências na profundidade da camada.

A seção D – D` mostra como o comportamento da topografia, associado aos falhamentos normais, influencia nas áreas aflorantes dos sedimentos da Formação Botucatu. A falha representada nesta seção possui, também, um eixo de direção similar aos lineamentos. Após o levantamento do bloco à E, as rochas sedimentares

afloram nos baixos topográficos, enquanto que nas porções mais altas prevalecem os basaltos.

Outro ponto importante apresentado nesta seção são as lentes de sedimentos intrabasálticos, que só podem ser confirmadas quando o furo as atravessam. Através das seções estas lentes se mostraram mais presentes na porção SE da área de estudo, porém em campo foram encontradas outras lentes próximas à cidade de Artigas (UR). Elas estão comumente localizadas próximas da base da Formação Serra Geral, porém foram encontradas algumas relativamente mais altas.

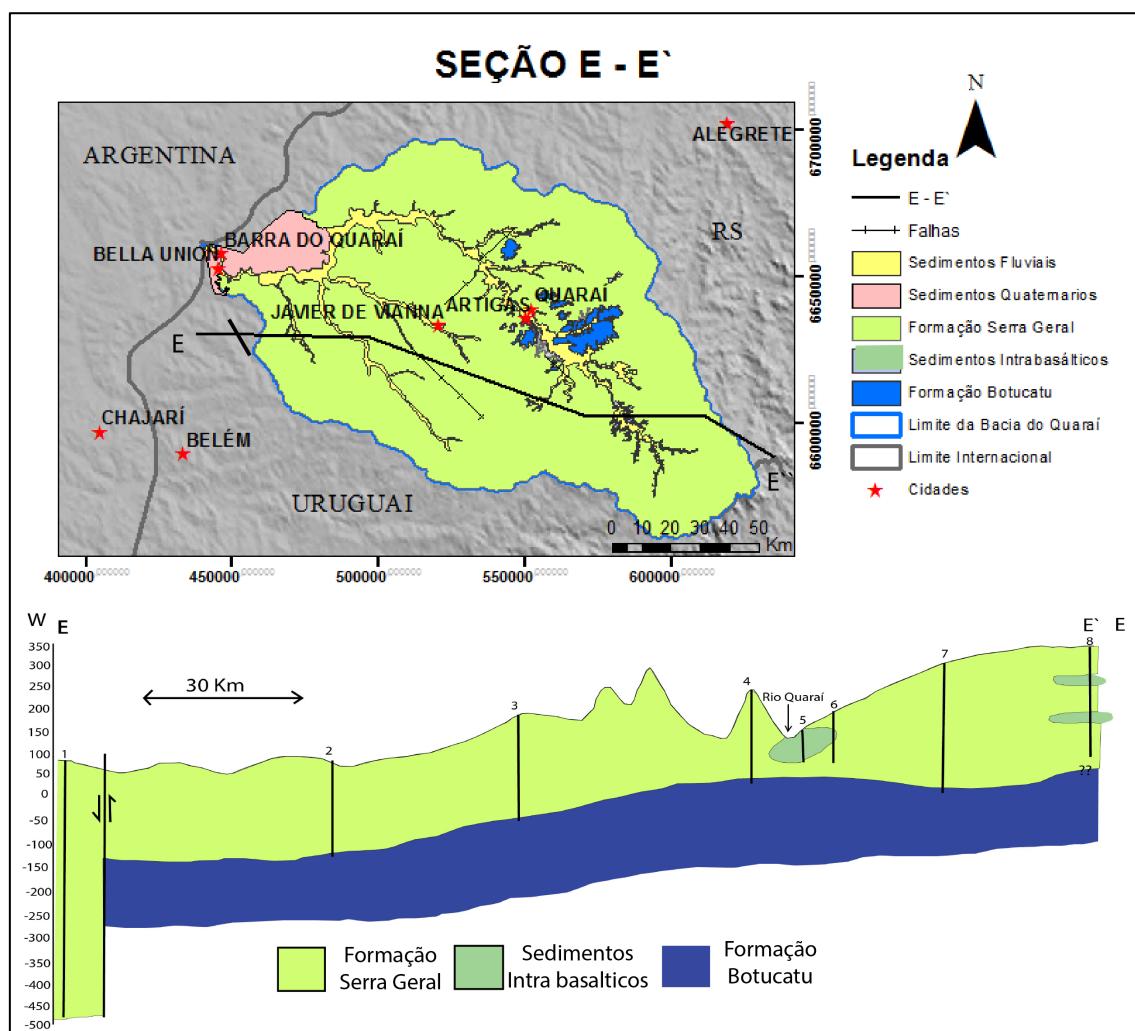


Figura 13. Seção transversal E – E'. Os dados utilizados neste perfil são 1- 307 (DINAMIGE), 2- MT UR – 4 (CPRM), 3- Pelado (ANCAP), 4- 221 (DINAMIGE), 5- 4300001157 (SIAGAS), 6- 4300009343 (SIAGAS), 7- MT BR – 5 (CPRM) e 8- 4300000305 (SIAGAS). Os pontos de interrogação indicam inferências na profundidade da camada.

A seção E – E' apresenta outras lentes de sedimentos intrabasálticos, também na porção SE da área. Nesta seção a espessura do basalto varia pouco e está mais

condicionada com as variações de relevo, à exceção da parte W que possui mais de 600 m de capa basáltica sobre os arenitos.

Os limites inferiores da Formação Botucatu não puderam ser definidos, pois não havia poços com profundidade e/ou detalhamento suficiente dos dados para a diferenciação desta unidade com as outras.

A seção F –F` mostra o comportamento das rochas na região da “janela”, onde ocorre o soerguimento de blocos através de falhamentos normais. A partir deste perfil é possível ver uma correlação das variações de espessura do basalto com as falhas. Apesar de ocorrer uma variação nestas espessuras na porção NE, a topografia ainda aparece como um fator importante no afloramento dos arenitos.

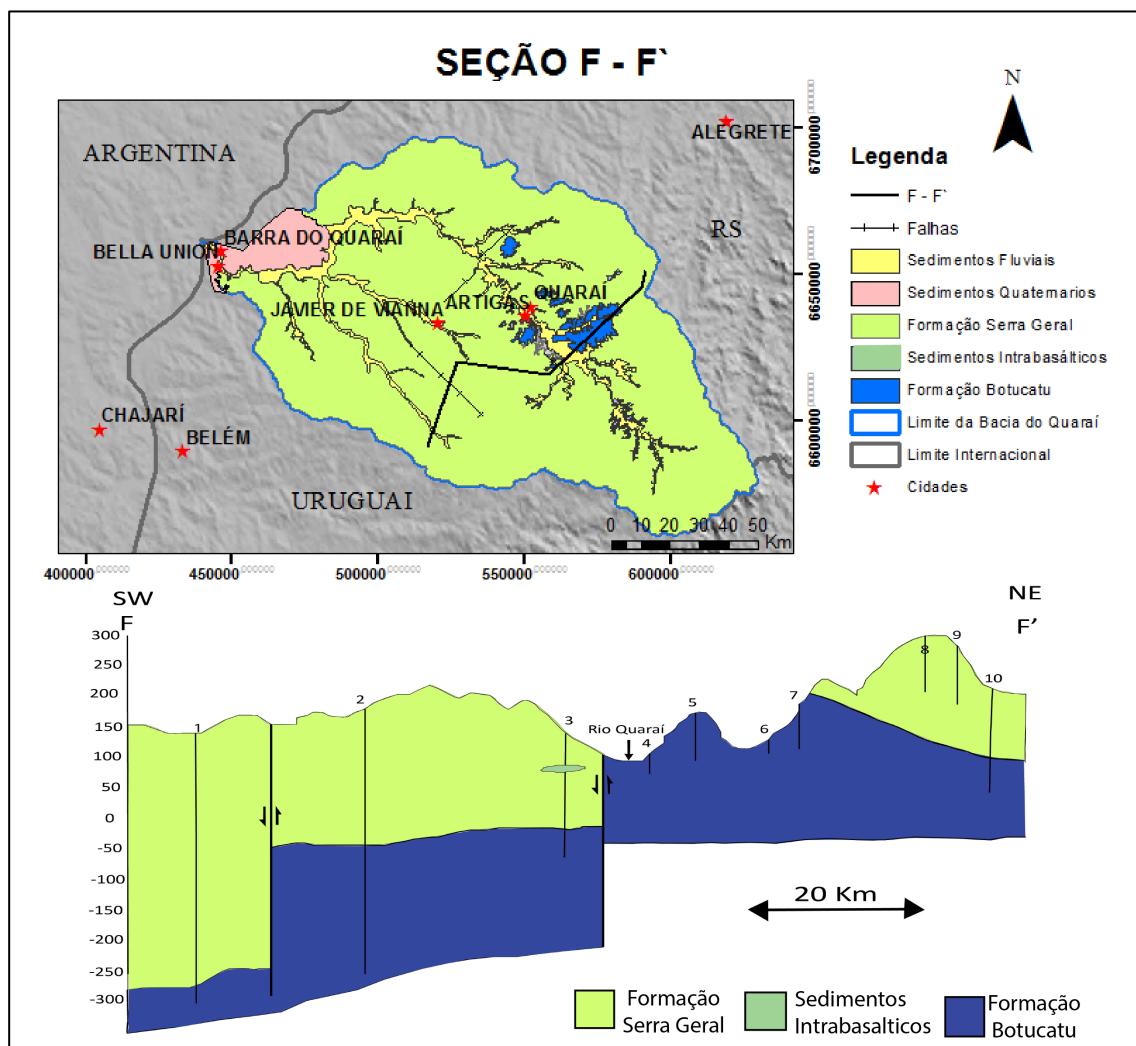


Figura 14. Seção transversal F –F`. Os dados utilizados neste perfil são 1- MT UR – 6 (CPRM), 2- Pelado (ANCAP), 3- 231 (DINAMIGE), 4- 4300009821 (SIAGAS), 5- 4300009826 (SIAGAS), 6- 4300022211 (SIAGAS), 7- 4300000887 (SIAGAS), 8- 4300009805 (SIAGAS), 9- 4300009806 (SIAGAS) e 10- 4300022208 (SIAGAS).

### 5.2.3. Isoespressuras do SASG/SAG

A interpretação da variação das espessuras dos basaltos da Formação Serra Geral e dos arenitos que compõem o SAG é apresentada em forma de mapas de isoespressuras ou isópacas. O mapa para os basaltos (Figura 15) indica um espessamento no sentido SW, onde está localizado o depocentro dos derrames basálticos. Esta informação está condizente com os trabalhos de Corbo *et al.* (2011) e Ramos *et al.* (2015). Na área da bacia, o basalto apresenta espessura máxima de 500 m (extremo Oeste), enquanto em alguns locais esse litotipo é ausente.

Na porção central da bacia, perto da região da “janela” de arenitos, há mudanças bruscas lineares nas espessuras do basalto. Essas mudanças apresentam direções similares aos fotolineamentos extraídos e foram interpretadas como associadas às falhas normais inferidas.

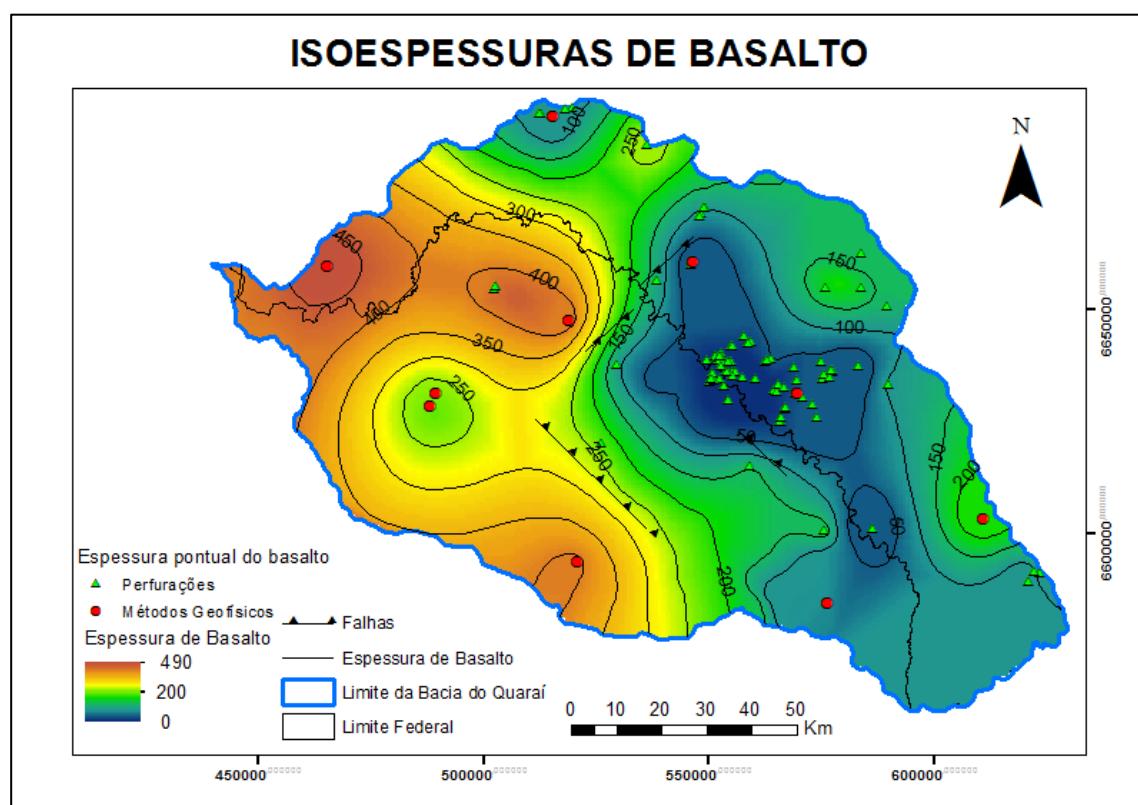


Figura 15. Mapa de isópacas para a Formação Serra Geral na Bacia do Rio Quarai.

Esse mapa pode vir a ser de suma importância no planejamento de instalação de novos poços de extração de água, pois ele indica a profundidade esperada necessária para a captação de águas do SAG, que geralmente possui vazões específicas maiores que do SASG. Além disso, é interessante definir as espessuras do basalto para futuros estudos de recarga pluviométrica do SAG, com a estimativa da infiltração dessas águas até os arenitos.

As variações de espessura do SAG (Figura 16) estão relacionadas com as espessuras das Formações Botucatu e Guará, representantes do SAG. Os pacotes espessam de NE para SW, variando de 150 a 500 m, respectivamente. A tendência de aumento da espessura do SAG está direcionada para o depocentro da Bacia do Paraná, e seu adelgaçamento vai em direção às bordas da bacia.

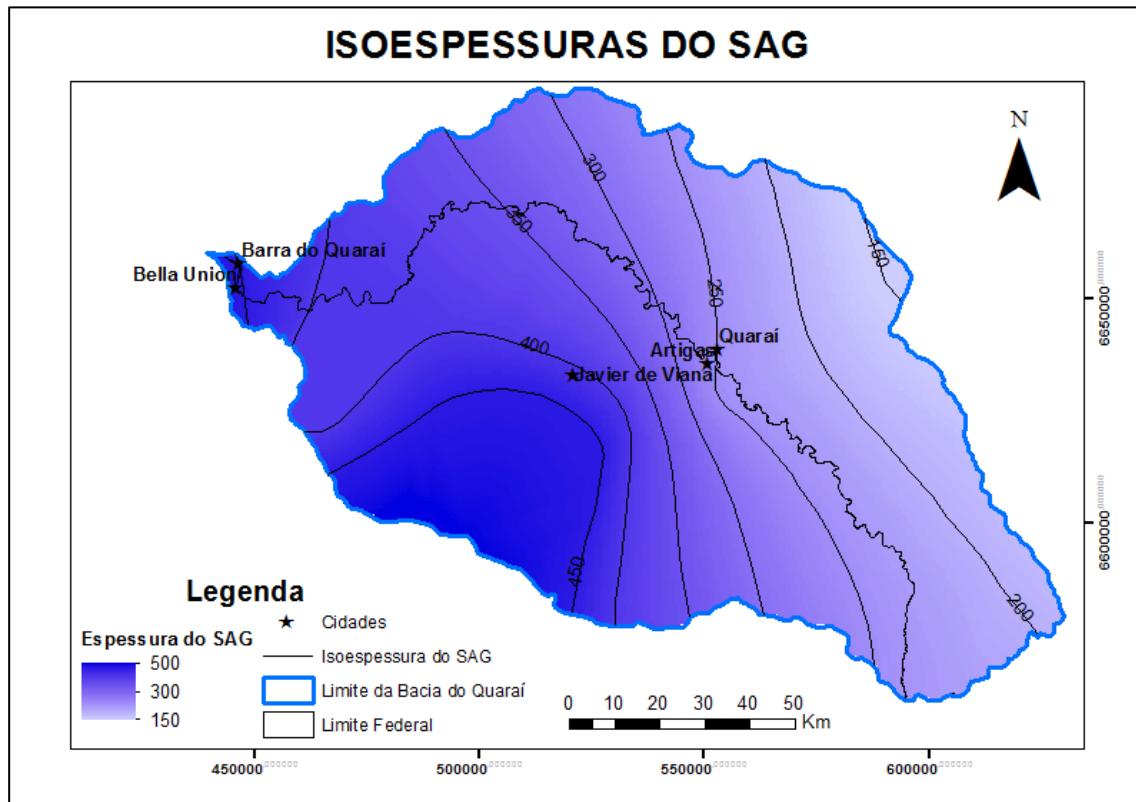


Figura 16. Mapa de isopacas do SAG na Bacia do Rio Quaraí.

#### 5.2.4. Mapa Geológico

O mapa geológico da Bacia do Quaraí (Anexo 1), realizado na escala 1:750.000, indica a região da “janela” de afloramento da Formação Botucatu, próximo às regiões urbanas de Quaraí (BR) e Artigas (UR). Neste mapa estão plotadas falhas normais interpretadas a partir de seções transversais, fotolineamentos, sondagens e mapas de isópicas do SAG e SASG. O mapa geológico é um resumo do arcabouço geológico da área, apresentando as informações mais relevantes para o prosseguimento do estudo hidrogeológico.

A coluna estratigráfica da região é baseada nas unidades aflorantes na bacia e em descrições de poços e sondagens. A Formação Guará, embora pertencente ao SAG, não aflora na bacia. O mapa geológico foi utilizado como base para calcular as áreas de afloramento, em porcentagem, dos litotipos presentes (Tabela 2).

Tabela 2. Coluna estratigráfica, porcentagem de área de regiões de afloramento e seus respectivos sistemas aquíferos.

ERA	PERÍODO	LITOESTRATIGRAFIA	ÁREA DE AFLORAMENTO (%)	AQUÍFERO	
CENOZOÍCO	Holoceno	Sedimentos Quaternários	9,74%	PÓS-SAG	Aquífero Livre
MESOZOÍCO	Cretáceo	Formação Serra Geral	88,19%	SASG	Aquífero Fraturado
	Cretáceo / jurássico	Formação Botucatu	2,07%	SAG	Aquífero Livre a Confinado
		Formação Guará	-		Aquífero Livre a Confinado

### 5.3. Hidrogeologia

#### 5.3.1. Potenciométrico

Para o estudo potenciométrico das cargas hidráulicas da bacia, só foram considerados os poços nos quais ocorre extração de água do SAG, pois o entendimento do fluxo de água em aquíferos fraturados como é o caso do SASG é muito complexo dada a heterogeneidade imprimida pela porosidade secundária nos basaltos.

O mapa potenciométrico da bacia (Figura 17) foi criado para visualizar os sentidos de fluxo da água subterrânea do SAG, que permeiam dos pontos de maior carga hidráulica (CH) para os de menor. Os valores de CH variam de 220 (azul escuro) a 24 (verde amarelado).

A porção SE, de topografia mais elevada, é a região onde os valores de carga hidráulica são maiores, e o extremo W da área (próximo ao Rio Uruguai e de topografia mais baixa) apresenta os menores valores, indicando um fluxo geral de E para W.

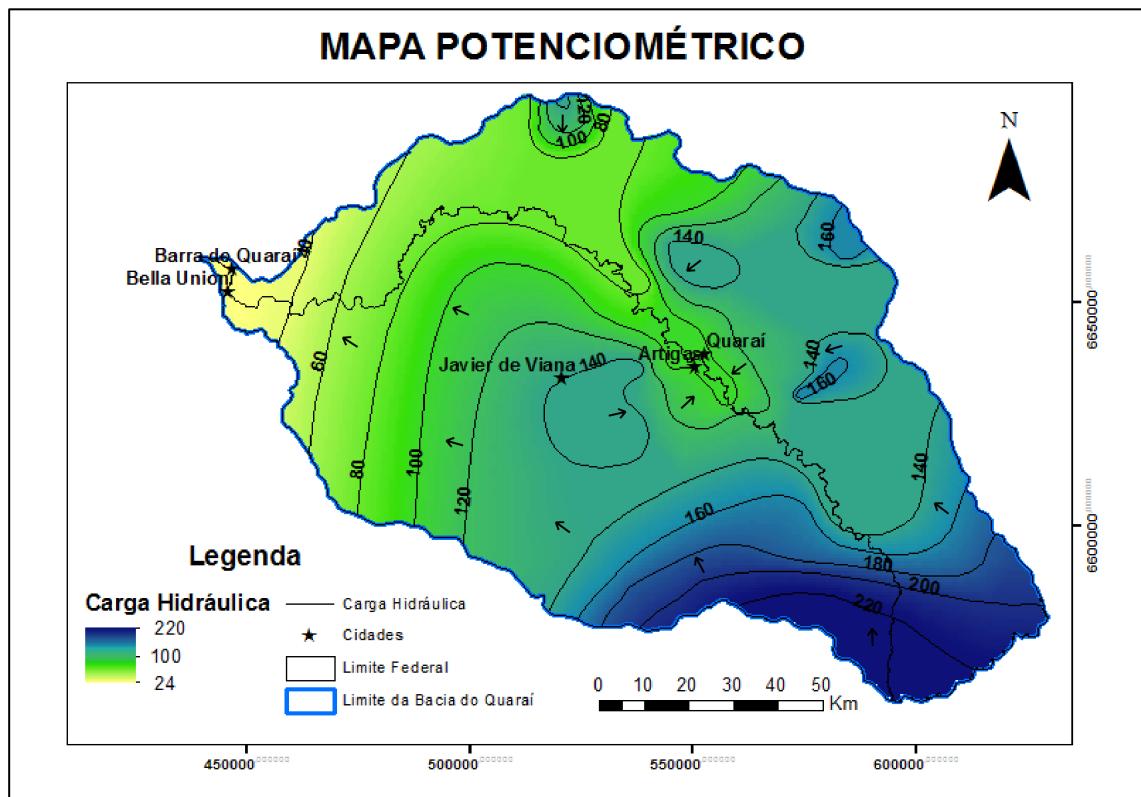


Figura 17. Mapa potenciométrico da Bacia do Rio Quaraí. As setas indicam a direção do fluxo subterrâneo.

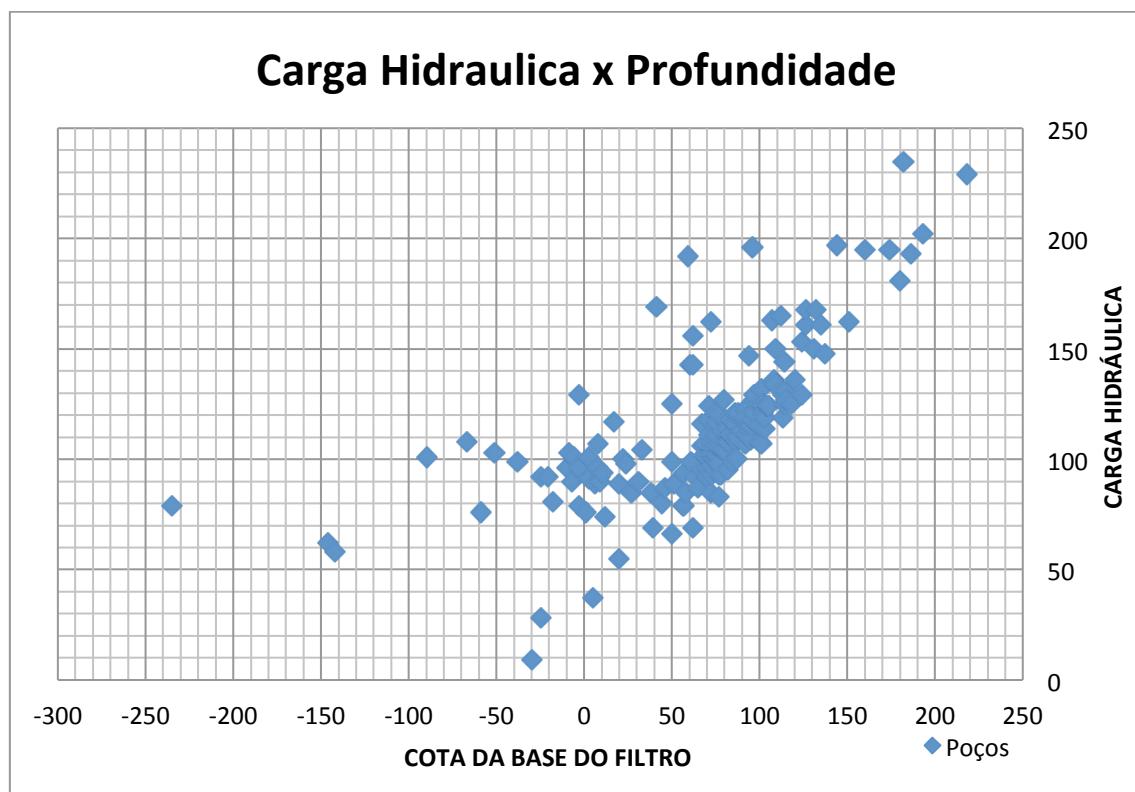


Figura 18. Variação dos valores de Carga Hidráulica em relação à cota da base do filtro do poço.

Há, também, um fluxo local em direção às cidades de Quaraí (BR) e Artigas (UR), que pode ser explicado devido à grande exploração de águas do SAG na região

metropolitana. O grande consumo de água faz com que haja um rebaixamento anômalo no nível d'água da região, criando um fluxo nessa direção para a recuperação do nível estático.

Nota-se uma correlação existente entre a variação da carga hidráulica com a profundidade de captação de água do poço (Figura 18). Os pontos que se destacam à esquerda do gráfico, apresentam baixos valores de CH, pois estão localizados em regiões de baixa topografia e apresentam nível d'água quase aflorante.

Apesar de ter alguns poços com valores de CH mais baixos, é possível observar uma tendência de aumento de CH junto do aumento da cota da base do filtro do poço.

### 5.3.2. Pluviométrico

O mapa pluviométrico da Bacia do Rio Quaraí apresenta as médias pluviométricas registradas em estações pluviométricas entre os anos de 2010 e 2016 (Figura 19). Como é possível notar, há heterogeneidades pluviométricas, porém o espaço amostral de 6 anos não é suficiente para determinar se há algum tipo de microclima ou fator regulando estas anomalias.

Tabela 3. Pluviosidade anual acumulada entre 2010 e 2016 nas estações pluviométricas localizadas na Bacia do Rio Quaraí.

Código / Nome	Coordenadas (UTM - Zona 21S)		Total de chuva no ano (mm)						
	X	Y	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Bella Union	442655	6652397	696,5	1269,4	1470,7	1175,8	1782,4	802,7	1852,6
Artigas	549519	6635040	741,8	1030,5	1392,3	1296,6	1780	2244,7	1740,9
3055003	598218	6603689	804,7	1011,1	1300,9	1304,8	1778,4	1934,2	1673,3
3055008	598515	6648204	763,6	1139,7	1154,3	1346,3	1768,5	1891,6	1151,9
3055011	600369	6597603	624,1	894,7	1271,4	1264,5	1632,2	2090,7	1582,7
3056004	517223	6679108	604,6	1254,5	1309,4	1209,7	1663,1	1653,72	1268,1
3056006	579971	6673322	626,9	1134,3	1263,2	1207	1656,4	2172,6	1503,5
3056007	579415	6622685	619,5	960,1	937,4	1433,6	1832,7	1841,2	1449,2
3056010	550178	6680670	763,6	1269,7	1401,8	1197	1952,9	1739,7	1461,3

O fato de haver mais chuva na região urbana pode estar associado à diversos fatores, assim como pode ser que em um período amostral maior as médias de chuvas possam se apresentar mais homogeneamente.

Os dados utilizados para a confecção do mapa estão apresentados na tabela 3. Nota-se que algumas delas registraram mais de 30% de chuva a mais que outras no mesmo ano e alguns anos depois registraram menos chuvas que outras.

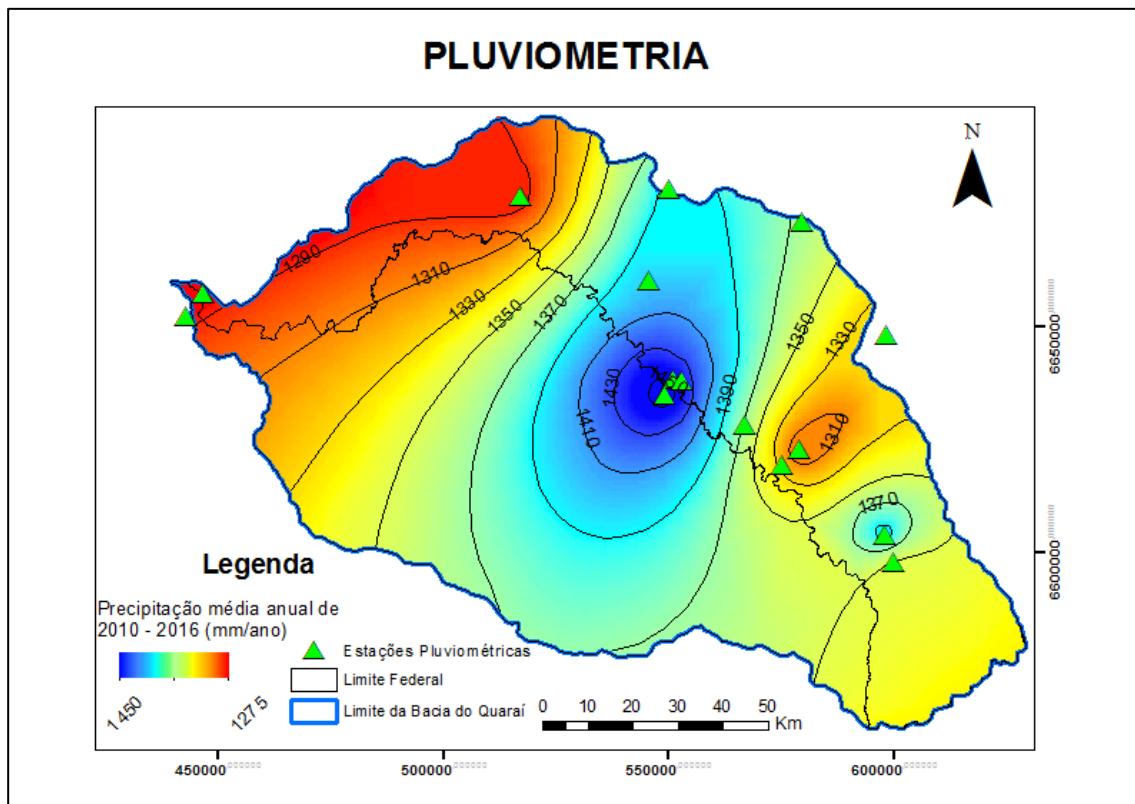


Figura 19. Mapa pluviométrico da Bacia do Rio Quaraí. Os dados apresentados são referentes às médias anuais entre 2010 e 2016.

### 5.3.3. Base de dados

As informações dos poços tubulares utilizadas para a confecção do modelo hidrogeológico conceitual são apresentadas em forma de tabela no Anexo (3). As informações contidas estão separadas em: código do poço, coordenadas, fonte dos dados, nível estático, vazão e profundidade do poço. Uma segunda base de dados, referente às informações de espessura do SASG e do SAG encontram-se tabeladas no Anexo (4). A quantidade de perfurações profundas dentro da bacia é baixa, portanto foi necessário utilizar alguns pontos nos entornos da região.

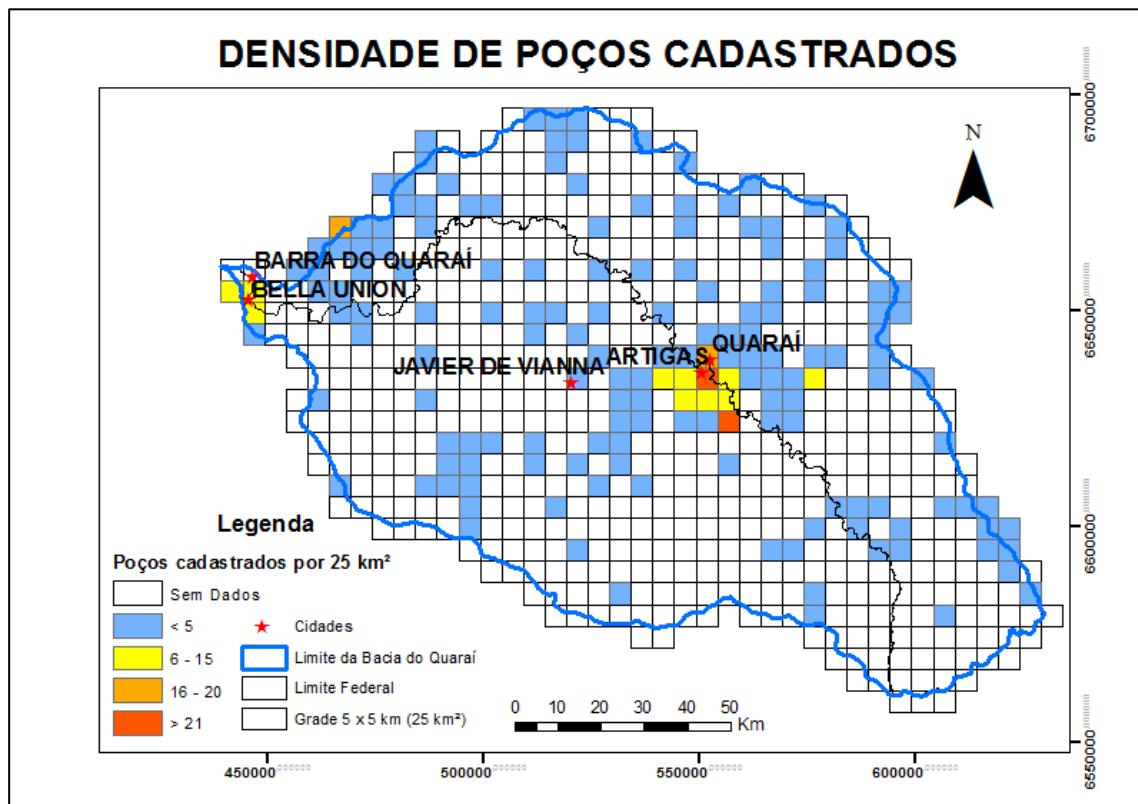


Figura 20. Densidade de poços cadastrados na Bacia do Rio Quaraí.

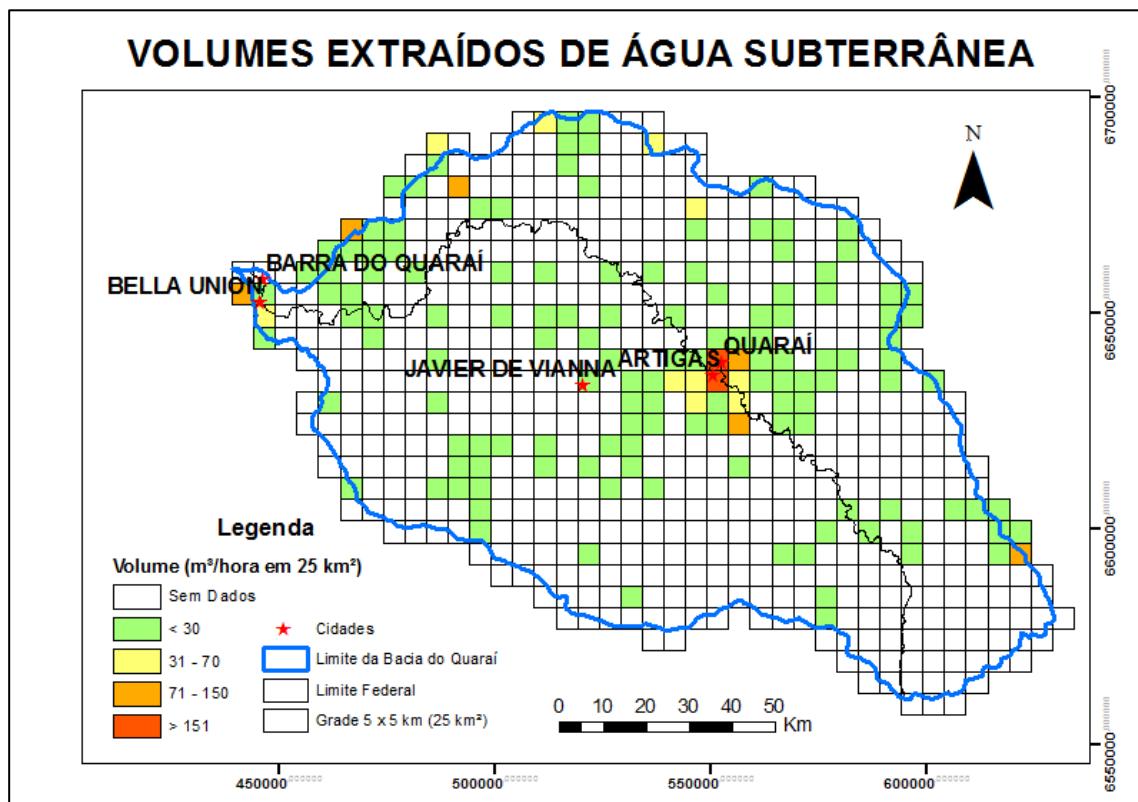


Figura 21. Volume de água subterrânea por hora extraídos na Bacia do Rio Quaraí

A partir da figura 20, nota-se que há uma quantidade muito maior de poços tubulares cadastrados na região metropolitana de Quaraí (BR) e Artigas (UR) que nas

regiões rurais ao entorno. Outros pontos com maior densidade de poços cadastrados são próximos do vilarejo de Bella Unión (UR). Vale ressaltar que na figura 20 estão representados apenas os poços tubulares cadastrados nos órgãos oficiais, eventuais poços cacimbas não estão representados.

Estes resultados estão condizentes, pois se espera que nas regiões urbanas existam mais poços para o abastecimento público e privado.

Outra informação possível de se retirar da base de dados é o volume extraído de cada poço (dado obtido na data de instalação do poço). A partir dela criou-se um mapa de volumes extraídos para quadrículas de área de 25 km<sup>2</sup> (Figura 21). Como observado no mapa anterior, os maiores valores estão nas áreas urbanas, pois é onde está localizada a maioria dos poços. Ressalta-se que apesar do SASG ser mais explorado na área da Bacia do Rio Quaraí, os poços localizados na região urbana de Quaraí (BR) e Artigas (UR), em sua maioria, extraem água do SAG, e, portanto, possuem na média vazões maiores do que as obtidas em poços instalados nas rochas basálticas.

Este mapa apresenta suas limitações. A primeira é a desatualização dos dados, já que estes foram gerados na data de instalação de cada poço, e podem possuir mais de 50 anos. A segunda é a falta de informação de vazão específica em alguns poços. Idealmente seria necessário realizar medições novas em todos os poços para a criação deste mapa, porém está ideia não é viável financeiramente e temporalmente para este projeto.

Quando se analisam as vazões extraídas em cada aquífero (Tabela 4) percebe-se que os poços instalados no SAG possuem vazões maiores do que dos outros aquíferos e apesar de não ser a unidade com mais poços instalados, é a que mais extraí água (59,2%). O SASG é o aquífero com mais poços instalados, isso se deve ao menor custo de instalação, pois é a unidade aquífera aflorante na maior parte da bacia, porém seus poços possuem baixas vazões e são responsáveis por 34,2% do volume extraído na bacia.

Os poços bombeando água nos Aquíferos Quaternários, além de serem poucos, apresentam a menor vazão média e são responsáveis por apenas 6,7% da extração de água na Bacia do Quaraí.

Tabela 4. Relação de vazão dos poços por unidade aquífera.

	Poços cadastrados	Vazão Média (m <sup>3</sup> /hora)	Volume Extraído Total (m <sup>3</sup> /hora)	%
<b>Aquíferos Quaternários</b>	46	4,591	211,200	6,7
<b>SASG</b>	243	5,611	1082,847	34,2
<b>SAG</b>	211	9,877	1876,704	59,2
<b>Total</b>	513	7,334	3256,351	100

As mesmas limitações apontadas no mapa de volumes extraídos se repetem para esta tabela.

#### 5.3.4. Ensaios de bombeamento

Os valores de permeabilidade hidráulica (k) e transmissividade (T) calculados através da interpretação dos ensaios de bombeamentos podem ser encontrados na tabela 5. Infelizmente, a maior parte dos poços carece de coordenadas e possuem somente croquis esquemáticos dos locais de sua instalação devido à época em que foram instalados. Além disso, as informações construtivas de alguns dos poços não foram encontradas, e, portanto, para estes poços não foi possível interpretar os ensaios de bombeamento.

Na figura 22 estão plotadas as variações de medidas de nível estático pelo tempo dos ensaios de rebaixamento e recuperação dos poços com filtros instalados na Formação Botucatu. É possível observar similaridades tanto nos rebaixamentos, lentos e prolongados, quanto nas recuperações, rápidas e com curtas durações.

Nota-se que os poços estão instalados em cidades diferentes, a dezenas de quilómetros de distância, indicando que a homogeneidade do aquífero não é localizada e se estende pela região.

Na figura 23 estão plotados os valores de variação do N.A. durante os ensaios de rebaixamento e recuperação realizados nos poços que extraem águas da Formação Serra Geral. Diferentemente do gráfico anterior, as respostas dos níveis de água foram bem heterogêneas.

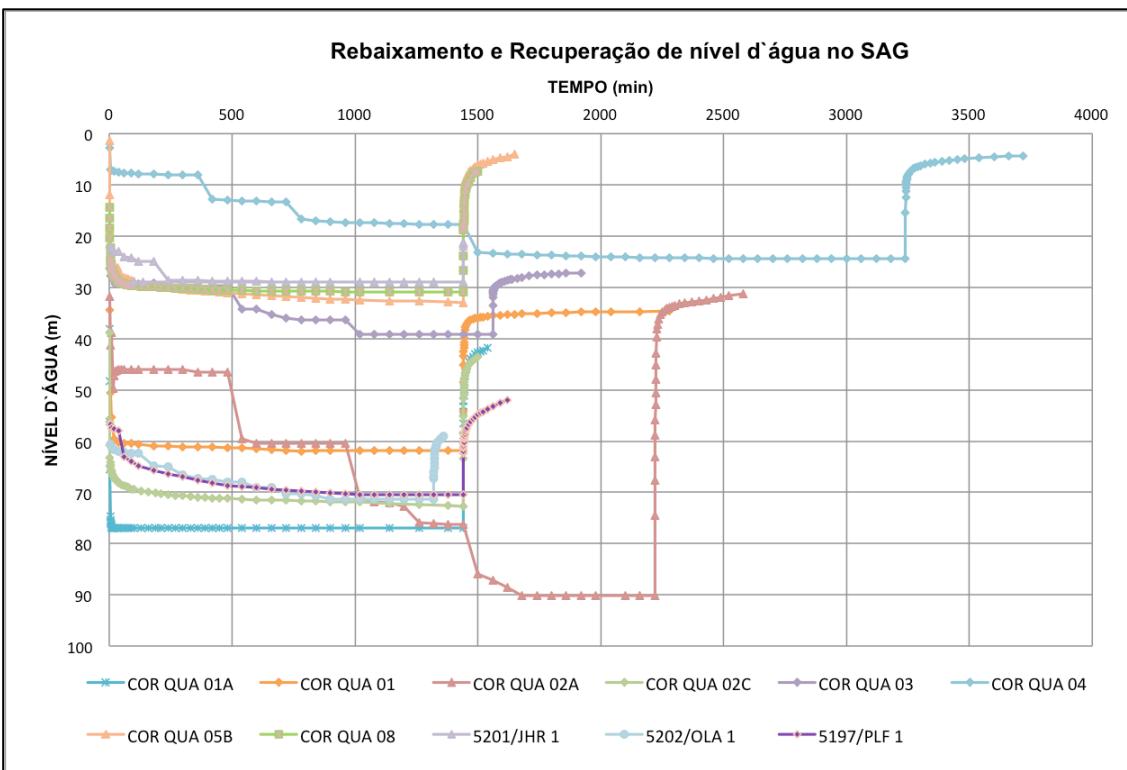


Figura 22. Gráfico da variação dos valores de N.A. durante os ensaios de rebaixamento e recuperação nos poços que explotam águas do SAG.

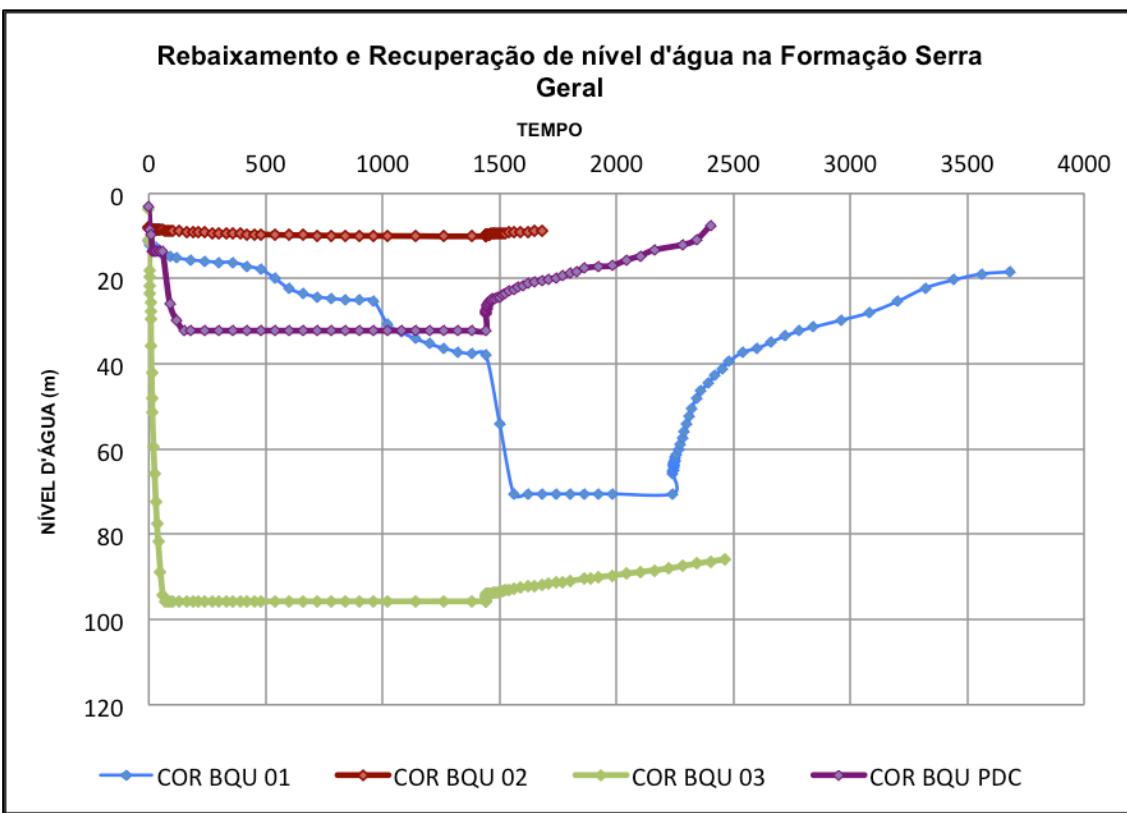


Figura 23. Gráfico da variação dos valores de N.A. durante os ensaios de rebaixamento e recuperação nos poços que explotam águas da Formação Serra Geral.

Nota-se que os rebaixamentos são mais rápidos e abruptos enquanto as recuperações mais demoradas e prolongadas neste litotipo que nos arenitos do SAG. Porém, apesar de compartilharem estas similaridades, as repostas dos poços não são parecidas entre si, indicando a heterogeneidade esperada de um sistema aquífero fraturado.

Os valores de  $k$  encontrados para os ensaios correspondem com as curvas de rebaixamento apresentadas, onde o maior valor encontrado (30,73 m/dia) corresponde à curva de menor rebaixamento e recuperação mais rápida nos arenitos, e o menor valor (0,014 m/dia) correlaciona-se com a curva de maior rebaixamento e menor recuperação dos basaltos.

O valor médio de  $k$  e  $T$  para os arenitos é 5,808 m/dia e 168,18 m<sup>2</sup>/dia, respectivamente, enquanto que para os basaltos estes valores são 0,2198 m/dia e 38,253 m<sup>2</sup>/dia. A mediana dos valores de  $k$  e  $T$  são 3,589 m/dia e 112 m<sup>2</sup>/dia, respectivamente, para os arenitos e 0,1721 m/dia e 13,768 m<sup>2</sup>/dia, respectivamente, para os basaltos. Os valores de  $T$  nos arenitos estão compatíveis com os apresentados por Gomez (2007).

O ensaio realizado no poço COR QUA 03 apresenta uma mescla de permeabilidades do basalto e arenito, pois este poço capta água tanto do aquífero cristalino quanto do poroso, e portanto não foi associado a nenhuma das estatísticas.

Tabela 5. Resultados das interpretações dos ensaios de bombeamento.

Cidade	Poço	K(m/dia)	T(m <sup>2</sup> /d)	Litologia
Barra do Quaraí	COR BQU 01	0,1721	13,768	Basalto
Barra do Quaraí	COR BQU 03	0,01422	1,62108	Basalto
Barra do Quaraí	COR BQU PDC	0,4732	99,372	Basalto
Quaraí	COR QUA 01A	1,55	112	Arenito Confinado
Quaraí	COR QUA 01	1,32	180	Arenito Confinado
Quaraí	COR QUA 02	4,665	150	Arenito Confinado
Quaraí	COR QUA 02A	4,38	86,51	Arenito Confinado
Quaraí	COR QUA 02C	2,103	105	Arenito Confinado
Quaraí	COR QUA 03	0,6272	23,59	Arenito + Basalto
Quaraí	COR QUA 04	30,73	583	Arenito Confinado
Quaraí	COR QUA 05B	3,589	269	Arenito Confinado
Quaraí	COR QUA 06	7,97	159,5	Arenito Confinado
Quaraí	COR QUA 08	2,144	326	Arenito Confinado
Quaraí	COR QUA SAL 01	1,533	115	Arenito Confinado
Uruguaiana	5201/JHR 1	4,635	284	Arenito Livre

Estas variações de ordem de grandeza dos valores estão condizentes com os diferentes litotipos de onde houve o bombeamento de água. Rochas sedimentares, em geral, apresentam maior condutividade que basaltos fraturados.

Nos arenitos, com exceção do poço COR QUA 04, os valores de  $k$  apresentam mesma ordem de grandeza, indicando características hidráulicas semelhantes na região amostrada. Esta mesma análise não é indicada a ser feita para os valores encontrados nos basaltos pois não há grande espaço amostral de dados.

### 5.3.5. *Mapa Hidrogeológico*

O mapa hidrogeológico (Anexo 2) sintetiza e integra informações geológicas e hidrogeológicas da Bacia do Rio Quaraí. Nele é possível verificar as unidades hidrogeológicas aflorantes e subjacentes, sua disposição em seção, falhas geológicas, isópacas do basalto e potenciometria do SAG.

A partir dele é possível ver as disposições dos aquíferos e suas classes de produtividade referentes aos critérios de Struckmeier e Margat (1995). Nele é possível notar locais que os aquífero quaternários estão sob os basaltos e onde está sob o SAG.

## 5.4. **Modelo Hidrogeológico Conceitual**

O bloco diagrama apresentado indica os principais fluxos de água no sistema, representados pela chuva, evapotranspiração, escoamento superficial e infiltração. Os valores médios de  $k$  para cada aquífero estão sinalizados no desenho (Figura 25). A infiltração média encontrada para o SAG na Sub-Bacia Passo da Cachoeira (Bacia do Rio Ibicuí), bacia esta adjacente a Bacia do Rio Quaraí e com características geológicas semelhantes, é de 18,25% da chuva. Não foi possível estimar a infiltração no SASG.

A precipitação média na bacia varia, porém assumiu-se um valor representativo para a região da “janela” de Botucatu como sendo 1400 mm/ano.

Parte da água pluviométrica que não infiltra como recarga, escoa para o Rio Quaraí ou afluentes, enquanto que outra parte volta para a atmosfera através da

evapotranspiração. Para estimar estes valores é necessário um mapa de uso do solo na região.

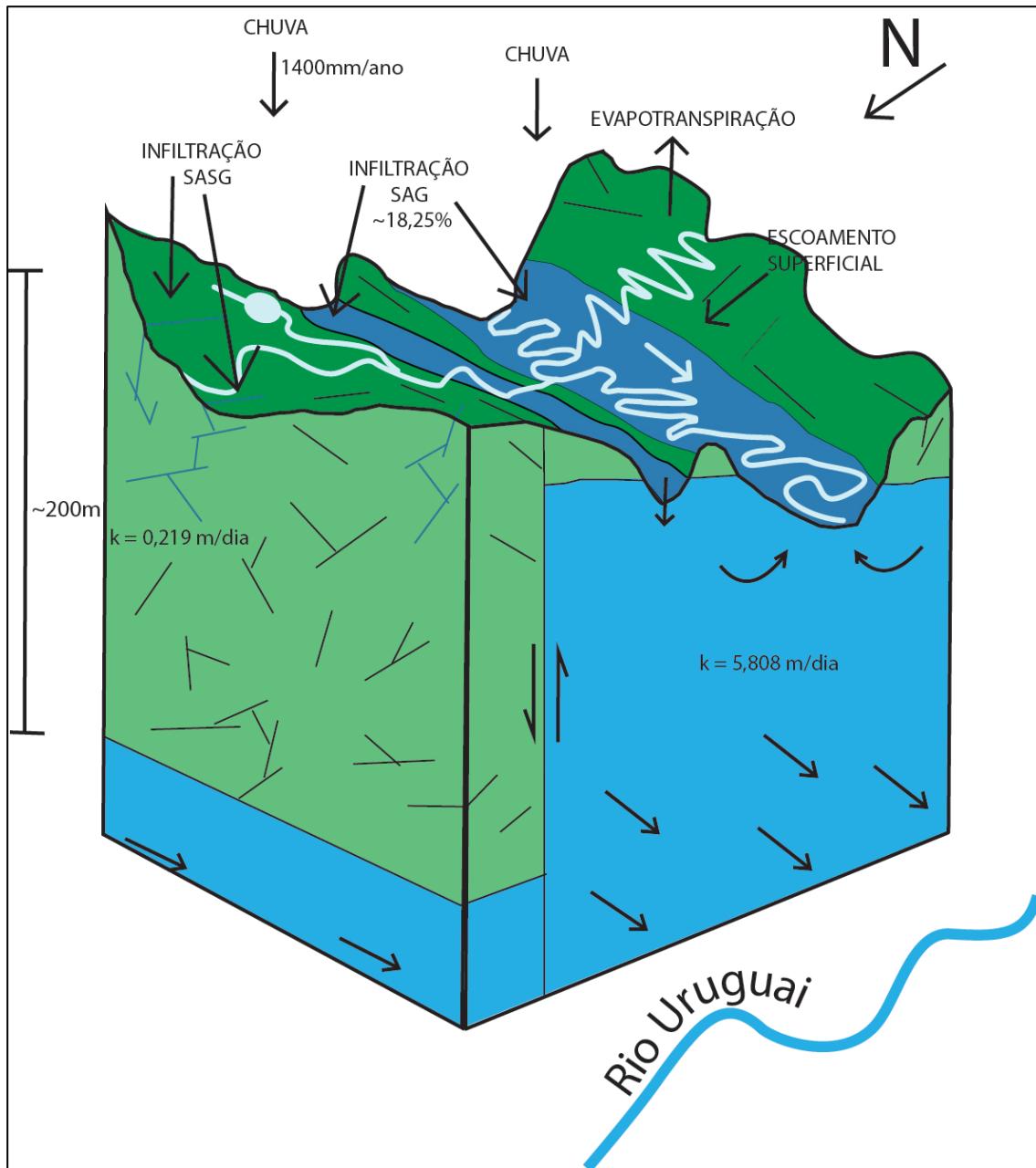


Figura 25. Bloco diagrama conceitual da Bacia do Rio Quaraí. As setas indicam os fluxos hidrológicos referentes ao ciclo da água no SASG (verde) e SAG (azul).

O diagrama mostra o fluxo regional do SAG em direção ao Rio Uruguai e, também, o fluxo local ao Rio Quaraí. Nele está indicado os locais de infiltração e recarga dos aquíferos cristalino (fraturas) e granular (afloramentos).

## 6.0. CONCLUSÃO

Na área de estudo afloram as três unidades hidrogeológicas discutidas. Os Aquíferos Quaternários são limitados aos depósitos fluvio-aluviais recentes do Rio Quaraí e seus afluentes associados aos sedimentos quaternários depositados próximos ao Rio Uruguai, na porção W da bacia, totalizando 9,74% em área. Este aquífero tem características granulares porém sua exploração não é expressiva na região, com apenas 46 poços extraíndo água desta unidade à baixas vazões (média de 4 m<sup>3</sup>/hora)

O SASG é aflorante em 88,19% da bacia, estando as vezes sob os aquíferos quaternários e capeando o SAG, localmente na área da “janela” de arenitos ele é ausente. É cristalino, e por isso, depende de fraturas para o percolamento de suas águas. A infiltração e recarga de suas águas se faz através de infiltração da água superficial em fraturas na superfície. Os sedimentos intrabasálticos se mostraram mais comuns na porção SE da bacia, próximos da base da unidade.

Existem dois padrões de lineamentos no SASG, o primeiro, na porção SW da bacia, possui um sentido principal N120 e no qual o Rio Quaraí está inserido. O segundo padrão se faz a N do Rio Quaraí e apresenta direções mais variadas de N70 a N110, com lineamentos mais curtos que no primeiro padrão.

Sua espessura varia pela bacia e possui um *trend* de espessamento de E para W, associado aos falhamentos normais, em direção ao depocentro dos derrames basálticos. Os valores de k e T encontrados para as rochas do SASG variam de 0,01 a 0,47 m/dia e 1,62 a 99,37 m<sup>3</sup>/dia, respectivamente. Na área da bacia, possuem 243 poços instalados no SASG, sendo o aquífero com mais poços instalados, extraíndo água a baixas vazões (média de 5,61 m<sup>3</sup>/hora)

O SAG é presente em toda a bacia, porém é aflorante somente em apenas 2,07% dela, na região da “janela” de Botucatu que é controlada estruturalmente por falhas normais. Nesta região, as rochas do Guarani afloram nas áreas mais baixas topograficamente. O SAG apresenta espessamento de suas camadas de E para W, em direção ao centro da Bacia do Paraná. Existem 211 poços cadastrados na bacia bombeando água dos arenitos do SAG com as melhores vazões da área (média de 9,87 m<sup>3</sup>/hora).

Suas águas subterrâneas possuem um fluxo regional controlado pela gravidade, de E para W, em direção ao Rio Uruguai. Porém, próximo à região urbana de Quaraí (BR) e Artigas (UR) existe um fluxo local em direção às cidades, associado

ao grande número de poços bombeando água nesta área. Os valores de  $k$  e  $T$  interpretados para as rochas do SAG variam de 0,62 a 30,73 m/dia e 23,59 a 583  $m^2$ /dia, respectivamente. A média desses valores é de 5,808 m/dia e 168,18  $m^2$ /dia

A área urbana de Quaraí (BR) e Artigas (UR) concentra a maior densidade de poços cadastrados, assim como os maiores volumes extraídos de água na bacia, devido ao alto consumo público e industrial. Existem mais poços cadastrados extraíndo água no SASG que no SAG, porém as vazões específicas no aquífero fraturado são bem menores que as vazões nos arenitos, que no total, são responsáveis pela maior extração de água na bacia.

Recomenda-se que sejam feitos estudos de uso e ocupação do solo para a área da bacia, assim como estudos de estimativa de recarga, evapotranspiração e escoamento superficial. A partir destes é possível quantificar o balanço hídrico da Bacia do Rio Quaraí e realizar modelos numéricos de fluxo.

Sugere-se, também, que a base de dados dos poços cadastrados seja atualizada com valores atuais de nível estático e vazões específicas. Os poços que não possuem estas informações devem ser analisados para a complementação das informações.

## 7.0. BIBLIOGRAFIA

- Adobe Systems Inc. (1995): Adobe Illustrator CS5 – San Jose, CA.
- Almeida, F.F.M. (1986) Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. *Revista Brasileira de Geociencias*. volume 16 (4). pp. 325-349. São Paulo
- Araújo L.M., França A.B., Potter P.E. (1995) Aqüífero Gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai: mapas hidrogeológicos das Formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Missiones e Taquarembó. UFPR/Petrobrás, 16 p., 9 mapas, Curitiba.
- Bazterrica, A. (2002) Contribución a la hidrogeología del acuífero guaraní en el Sector Uruguay. Un enfoque integral. Tese (Mestrado). Universidad Nacional Autónoma del Mexico – Instituto de Geología. pp. 119.

Borghetti, N.R.B., Borghetti, J.R., Rosa Filho, E.F. (2004) Aqüífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul. *GIA: Fundação Roberto marinho*. p. 214. Curitiba.

Campana, M. (2005) Foreword: transboundary ground water. *Ground Water*. Volume 43 (5). pp. 646–648.

Carrión, A.M. (2017): Modelo conceptual hidrogeológico y simulación numérica del flujo subterráneo del sistema acuífero guaraní, con énfasis en el sector Argentino. Tese (Doutorado) – Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

CIC – Comite Intergovernamental Coordenador dos Países da Bacia do Prata (2015a) Memórias de La Carta Hidrogeológica de la Cuenca del Cuareim/Quaraí. (Relatório interno). pp. 19. Montevideo.

CIC – Comite Intergovernamental Coordenador dos Países da Bacia do Prata (2015b) Memórias de La Carta Geológica de la Cuenca del Cuareim/Quaraí. (Relatório interno). pp. 15. Montevideo.

Collischonn, B., de Paiva, R.C.D., Collischonn, W., Meirelles, F.S.C., Schettini, E.B.C., Fan, F.M. (2011). Modelagem Hidrológica de Uma Bacia com Uso Intensivo de Água: Caso do Rio Quaraí-RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, volume 16 (4). pp. 119-133. Santa Maria.

Corbo, F., Arzate, J., Oleaga, A. (2011) Structure of the Guarani aquifer in the surroundings of the Uruguay river from magnetotelluric soundings. *Geofisica Internacional*. Volume 2012, 51:1. pp. 17-37.

Fondo de Universidades (2006) Projeto Piloto: Caracterización de Áreas de recarga y descarga del SAG en Rivera-Livramento y Quaraí-Artigas. Estudio de vulnerabilidad en el área de influencia de Artigas-Quaraí. (Relatório interno). pp. 194. Montevideo.

Gagliardi, S. (2008): Caracterización geológica e hidrogeológica de la ciudad de Artigas y sus arredores. Trabalho de Formatura. Universidad de La Republica (UDELAR), Montevideo.

Gómez, A.A. (2007) Análisis del comportamiento hidrológico subterráneo de las Formaciones Tacuarembó – Arapey del Sistema Acuífero Guarani, en el norte de Uruguay –Tese (Mestrado). Universidad Nacional del Litoral – Santa Fe, Argentina.

Kayser, R.H.B (2014) Metodologia de balanço hídrico e critérios de outorga em bacias hidrográficas com uso intenso de reservatórios de pequeno porte: estudo de caso na bacia do Rio Quaraí. Tese (Mestrado). Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS.

Machado, J.L.F. (2005) Compartimentação espacial e arcabouço hidroestratigráfico do Sistema Aqüífero Guarani no Rio Grande do Sul. Tese (Doutorado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos - Programa de Pós-Graduação em Geologia. pp. 237. São Leopoldo.

Machado, J.L.F. (2006) A redescoberta do Aqüífero Guarani. *Scientific American Brasil*, volume n. 47. pp. 33-39. São Paulo.

Mársico, D.P. (2013): Aportes a La Perspectiva Geologica e Hidrogeologica Regional en el Sector Centro Este de La Cuenca Chacopampeana. Tese (Doutorado) – Universidad da Coruña, Argentina.

Mattiuzzi, C.D.P., et al., (2015): Compracação de métodos de Estimativa de recarga aquífera aplicados à bacia do Rio Ibicuí/RS. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. pp 8.

Milani, E.J. (1997) Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-occidental. *Revista Brasileira de Geociências*, volume 39 (3), 2009 579 Tese (Doutorado). pp. 254 - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

Milani, E.J. (2004) Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia Do Paraná. *Geologia Do Continente Sul-American: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, Beca*, pp. 265. São Paulo.

Pérez A., Rocha, L., Decoud, P., Carbajal, A. (2000). Comportamiento del Acuífero Guarani en la Ciudad de Artigas – Uruguay. *1st Joint World Congresso on Groundwater*. pp. 1-19. Fortaleza.

QGIS Development Team (2009): QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation. URL <http://qgis.osgeo.org>

Ramos, J., Gamazo, P., Saracho, A. (2015) – Realización de sondeos audio-magneto-telúricos en la Cuenca del Río Cuareim y elaboración de mapa piezométrico en as ciudades de Artigas y Quaraí – *Fundacion Desarrollo Regional de Salto Grande*. pp. 72.

Rebouças, A.C. (1978) Potencialidades hidrogeológicas dos basaltos da Bacia do Paraná. Sociedade Brasileira de Geologia - *Congresso Brasileiro de Geologia*. 30 Anais, pp.1963-1976.

Rocha, G. (1997) O grande manancial do Cone Sul. *Estudos Avançados*. Universidade de São Paulo. Volume 11 (30). pp. 191-212. São Paulo.

Scherer, C.M.S. (2000) Eolian dunes of the Botucatu Formation (Cretaceous) in southernmost Brazil: morphology and origin - *Sedimentary Geology*. volume 137, pp. 63-87.

Scherer, C.M.S., Lavina, L.C.E. (2005) Sedimentary cycles and facies architecture of aeolian–fluvial strata of the Upper Jurassic Guará Formation, southern Brazil – *Sedimentology*. volume 52. pp. 1323–1341.

Scherer, C.M.S., Lavina, L.C.E. (2006) Stratigraphic evolution of a fluvial–eolian succession: The example of the Upper Jurassic–Lower Cretaceous Guará and Botucatu formations, Paraná Basin, Southernmost Brazil. *Gondwana Research* – volume 9 (4). pp. 475-484.

Silvério da Silva, J.L., Santos, E.F.D., Frantz, L.C., Malheiros, R.P. (2004). Arcabouço geológico-geomorfológico da bacia hidrográfica do Rio Quaraí – Rio Grande do Sul/Brasil. *V Simpósio Nacional de Geomorfologia – I Encontro Sul-Americano de Geomorfologia*. UFSM – Santa Maria – RS.

Silvério da Silva, J.L., Riffel, E.S., Dos Santos, E.F. (2008). Análise de águas subterrâneas na bacia hidrográfica do Rio Quaraí – Rio Grande do Sul. *XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. Natal: ABAS

Struckmeier, W.F., Margat, J. (1995): Hydrogeological Maps – A guide and a Standard Legend. – International Association of Hydrogeologists (IAH), Int. Contrib. to Hydrogeology. 17: 177p.

Suertegaray, D.M.A. (1998) Deserto Grande do Sul: Controvérsia. 2 ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998. pp.109. Porto Alegre.

Golden Software Inc. (2008). Surfer v.9, Golden, CO

Ucha, N. e Santa Ana, H. (1990): Evaluación del potencial hidrocarburífero del sector noroccidental de la Cuenca Norte uruguaya. División Investigación y Desarrollo, ANCAP, Montevideo, 140 pp.

Valerio, R.F.P. (2004) Estudio hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní en la zona Rivera-Santana do Livramento. *II Curso Internacional de Hidrología Subterrânea – Versión a Distancia.* pp. 95

Waterloo Hydrogeologic Inc (2014): AquiferTest – Versão 4.0. – Waterloo-CA

Wildner, W. et al (2006): Mapa Geológico do Estado do Rio Grande Do Sul 1:750.000 – CPRM, Porto Alegre, Brasil.