

---

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

---

**ANTONIO SILVA DORA**

**QUANTIFICAÇÃO DE RESERVAS RENOVÁVEIS DE**  
**ÁGUA SUBTERRÂNEA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS**  
**A PARTIR DE SÉRIES HISTÓRICAS DE VAZÃO:**  
**UMA FERRAMENTA PARA A GESTÃO DE BACIAS**

Porto Alegre

2013

**ANTONIO SILVA DORA**

**QUANTIFICAÇÃO DE RESERVAS RENOVÁVEIS DE  
ÁGUA SUBTERRÂNEA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS  
A PARTIR DE SÉRIES HISTÓRICAS DE VAZÃO:  
UMA FERRAMENTA PARA A GESTÃO DE BACIAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO APRESEN-  
TADO AO CURSO DE ENGENHARIA  
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDE-  
RAL DO RIO GRANDE DO SUL COMO  
PARTE DOS REQUISITOS PARA A OB-  
TENÇÃO DO TÍTULO DE ENGENHEIRO  
AMBIENTAL.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Antônio Roehe Reginato

Co-orientador: Msc. Doutorando Fernando Mainardi Fan

Porto Alegre  
Julho 2013

ANTONIO DORA

QUANTIFICAÇÃO DE RESERVAS RENOVÁVEIS  
DE ÁGUA SUBTERRÂNEA EM BACIAS HIDROGRÁFICAS  
A PARTIR DE SÉRIES HISTÓRICAS DE VAZÃO:  
UMA FERRAMENTA PARA A GESTÃO DE BACIAS

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em **04/07/2013** pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....  
Prof. Msc. Marcos Imério Leão

.....  
Prof. Dr. Walter Collischonn

.....  
Prof. Dr. Pedro Antônio Roehe Reginato

.....  
Msc. Doutorando Fernando Mainardi Fan  
.....

Conceito: B

Dedico este trabalho aos meus pais,  
Zélia e Jose Fernando.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, principalmente Zélia, Jose Fernando, Fernanda e Antônio, Miguel e Betânia, aos três pequenos (Otto, Gabi e Sebas), à Marina, e à Fufa por todas as alegrias, ensinamentos, exemplos, apoio, amor e carinho.

Agradeço à UFRGS, e ao IPH, pelo ensino de qualidade.

Ao amigo Fernando Fan e ao Professor Walter Collischonn pelas pesquisas que possibilitaram este trabalho.

Ao Professor Pedro Reginato e, novamente, Fernando Fan pelos ensinamentos, orientação e incentivo.

A todos os colegas e professores que fizeram parte dessa experiência acadêmica.

Agradeço aos meus amigos por todo o carinho e lealdade ao longo destes anos.

E por fim, agradeço a todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para este momento.

## RESUMO

**DORA, A.S. Quantificação de Reservas Renováveis de Água Subterrânea em Bacias Hidrográficas a Partir de Séries Históricas de Vazão: Uma Ferramenta Para a Gestão de Bacias.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este estudo pretende fornecer subsídios para a gestão de recursos hídricos subterrâneos em bacias hidrográficas através da aplicação e avaliação de um filtro numérico de separação de escoamento com dados disponibilizados livremente para quantificar reservas renováveis de águas subterrâneas. Foram utilizadas três formas distintas de estimar o principal parâmetro do filtro, gerando portanto três resultados de reserva renovável para cada área de estudo. O método foi aplicado em quatro bacias da região hidrográfica do rio Uruguai, que estão distribuídas entre os principais sistemas aquíferos dessa região. As séries históricas de vazão foram obtidas de estações fluviométricas localizadas em cada uma das bacias estudadas. Trata-se de dados disponibilizados livremente pela Agência Nacional de Águas. As diversas estimativas geradas foram analisadas e confrontadas com o intuito de identificar o método mais adequado. Foram consideradas, ainda, as características hidrogeológicas em cada caso. O filtro numérico de Eckhardt (2005), aliado à metodologia de estimativa do parâmetro BFI<sub>max</sub> específico, proposto por Collischonn & Fan (2012), apresentou os resultados mais consistentes. Foi feito um levantamento das vazões médias de extração de água subterrânea em cada uma das bacias, na literatura e na base de dados do SIAGAS. Estes dados foram utilizados para estimar as disponibilidades hídricas instaladas em cada bacia, as quais foram comparadas com as estimativas de reservas renováveis obtidas nesse estudo. Assim foi realizado um diagnóstico de utilização das reservas subterrâneas nas bacias estudadas.

Palavras-chave: recarga aquífera, água subterrânea, hidrogeologia.

## ABSTRACT

**DORA, A.S. Streamflow Records Based Groundwater Recharge Estimates in Hydrographic Basins: A River Basin Management Tool.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

The present study aims to help groundwater management in hydrographic basins through running and evaluating a baseflow separation numeric filter which uses freely available data to estimate groundwater recharge. The main parameter of the filter, BFI<sub>max</sub>, was determined through three different methods, resulting in three different estimates of groundwater recharge for each study area. The filter was applied to four river basins located in the hydrographic region of Uruguai river, which were distributed among the main regional aquifers. Stream records were obtained from gauge stations located in each of the study areas. This data is freely provided by the Brazilian water agency (ANA). The several groundwater recharge estimates were analyzed and confronted in order to identify the best BFI<sub>max</sub> estimating method. The geological and hydrological characteristics of the basins were also considered. Eckhardt's numeric filter, in conjunction with the BFI<sub>max</sub> estimating method proposed by Collischonn & Fan(2012), presented the best results. Average extraction rates from water wells in all regions were gathered in order to estimate demand rates. These demand rates were then compared to the water recharge estimates calculated in this study, thus providing an overview of groundwater usage in these basins.

Keywords: groundwater recharge, groundwater, hydrology

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Divisão Hidrográfica Nacional (Resolução No. 32 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos).
- Figura 2.** Subdivisões da Bacia do rio Uruguai segundo o PNRH
- Figura 3.** Localização regional das bacias estudadas
- Figura 4.** Bacia do Rio Caverá
- Figura 5.** Bacia do Rio Comandaí
- Figura 6.** Bacia do rio Conceição
- Figura 7.** Bacia do Rio Jaguarizinho
- Figura 8.** Relevo da Bacia Hidrográfica do rio Uruguai e localização das bacias estudadas
- Figura 9.** Geologia da bacia do rio Caverá
- Figura 10.** Geologia da bacia do rio Comandaí
- Figura 11.** Geologia da bacia do rio Conceição
- Figura 12.** Geologia da bacia do rio Jaguarizinho
- Figura 13.** Hidrogeologia da bacia do rio Caverá com a localização dos poços identificados na bacia
- Figura 14.** Hidrogeologia da bacia do rio Comandaí com a localização dos poços identificados na bacia
- Figura 15.** Hidrogeologia da bacia do rio Conceição com localização dos poços identificados na bacia
- Figura 16.** Hidrogeologia da bacia do rio Jaguarizinho com localização dos poços identificados na bacia
- Figura 17.** Curva de Recessão do rio Comandaí
- Figura 18.** Hidrograma Anual – Comandaí
- Figura 19.** Curva de Recessão do rio Conceição
- Figura 20.** Hidrograma Anual – Conceição
- Figura 21.** Curva de Recessão do rio Jaguarizinho
- Figura 22.** Hidrograma Anual – Jaguarizinho
- Figura 23.** Curva de Recessão do rio Caverá
- Figura 24.** Hidrograma Anual – Caverá



## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Balanço Hídrico Sub-bacias
- Tabela 2.** Resumo de características das bacias de interesse
- Tabela 3.** Roteiro de Predefinição de BFI<sub>max</sub> de Eckhardt
- Tabela 4.** Base de dados – Rio Comandá
- Tabela 5.** Vazões características da série – Comandá
- Tabela 6.** Comparativo de BFI<sub>max</sub> – Comandá
- Tabela 7.** Base de dados – Rio Conceição
- Tabela 8.** Vazões características da série – Conceição
- Tabela 9.** Comparativo de BFI<sub>max</sub> – Conceição
- Tabela 10.** Base de dados fluviométricos – Rio Jaguarizinho
- Tabela 11.** Vazões características da série – Jaguarizinho
- Tabela 12.** Comparativo de BFI<sub>max</sub> – Jaguarizinho
- Tabela 13.** Base de dados – Rio Caverá
- Tabela 14.** Comparativo de BFI<sub>max</sub> – Caverá
- Tabela 15.** Resumo Geral de Estimativas de Recarga
- Tabela 16.** Resultado Final: Estimativas de Recarga (filtro Inverso)
- Tabela 17.** Coeficientes de Escoamento das Bacias
- Tabela 18.** Reservas Renováveis e Disponibilidades Instaladas

## LISTA DE SIGLAS

- ABAS:** Associação Brasileira de Águas Subterrâneas
- ANA:** Agência Nacional de Águas
- BFI:** *Baseflow Index* (índice de escoamento de base)
- BFI<sub>max</sub>:** valor máximo do *Baseflow Index*
- CETESB:** Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
- CEPIS:** Centro de Produção Industrial Sustentável
- CGIAR:** *Consultative Group on International Agricultural Research*
- CNRH:** Conselho Nacional de Recursos Hídricos
- CORSAN:** Companhia Rio-grandense de Saneamento
- CPRM:** Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
- DBRPNRH:** Documento Base de Referência do Plano Nacional de Recursos Hídricos
- DMAE:** Departamento Municipal de Água e Esgoto de Porto Alegre
- DRH:** Departamento de Recursos Hídricos
- ESRI:** Environmental systems Research Institute
- FEPAM:** Fundação Estadual de Proteção Ambiental
- FGV:** Fundação Getúlio Vargas
- IBGE:** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- INCRA:** Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
- IPH:** Instituto de Pesquisas Hidráulicas
- MDE:** Modelo Digital de Elevação
- MMA:** Ministério do Meio Ambiente
- PNRH:** Plano Nacional de Recursos Hídricos
- SEMA:** Secretaria Municipal do Meio Ambiente
- SNIRH:** Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos
- SIAGAS:** Sistema de Informação de Águas Subterrâneas
- SRTM:** *Shuttle Radar Topographic Mission*
- UFRGS:** Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## SUMÁRIO

<b>1 Introdução</b> .....	13
1.1 Importância da água subterrânea .....	13
1.2 Formulação da questão de estudo .....	13
1.3 Justificativa do trabalho .....	14
1.4 Hipótese .....	17
<b>2 Objetivos</b> .....	18
2.1 Objetivos gerais .....	18
2.2 Objetivos específicos .....	18
<b>3 Revisão bibliográfica</b> .....	19
3.1 Evolução da demanda por água subterrânea .....	18
3.2 Recargas e reservas de água subterrânea .....	20
3.3 Métodos de avaliação da recarga .....	22
3.4 Separação de escoamento e filtros numéricos .....	24
<b>4 Caracterização da área de estudo</b> .....	26
4.1 Hidrografia .....	25
4.1.1 Regiões hidrográficas .....	25
4.1.2 Sub-bacias.....	29
4.1.3 Área de estudo .....	31
4.2 Geomorfologia .....	34
4.3 Geologia regional .....	35
4.3.1 Bacia do rio Caverá .....	36
4.3.2 Bacia do rio Comandaí .....	37
4.3.3 Bacia do rio Conceição .....	38
4.3.4 Bacia do rio Jaguarizinho .....	38
4.4 Hidrogeologia .....	39
4.4.1 Rio Caverá .....	40
4.4.2 Rio Comandaí .....	41
4.4.3 Rio Conceição .....	42
4.4.4 Rio Jaguarizinho .....	42
4.5 Clima .....	43
4.5.1 Precipitação .....	43

4.5.2 Evapotranspiração .....	44
<b>5 Metodologia</b> .....	<b>46</b>
5.1 Determinação das bacias estudadas .....	47
5.2 Base de dados .....	50
5.3 Separação de escoamento da base .....	53
5.4 Recarga aquífera .....	57
5.5 Disponibilidade hídrica instalada .....	58
<b>6 Apresentação e análises dos resultados</b> .....	<b>59</b>
6.1 Análise qualitativa dos resultados .....	59
6.2 Análise quantitativa dos resultados .....	71
<b>7 Conclusões</b> .....	<b>77</b>
<b>8 Referências bibliográficas</b> .....	<b>80</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 IMPORTÂNCIA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

A água é tão fundamental para a construção da sociedade quanto o é para a manutenção de nossas vidas, sendo protagonista desde a luta pela sobrevivência até a conquista do desenvolvimento pleno. Ela é insumo indispensável à produção, alimentícia ou não, a base da saúde, desde a higiene das mãos até o esgotamento de uma cidade inteira, importante meio de transporte, de pessoas e bens, pilar fundamental da geração de energia (no caso do Brasil) e da natureza como um todo, e mais ainda, balizador indiscutível da qualidade de vida. Portanto, um recurso socioeconômico muito estratégico.

Do total de água no planeta apenas 2,75% correspondem à água doce (dos quais 2,15% em calotas polares e geleiras), restando em torno de 0,6% distribuídos entre atmosfera, pântanos, lagos, rios e o subsolo (Bonganha, 2005). Parte desta ínfima porcentagem é passível de exploração, racional ou não, destinada principalmente para o consumo por animais, racionais ou não. Mais precisamente, 97% do volume de água doce líquida existente nos continentes, passível de acesso através de meios tecnológicos e econômicos, está concentrada no subsolo (Rebouças, 1999).

## 1.2 FORMULAÇÃO DA QUESTÃO DE ESTUDO – APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE MÉTODOS NUMÉRICOS DE SEPARAÇÃO DE ESCOAMENTO E QUANTIFICAÇÃO DAS RESERVAS RENOVÁVEIS DAS BACIAS DOS RIOS CAVERÁ, COMANDAÍ, CONCEIÇÃO E JAGUARIZINHO, RS

A superexploração de recursos hídricos subterrâneos afeta, não somente a oferta de água subterrânea e os custos relacionados à sua extração, mas também às reservas superficiais, já que as reservas subterrâneas são responsáveis pela manutenção da perenidade de cursos de água, lagos e áreas alagadas.

As reservas hídricas subterrâneas são divididas em renováveis e permanentes. Embora em alguns casos uma pequena fração das reservas permanentes também seja considerada para fins de consumo, usualmente as reservas renováveis, ou parte delas, constituem a porção explorável

do aquífero. A porcentagem das reservas renováveis passível de exploração é bastante controversa.

As reservas renováveis correspondem, de forma geral, ao escoamento de base dos rios. (ANA, 2005). Uma boa alternativa para realizar essas estimativas e maneira acessível é através de métodos numéricos que utilizam dados disponibilizados livremente. Logo, a avaliação e o desenvolvimento de métodos de separação de escoamento que atendam a essas condições, e que forneçam essas estimativas, são de extrema valia.

Assim, esse estudo pretende contribuir para o desenvolvimento desses métodos a partir da aplicação de um filtro numérico de separação de escoamento e três métodos estimativos de seu parâmetro principal.

### 1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Embora o Brasil seja um país privilegiado, pois possui 12% das reservas mundiais de água doce com uma disponibilidade hídrica de 40.732 m<sup>3</sup>/hab/ano (ANA, 2002), a crescente demanda pelo uso de água e, especificamente pelo uso de água subterrânea, merece especial atenção. A cada ano há um aumento significativo no uso dos recursos hídricos subterrâneos, sendo que Tucci & Cabral (2003) consideram que sejam perfurados, anualmente, cerca 10 mil poços no Brasil, grande parte destinada à indústria e ao abastecimento urbano, além da agropecuária e do lazer. O número total de poços no país foi estimado em 200 mil por Rebouças (1988), 300 mil por Tucci & Cabral (2003) e 416 mil por Cardoso et al (2008), que também preveem 545 mil poços para o ano 2020.

Segundo a Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (2001) esta crescente demanda pelo uso da água subterrânea é estimulada por vários fatores, sendo os principais:

- Degradação acentuada dos corpos hídricos superficiais, principalmente aqueles localizados próximos aos centros urbanos;
- Avanço tecnológico que possibilita o acesso e bombeamento de água de poços profundos;
- Crescimento populacional nos núcleos urbanos;
- Normalmente a água subterrânea apresenta boa qualidade;

- Por ser economicamente viável (desde que possua um bom projeto de engenharia, a vida útil de um poço é de vinte a trinta anos, com amortização de investimentos realizados em apenas um terço deste período).

A alternativa de utilização da água subterrânea vem sendo fortemente intensificada para diversos fins (abastecimento público, industrial, irrigação, balneário), pois normalmente é a solução mais barata diante dos problemas de escassez de água (Cardoso et al, 2008).

Entretanto, a superexploração deste recurso pode levar ao esgotamento dos aquíferos. Este fato é preocupante, visto que 60% da população brasileira é abastecida, para fins domésticos, com água subterrânea (IBGE, 2000). No Sul e sudeste, a dependência da água subterrânea é ainda mais evidente já que entre 70 e 90% das cidades e 95% das indústrias vem sendo abastecidas por poços (Freire *et al.*, 1998).

Devido à escassez do recurso hídrico superficial, o recurso subterrâneo é uma reserva vital. Assim, as águas subterrâneas são as principais fontes disponíveis para o abastecimento de água doce.

A caracterização hidrogeológica, assim como o conhecimento do comportamento de reservatórios ao longo do tempo, é crucial para a avaliação e gestão dos recursos hídricos disponíveis. Enquanto a gestão do recurso hídrico é necessária na compatibilização de demandas e disponibilidade, a quantificação das reservas é essencial para que tal gestão seja eficiente e sustentada.

Uma vez inventariadas as reservas subterrâneas existentes e conhecida sua capacidade de recarga é possível estabelecer níveis de exploração que visem a manutenção da quantidade e da qualidade da água do aquífero, permitindo assim a potencialização do desenvolvimento econômico e a garantia de proteção das águas subterrâneas e superficiais.

A avaliação da recarga aquífera é um dos fatores determinantes dos estudos de caracterização hidrogeológica e de gerenciamento das explorações de água subterrânea. A recarga subterrânea pode ser definida de forma geral como a quantidade de água que contribui para aumentar a reserva subterrânea, permanente ou temporária de um aquífero (Bertol et al, 2006).

A forte conexão entre o regime de recarga e descarga da água subterrânea e os demais componentes do fluxo hidrológico influencia diretamente a vazão dos cursos d'água. (De-

wandel et al., 2002; Costa, 2005; Mourão, 2007). Na verdade, em muitos casos as águas subterrâneas são responsáveis por uma porção significativa dessa vazão.

Embora os diversos caminhos percorridos pela água até a calha do rio não sejam totalmente separáveis, é prática comum distinguir entre pelo menos dois componentes: escoamento direto (superficial) e indireto (origem subterrânea) (Collischonn & Tassi, 2010).

A parcela de origem subterrânea da vazão de um rio é de grande interesse já que tal parcela corresponde à capacidade de recarga do aquífero. A análise das vazões em uma bacia, ao longo do tempo, permite a obtenção de dados importantes. Hidrogramas observados em postos fluviométricos podem ser analisados com o objetivo de identificar essas parcelas (direta e indireta). Esta análise é baseada em métodos de separação de escoamento. (Collischonn & Tassi, 2010)

Os métodos mais comuns atualmente envolvem filtros digitais, ou seja, algoritmos numéricos para calcular a separação. Os filtros numéricos utilizam apenas dados de vazão (disponíveis livremente para muitas bacias) e são automatizáveis, apresentando resultados confiáveis e reproduzíveis. Além disso, não demandam custos ou recursos computacionais como os modelos numéricos, são de aplicação imediata e custo baixo.

Com isto, é possível contribuir para a gestão dos recursos hídricos, a um custo acessível. O maior conhecimento a respeito da relação entre águas superficiais e subterrâneas em uma bacia hidrográfica pode ser utilizado para tornar a gestão de bacias hidrográficas mais eficiente. A quantificação dos recursos hídricos pode, por exemplo, auxiliar a balizar os processos de outorga.

Neste trabalho será utilizado o filtro proposto por Eckhardt (2005) com as melhorias apresentadas por Collischonn & Fan (2012) para a avaliação das recargas dos aquíferos das bacias hidrográficas dos rios Caverá, Comandaí, Conceição e Jaguarizinho, no Rio Grande do Sul. As reservas renováveis de cada bacia hidrográfica serão estimadas e poderão ser utilizadas como ferramenta para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos nessas bacias.



## 1.4 HIPÓTESE

É possível contribuir para a gestão de recursos hídricos de bacias hidrográficas através da aplicação e avaliação de um método numérico de separação de escoamento que utiliza dados disponibilizados livremente para a quantificação de reservas renováveis de água subterrânea.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo do presente trabalho é fornecer subsídios para a gestão de recursos hídricos subterrâneos em bacias hidrográficas através da aplicação e avaliação de um filtro numérico de separação de escoamento com dados disponibilizados livremente para quantificar reservas renováveis de águas subterrâneas.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos pretendem responder às seguintes perguntas:

- Como é possível usar o filtro numérico de Eckhardt, aliado à estimativa de BFI<sub>max</sub>, para quantificar as reservas renováveis de água subterrânea em bacias hidrográficas?
- Quais são as reservas renováveis de água subterrânea nas bacias dos rios Comandá, Conceição, Jaguarzinho e Caverá?
- Os valores de BFI<sub>max</sub> predefinidos por Eckhardt são adequados para estimativas de fluxo de base em cursos d'água do Rio Grande do Sul?
- Qual a importância da utilização de valores específicos do parâmetro BFI<sub>max</sub> no filtro de Eckhardt para a estimativa de fluxo de base por separação de escoamento?
- Qual o comportamento do filtro Inverso para estimativa de BFI<sub>max</sub> específico, proposto por Collischonn & Fan (2012), em diferentes sub-bacias?
- O método simplificado de estimativa de BFI<sub>max</sub> através da equação de Relação de Vazões, também proposto por Collischonn & Fan (2012), produz resultados satisfatórios no Rio Grande do Sul?
- Quais os benefícios obtidos a partir da quantificação das reservas renováveis para bacias hidrográficas específicas?

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 EVOLUÇÃO DA DEMANDA POR ÁGUA SUBTERRÂNEA

Os mananciais de água superficial, que são recursos geralmente fáceis de serem acessados, cada vez mais encontram-se indisponíveis para utilização, devido à escassez e à contaminação por efluentes domésticos e industriais. Em contrapartida, a água proveniente do subsolo, frequentemente apresenta uma boa qualidade, embora a contaminação dos aquíferos já não seja um fato raro (CETESB, 2004).

Na agricultura brasileira, a demanda pelas águas subterrâneas vem crescendo fortemente nas últimas décadas. A alternativa de utilização da água subterrânea vem sendo fortemente intensificada para diversos fins (abastecimento público, industrial, irrigação, balneário), pois normalmente é a solução mais barata diante dos problemas de escassez de água (Cardoso et al, 2008).

A expansão das terras agrícolas vem provocando também o uso intensivo das águas subterrâneas, além do uso habitual das fontes superficiais. Existem diversos exemplos no mundo de esgotamento de aquíferos por superexploração para uso em irrigação (CEPIS, 2000).

Segundo o Censo de 2000 (IBGE, 2003), aproximadamente 61 % da população brasileira é abastecida, para fins domésticos, com água subterrânea, sendo que 6% se autoabastece das águas de poços rasos, 12% de nascentes ou fontes e 43% de poços profundos.

Nos estados mais desenvolvidos da Federação, entre 70 e 90% das cidades e 95% das indústrias já vem sendo abastecidas por poços (Freire *et al.*, 1998). Cerca de 90% das cidades do Paraná e Rio Grande do Sul são abastecidas por águas subterrâneas (Tucci & Cabral, 2003). Segundo Leal (1999), os estados com maior número de poços são: São Paulo (40 mil), Bahia, Rio Grande do Sul, Ceará e Piauí. No Rio Grande do Sul o total de poços é estimado em 30 mil, sendo 11.750 já cadastrados no SIAGAS (Cardoso et al, 2008).

Assim, as águas subterrâneas são as principais fontes disponíveis para o abastecimento de água doce. Devido à escassez do recurso hídrico superficial, o recurso subterrâneo é uma reserva vital, sendo de fundamental importância o desenvolvimento de modelos que simu-

lem situações reais para possibilitar o planejamento e a gestão desses recursos , incluindo sua proteção e descontaminação (Lourencetti, 2006; CETESB, 2004).

### 3.2 RECARGAS E RESERVAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

A conexão entre o regime de recarga e descarga da água subterrânea em uma região e os demais componentes do fluxo hidrológico influencia diretamente na vazão dos cursos d'água (Dewandel et al., 2002; Costa, 2005; Mourão, 2007).

Embora os diversos caminhos percorridos pela água até a calha do rio não sejam totalmente separáveis, é prática comum distinguir entre pelo menos dois componentes: escoamento direto (superficial) e indireto (origem subterrânea) (Collischonn & Tassi, 2010). A parcela de origem subterrânea da vazão de um rio é de grande interesse já que tal parcela corresponde à capacidade de recarga do aquífero.

A avaliação da recarga aquífera é um dos fatores determinantes dos estudos de caracterização hidrogeológica e de gerenciamento das explorações de água subterrânea. A recarga subterrânea é resultante de um processo dinâmico da água que atinge a zona não saturada sob forças gravitacionais, ou em uma direção específica por condicionamento hidráulico. A recarga subterrânea pode ser definida de forma geral como a quantidade de água que contribui para aumentar a reserva subterrânea, permanente ou temporária de um aquífero (Bertol et al, 2006; Vasconcelos, 2005).

Os conceitos de reservas permanente e renovável definidos por Costa (1998) são adotados neste estudo:

**Reserva Permanente:** volume hídrico acumulado no meio aquífero, em função da porosidade eficaz e do coeficiente de armazenamento, não variável em decorrência da flutuação sazonal da superfície potenciométrica.

**Reserva Renovável, ou reguladora (ou ainda Recarga Aquífera):** volume hídrico acumulado no meio aquífero, em função da porosidade eficaz ou do coeficiente de armazenamento, variável anualmente em decorrência dos aportes sazonais de água superficial, do escoamento subterrâneo e dos exutórios.

**Potencialidade:** volume hídrico que pode ser utilizado anualmente, incluindo, eventualmente, uma parcela das reservas permanentes, passíveis de serem exploradas, com descarga constante, durante um determinado período de tempo.

**Disponibilidade Virtual:** parcela máxima que pode ser aproveitada anualmente da potencialidade, correspondendo à vazão anual que pode ser extraída do aquífero ou do sistema aquífero, sem que se produza um efeito indesejável de qualquer ordem.

**Disponibilidade Instalada:** volume hídrico capaz de ser extraído pela operação plena de todos os poços instalados.

A parcela utilizável das reservas permanentes, além das reservas renováveis e sem prejuízo ao aquífero, é estimada entre 10 e 30% ao longo de 50 anos. (Costa,1998). Embora 30% impliquem em um valor insignificante, 0,6% ao ano, o mesmo autor recomenda a adoção de 10%, como margem de segurança.

Ainda, segundo Costa (1998), quando inexistirem estudos específicos que imponham restrições à exploração, a disponibilidade virtual poderá ser considerada como igual à potencialidade.

A determinação de um volume hídrico que possa ser extraído do aquífero ou do sistema aquífero, sem que se produza algum efeito indesejável de qualquer ordem, depende das características locais e de estudos específicos focados nos mais diversos interesses. Logo, não há uma regra geral e as estimativas de tais valores podem ser bastante subjetivas e controversas.

A Agência Nacional de Águas (ANA) na sua publicação “Disponibilidades e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil”, 2005, embora admita a possibilidade de utilização de uma pequena fração das reservas permanentes, adota um valor explorável de 20% das reservas reguladoras. Essa estimativa, segundo a ANA, pode ser considerada conservadora, mas oferece uma boa margem de confiança regional e é também satisfatória do ponto de vista de manutenção da vazão dos rios, pois permite que apenas 20% do fluxo de base sejam afetados pela extração de água subterrânea. Ainda, este percentual proposto se trata de um valor inicial que pode vir a ser maior ou menor dependendo do nível de conhecimento sobre a área considerada.

Neste estudo serão avaliadas as reservas renováveis e apresentados dados de disponibilidade instalada de cada bacia.

### 3.3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE RECARGAS

Segundo Borghetti et al (2004), dois tipos de recarga podem ser distinguidos, recarga direta e indireta. Sendo:

**Recarga direta:** as águas de precipitação se infiltram diretamente no aquífero através de suas áreas de afloramento e fissuras de rochas subjacentes. Desta forma, a recarga sempre é direta nos aquíferos livres, ocorrendo em toda a superfície acima da zona saturada.

**Recarga indireta:** resulta da percolação até o aquífero advindas do escoamento superficial, a partir dos leitos de curso d'água existentes na superfície do terreno, lagos e das fontes de infiltração introduzidas pelo homem através de atividades de irrigação e urbanização. A recarga indireta é resultado também da existência de conexão entre aquíferos que proporcionam a migração e misturas de águas entre aquíferos.

Embora este trabalho enfoque na estimativa de recarga aquífera através da separação de escoamento (utilizando filtros numéricos), existem vários outros métodos para a estimativa de recarga aquífera, como o método de balanço hídrico, variações de nível de água, uso de isótopos, entre outros.

**Variação de nível de água:** O método da variação do nível da água (VNA) se baseia na premissa de que o aumento do nível de água é causado pela chegada da recarga à zona saturada do aquífero (Wahnfreid & Hirata 2005).

A medição sistemática da variação do nível da água é realizada em poços de monitoramento. A diferença entre o nível mais elevado e o mais baixo da superfície potenciométrica corresponde à recarga. Os melhores resultados são obtidos em áreas com nível d'água rasos, possibilitando rápidas elevações com a precipitação, já que níveis profundos tendem a não terem uma grande variação. A acuidade das medidas é de grande importância, pois a lâmina da água precipitada em cada evento compreende às vezes algumas dezenas de milímetros e seu efeito sobre o nível da água é pequeno (Wahnfried & Hirata 2005).

A maior vantagem da avaliação da recarga por VNA é a sua simplicidade. Por outro lado é necessário atentar para diversos fenômenos relacionados às alterações naturais (clima) e às

atividades antrópicas (ocupação e uso do solo) que ao longo de décadas causam a oscilação do nível da água ao longo do tempo (Wahnfried & Hirata, 2005). Além disso, no Brasil em geral, é difícil a existência de dados confiáveis, consistentes e continuados do monitoramento de níveis de água em poços.

**Balanço Hídrico:** O balanço hídrico considera o solo como um reservatório delimitado pela região da zona de raízes, suprido pelas precipitações e com volumes máximos dados pela capacidade de campo (teor de água presente no solo apto de ser utilizado pela planta). A remoção de água contida nesse reservatório se faz pela evaporação direta e transpiração vegetal, através da absorção radicular. Durante os períodos em que o solo se encontra na capacidade de campo, os excedentes de infiltração podem percolar profundamente, vindo a transformar-se em recarga, e os excedentes superficiais podem escoar diretamente para a rede de drenagem fluvial (Bertol et al, 2006).

O balanço hídrico inclui um grupo de métodos estimativos, cujo princípio é que os outros fluxos podem ser medidos ou estimados mais facilmente do que a própria recarga, que constitui no residual de todos os outros fluxos. Os componentes do balanço hídrico precipitação, evapotranspiração, temperatura, entre outros, podem ser medidos *in situ* ou estimados de forma indireta. Habitualmente, a precipitação e a temperatura são medidas de forma direta, os outros componentes são estimados através de fórmulas semiempíricas, tais como a evapotranspiração potencial e real. Tais balanços são normalmente realizados com periodicidade, por exemplo, diária ou mensal (Samper, 1998; Bertol, 2007).

**Traçadores (isótopos):** Nas pesquisas hidrogeológicas os isótopos estáveis e radioativos são muito utilizados. Isótopos estáveis, como o oxigênio ( $^{18}\text{O}$ ), o deutério ( $^2\text{H}$ ) e o carbono 13 ( $^{13}\text{C}$ ), caracterizam-se por ocorrerem em quantidade definida na natureza. Os mesmos são utilizados como traçadores naturais nos estudos de origem das águas e sistemas de fluxo subterrâneo. Os isótopos radioativos, como o trítio ( $^3\text{H}$ ) e o carbono ( $^{14}\text{C}$ ), sofrem decaimento radioativo, estando em franco processo de diminuição da quantidade. São muito utilizados em questões relacionadas com a dinâmica dos sistemas de fluxo subterrâneo e permitem obter a datação de águas subterrâneas (Feitosa 2000). Segundo Drumond et al., 2005 (apud Bertol, 2006) a técnica de aplicação de traçador radioativo artificial ( $^3\text{H}$ ) foi empregada pela primeira vez na Alemanha por Zimmermann et al. (1967), e os pioneiros na aplicação dessa técnica no Brasil foram Araguás-Araguás et al. (1995), que realizaram no período de dois anos (1989 a 1991) um experimento na Reserva Florestal Ducke, situa-

da na região central da Amazônia, a 35 km de Manaus. Nesse trabalho, o objetivo foi o estudo do balanço de água no solo e o regime de infiltração em um clima tropical úmido, além de verificar as alterações provocadas pela substituição das matas, por pastos, nos processos de infiltração e evapotranspiração. Segundo Minardi et al. (2004), a técnica de traçadores que utiliza o trítio artificial ( $^3\text{H}$ ), consiste na aspersão de uma dada parcela do terreno com água tritiada, com atividade calculada em função de fatores como umidade natural do terreno (estimada), tempo de duração do experimento, limite de detecção do equipamento de contagem radioativa, aspectos de proteção radiológica e segurança do público em geral e do meio ambiente. Em seguida, é aspergida uma certa quantidade de água comum para forçar a penetração inicial do traçador, simulando assim uma primeira chuva sobre a área. De tempos em tempos são coletadas amostras de solo, através de furos de sondagens, as quais são submetidas a análise para a determinação da umidade residual e, em consequência, do teor de trítio contido na água. O deslocamento vertical contido do pico de concentração de traçador fornece a taxa de infiltração da água no subsolo (Bertol., 2007)

### 3.4 SEPARAÇÃO DE ESCOAMENTO E FILTROS NUMÉRICOS

A análise das vazões em uma bacia, ao longo do tempo, permite a obtenção de dados importantes. Hidrogramas observados em postos fluviométricos podem ser analisados com o objetivo de identificar as parcelas direta e indireta do escoamento. Esta análise é baseada em métodos de separação de escoamento (Collischonn & Tassi, 2010).

Um método muito comum utilizado atualmente envolve filtros digitais (ou numéricos), ou seja, algoritmos numéricos para calcular a separação.

Os filtros numéricos utilizam apenas dados já existentes (séries históricas de vazão), provenientes de estações fluviométricas espalhadas pelo território nacional e disponibilizados livremente no Brasil pela ANA através do Hidroweb, o que contribui para a aplicabilidade imediata e custo reduzido (quando comparado a outros métodos). Além disso, os filtros numéricos são automatizáveis, apresentando resultados confiáveis e reproduzíveis, acarretando em praticidade.



Há também vários métodos gráficos para a análise de hidrogramas, entretanto a subjetividade desses procedimentos pode gerar resultados inconsistentes (Chow et al, 1988). Mais comuns, no entanto, são os métodos de separação com filtros digitais.

Esses métodos são de fácil aplicação, utilizam apenas dados de vazão para estimar o escoamento base, e tem demonstrado bons resultados quando comparados a outras técnicas, Arnold & Allen (1999) e Larocque et al.(2010). Vários modelos foram propostos nas últimas décadas. Algumas das contribuições mais importantes foram feitas por Eckardt (2005), que propôs uma forma geral e demonstrou que alguns dos outros modelos propostos são casos específicos desse modelo (Collischon & Fan, 2012). O modelo inicialmente proposto por Eckhardt utiliza dois fatores, sendo um deles o BFI<sub>max</sub>, indicador máximo de escoamento de base depende de valores previamente determinados, baseado em características geológicas predominantes. Collischon & Fan (2012) propuseram um método de estimativa do BFI<sub>max</sub> inteiramente baseado em dados de vazão através da aplicação de um filtro recursivo, utilizando um parâmetro de recessão previamente calculado. Este método apresenta resultados mais confiáveis de BFI<sub>max</sub>.

## 4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 4.1 HIDROGRAFIA

#### 4.1.1 Regiões Hidrográficas

As quatro bacias estudadas, dos rios Caverá, Comandaí, Conceição e Jaguarzinho, pertencem à região hidrográfica do rio Uruguai.

A região hidrográfica do rio Uruguai, apresentada na Figura 1 conforme a Divisão Hidrográfica Nacional (Resolução Conselho Nacional de Recursos Hídricos, CNRH n.º 32/2003, base do Plano Nacional de Recursos Hídricos, PNRH), corresponde à projeção da Bacia em território nacional, e possui 73% de sua área no Rio Grande do Sul e 27% em Santa Catarina. Essa região compreende 2% do território nacional (174.412,0 km<sup>2</sup>) e abriga 2,3% da população brasileira. (MMA, 2006).

**Figura 1.** Divisão Hidrográfica Nacional (Resolução No. 32 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos)



Fonte: ANA, 2005.

Após a confluência de seus formadores, o rio Uruguai escoar no sentido leste-oeste e serve como divisa entre os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Em seu trajeto inicial seus afluentes mais significativos são os rios do Peixe, Irani, Chapecó e Antas (pelo lado catarinense) e ainda dos rios Apuaê (ou Ligeiro), Inhandava (ou Forquilha), Passo Fundo, da Várzea e Guarita (pelo lado gaúcho). Ao receber as águas do rio Peperi-Guaçu, rumo no sentido do sudoeste, passando a seu trecho fronteiro internacional. Pelo lado brasileiro os afluentes mais importantes são Turvo, Santa Rosa, Santo Cristo, Ijuí, Icamaquã, Piratini, Butuí e Ibicuí. Após a contribuição do rio Quaraí, o rio Uruguai deixa o território brasileiro e dirige-se ao sul, passando a dividir a Argentina e o Uruguai, até sua foz. (MMA, 2006).

Ainda, a região é conceitualmente dividida em quatro (4) Sub-bacias de Nível 1:

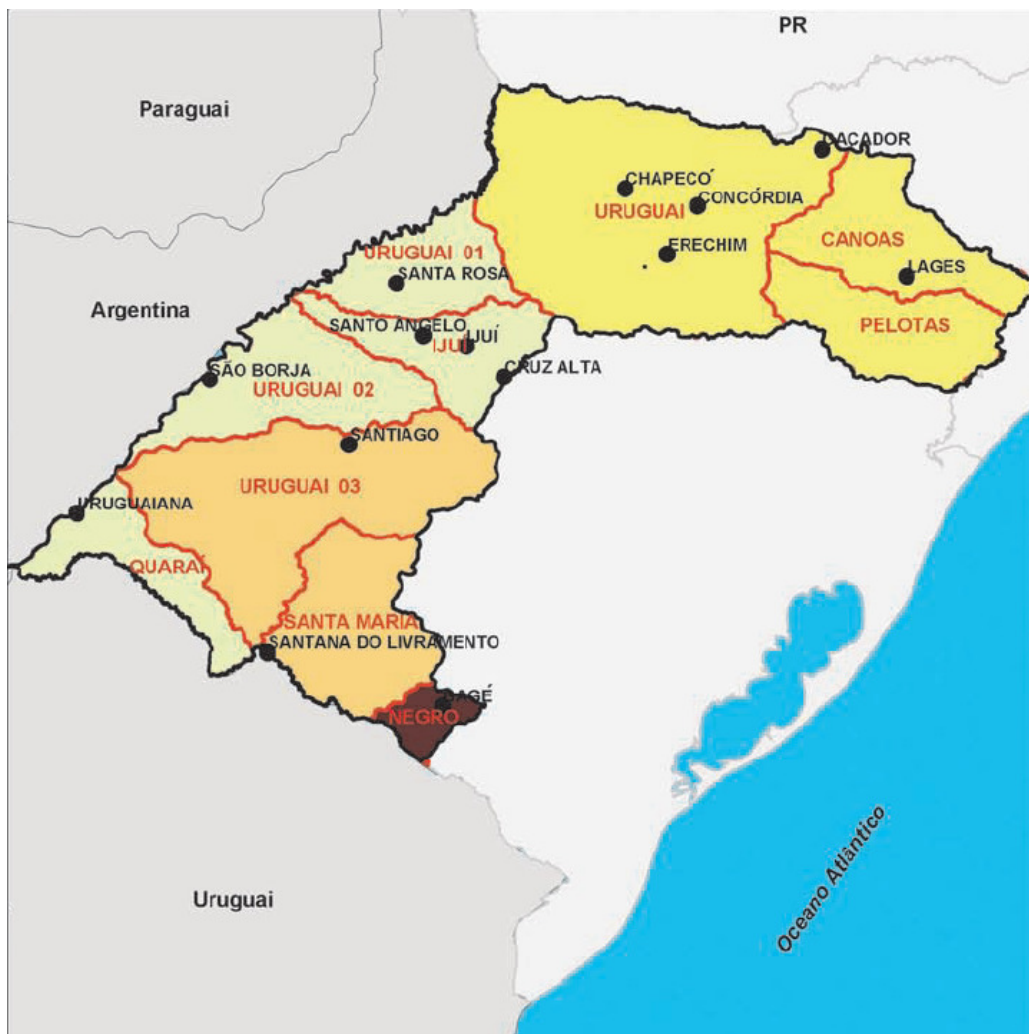
- Rio Uruguai Trecho Alto;
- Rio Uruguai Trecho Médio;
- Rio Ibicuí;
- Rio Negro.

Estas Sub-bacias de Nível 1, por sua vez, são conceitualmente sub-divididas em dez (10) unidades denominadas de Nível 2, segundo MMA, 2006. (Vide Figura 2)

Conforme esta divisão as bacias estudadas estão localizadas da seguinte maneira:

- Rio Caverá: Rio Ibicuí (Nível 1), *Uruguai 03 (Nível 2)*;
- Rio Comandá: Rio Uruguai Trecho Médio (Nível 1), *Uruguai 01 (Nível 2)*;
- Rio Conceição: Rio Uruguai Trecho Médio (Nível 1), *Ijuí (Nível 2)*;
- Rio Jaguarzinho: Rio Ibicuí (Nível 1), *Uruguai 03 (Nível 2)*.

**Figura 2.** Subdivisões da Bacia do rio Uruguai segundo o PNRH



Fonte: MMA, 2006.

Nos casos dessas quatro bacias, essa divisão coincide com aquela utilizada no Sistema Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul (Lei 10.350/94). No entanto, a nomenclatura diverge. Embora este estudo adote a nomenclatura preconizada pelo PNRH, a divisão vigente no âmbito estadual, é citada aqui, para as quatro bacias de interesse:

- Rio Caverá: U050 (Ibicuí);
- Rio Comandá: U030 (Turvo e outros);
- Rio Conceição: U090 (Ijuí);
- Rio Jaguarzinho: U050 (Ibicuí).



São rios como: Ibicuí-Mirim, Toropi, Jaguari, Miracatu e Itu (pela margem direita); e Ibirapuitã, Inhanduí e Ibirocaí (pela margem esquerda). A Bacia apresenta alguns conflitos entre irrigação e abastecimento público, principalmente em ocasiões de estiagem extrema (MMA, 2006).

O rio Caverá é afluente do rio Ibirapuitã (margem esquerda do Ibicuí), enquanto o rio Jaguarzinho contribui para o rio Jaguari (margem direita do Ibicuí).

#### 4.1.2.2 Unidade Uruguai 01 (Sub-bacia Rio Uruguai Trecho Médio)

A Sub-bacia Uruguai 01 é conhecida como a Bacia dos rios Turvo, Santa Rosa e Santo Cristo. Em verdade, trata-se de um conjunto de Bacias contíguas de sete afluentes do rio Uruguai: Turvo, Lajeado Grande, Buricá, Santa Rosa, Santo Cristo, Amandaú e Comandai. A Bacia ocupa uma área de 10.810 km<sup>2</sup>, com uso do solo destinado a cultura da soja, em rotação com milho e outras culturas relacionadas a esta: feijão, trigo, aveia etc. Outro uso da água que se reveste de importância é a suinocultura, com forte potencial de poluição de mananciais, inclusive os utilizados para abastecimento público. Na Bacia destaca-se o Parque Estadual do Turvo, no extremo norte da mesma, onde se encontram as cachoeiras do Yucumã que marcam a divisa entre o trecho alto e médio do rio Uruguai (MMA, 2006).

#### 4.1.2.3 Unidade Ijuí (Sub-bacia Rio Uruguai Trecho Médio)

A Bacia Hidrográfica do Rio Ijuí possui área de 10.849 km<sup>2</sup>. Seu rio principal, de mesmo nome, caracteriza-se por um extremo potencial hidrelétrico. O uso do solo também é marcado pela cultura de soja, de forma análoga a Bacia anterior, porém com maior utilização de irrigação por pivô central. (MMA, 2006)

O rio Conceição é afluente do rio Ijuí.

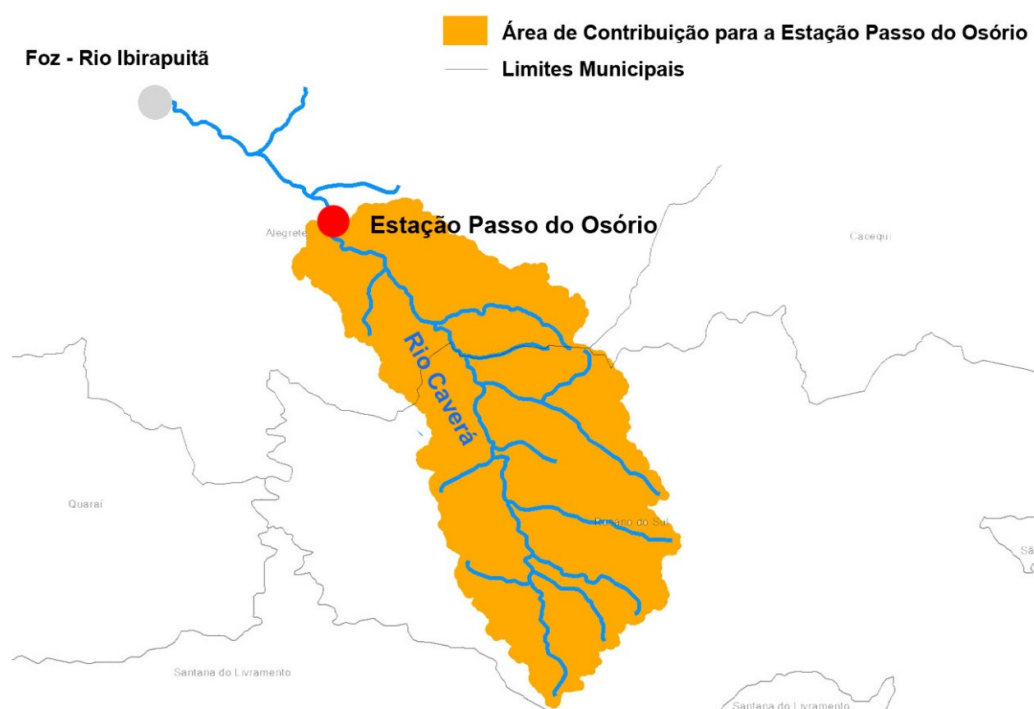
### 4.1.3 Áreas de estudo

#### 4.1.3.1 Caverá

O rio, ou arroio, Caverá é afluente do rio Ibirapuitã e se estende pelos municípios de Alegrete e Rosário do Sul, fluindo de sudeste para noroeste, sendo que seus principais contribuintes são os arroios Touro Passo e Queromana.

Em seu trajeto total o rio Caverá percorre mais de 100 km, sendo que o trecho de estudo, à montante da estação fluviométrica de referência (Passo do Osório), tem um comprimento aproximado de 75 km e drena uma área de 1165 km<sup>2</sup> (que corresponde a aproximadamente 75% da área total da bacia). (Vide Figura 4)

**Figura 4.** Bacia do Rio Caverá



O rio Caverá nasce a cerca de 300 m de altitude e encontra o rio Ibirapuitã a uma cota de 80 m, sendo que a estação Passo do Osório tem cota de 100 m. Assim, a declividade média do rio no trecho estudado é de aproximadamente 2,7 m/km.

#### 4.1.3.2 Comandaí

O rio Comandaí é afluente direto do rio Uruguai (vide Figura 5). Sua nascente está localizada no município de Giruá, e sua área de contribuição inclui outros quinze municípios: Cândido Godói, Santo Ângelo, Catuípe, Sete de Setembro, Guarani das Missões, Senador Salgado Filho, Ubiretama, Cerro Largo, Campina das Missões, Salvador das Missões, São Pedro do Butiá, Roque Gonzales, São Paulo das Missões, Porto Xavier, Porto Lucena.

**Figura 5.** Bacia do Rio Comandaí



A área de contribuição para o trecho estudado abrange os primeiros nove municípios citados, num trajeto de aproximadamente 100 km, sendo que o percurso total do rio Comandaí é de cerca de 170 km. A nascente está a uma altitude aproximada de 400 m, a foz a 90 m, e a estação fluviométrica Passo São João a 170 m. A declividade média do trecho estudado é de 2,3 m/km.

A área de drenagem da área de estudo é da ordem de 827 km<sup>2</sup>, cerca de 60% da área total da bacia.

#### 4.1.3.3 Conceição

O rio Conceição contribui para o rio Ijuí no município de Coronel Barros (vide Figura 6). Sua bacia inclui ainda parte dos municípios de Augusto Pestana, Ijuí e Cruz alta. Seu percurso total é de cerca de 90 km. O trecho de estudo à montante da estação fluviométrica Conceição se estende por cerca 65 km e recebe a contribuição de uma área de aproximadamente 808 km<sup>2</sup> (cerca de 75% da área total da bacia).



**Figura 6.** Bacia do rio Conceição



O rio Conceição nasce a cerca de 390 m de altitude e encontra o rio Ijuí a uma cota de 220 m, sendo que a estação Conceição tem cota de 280 m. Assim, a declividade média do rio no trecho estudado é de aproximadamente 1,7 m/km, sendo a menor entre os quatro rios apresentados neste estudo.

#### 4.1.3.4 Jaguarzinho

Assim como o rio Caverá, o rio Jaguarzinho é afluente indireto do rio Ibicuí (vide Figura 7), porém pela margem direita (norte) desse rio.

Em seu trajeto total o Jaguarzinho percorre mais de 90 km, sendo que o trecho de estudo, a montante da estação fluviométrica de referência (Ernesto Alves), tem um comprimento aproximado de 70 km e drena uma área de 922 km<sup>2</sup> (que corresponde a aproximadamente 75% da área total da bacia). A sua bacia está concentrada no município de Santiago, mas também ocupa parte dos municípios de Jaguari e Nova Esperança.

**Figura 7.** Bacia do rio Jaguarizinho



O Jaguarizinho nasce a cerca de 380 m de altitude e encontra o rio Jaguari a uma cota de 90 m, sendo que a estação Ernesto Alves tem cota de 130 m. Assim, a declividade média do rio no trecho estudado é de aproximadamente 3,5 m/km, a maior entre os rios estudados.

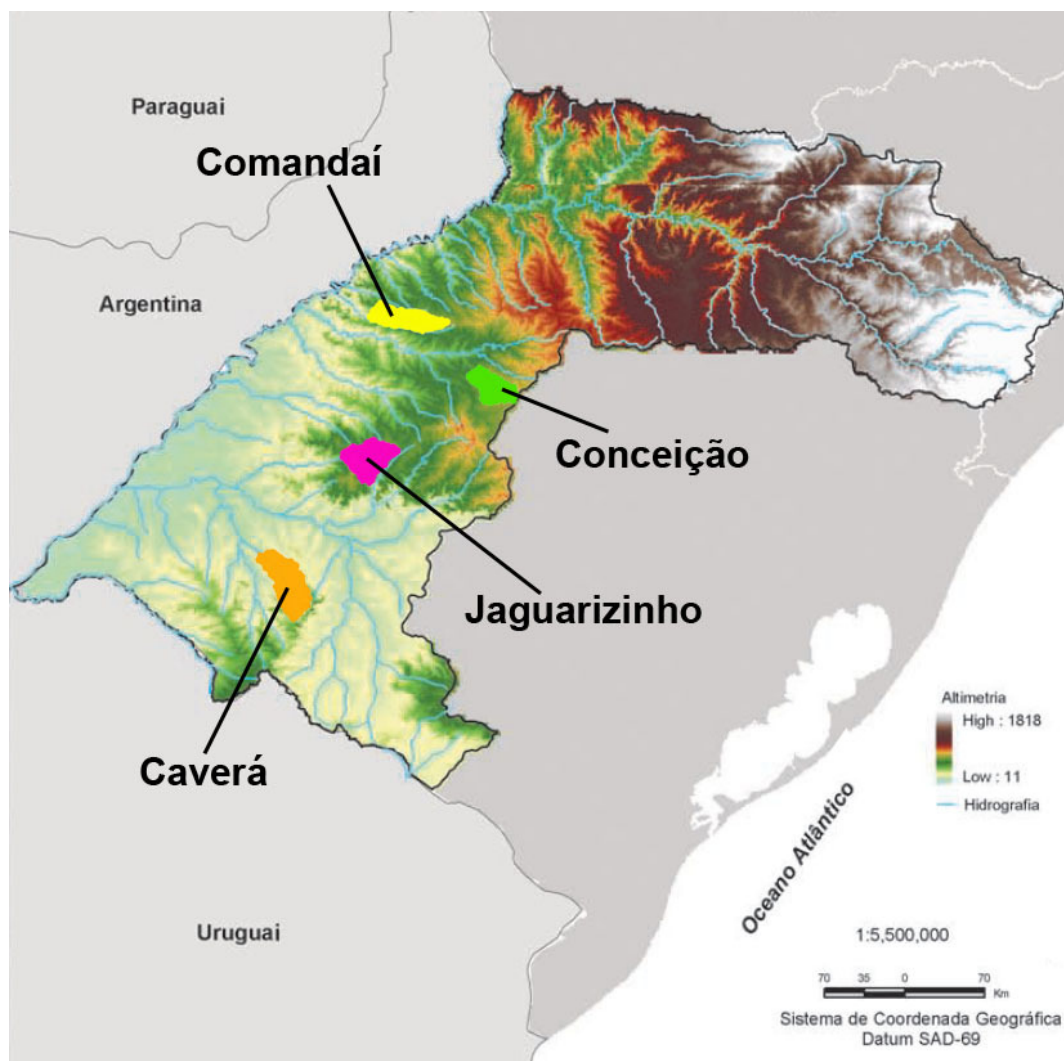
## 4.2 GEOMORFOLOGIA

Segundo FGV (1998), a compartimentação geomorfológica da Região Hidrográfica do Uruguai está diretamente relacionada à distribuição das unidades litoestratigráficas e à evolução geotectônica que condicionam a distribuição da drenagem superficial.

A maior parte da bacia do rio Uruguai está situada no extremo sul do Planalto Meridional, região de antigas bacias sedimentares apresentando altitudes superiores aos 200 m. As rochas sedimentares são cobertas por espessas camadas de rochas basálticas. As elevações, superiores aos mil metros no extremo leste, decaem continuamente em direção ao oeste, e de maneira mais abrupta em direção ao sul, ao longo de praticamente toda porção média do estado, conforme ilustrado na Figura 8. Essa faixa de terras relativamente baixas, planas ou

levemente onduladas, que ocupa boa parte da porção central do estado compõe a Depressão Periférica. As depressões se estabelecem nas regiões de contato entre estruturas sedimentares e cristalinas (Ross, 2003).

**Figura 8.** Relevo da Bacia Hidrográfica do rio Uruguai e localização das bacias estudadas



Fonte: Modificado de MMA (2006).

### 4.3 GEOLOGIA REGIONAL

Espessas camadas de rochas basálticas e ácidas, oriundas de sucessivos derrames vulcânicos, compõe a Formação Serra Geral, que ocupa praticamente toda a bacia do rio Uruguai. Ainda, apresenta intercalações com lentes e camadas arenosas (ANA, 2005). Tais variabilidades influenciam na permeabilidade associada às estruturas tectônicas (fraturas) e diá-

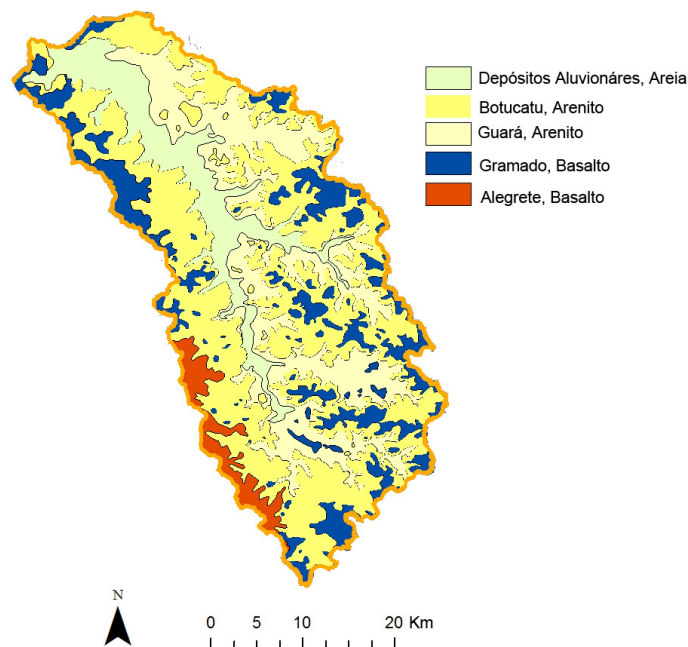
claus (fendas) de esfriamento horizontais e verticais, que implicam na incidência de zonas de elevada permeabilidade. Os efeitos tectônicos mais expressivos são representados por grandes falhamentos, configurando zonas de maior intensidade de porosidade e permeabilidade, principalmente no terço superior da Bacia. A permeabilidade dessa formação depende do tipo, da orientação, do comprimento, da conexão e da densidade de fraturas.

A Formação Serra Geral ocorre recobrimdo outras Formações sedimentares, que afloram na região periférica. Essas formações sedimentares são constituídas por arenitos, siltitos e argilitos (litologias principais) concentrados na região da Depressão Central. Entre as formações mais importantes está a Formação Botucatu que apresenta rochas com permeabilidade intergranular. No entanto, em camadas mais próximas às rochas ígneas, registram-se silicificações que contribuem para reduzir a permeabilidade dos arenitos (ANA, 2005).

#### 4.3.1 Bacia do rio Caverá

A bacia do rio Caverá está composta, majoritariamente por arenitos da Formação Botucatu e Guará, sendo que as porções mais baixas do terreno, junto ao rio Caverá e seus afluentes, predominam os depósitos aluvionares. Ainda, em menor quantidade ocorrem afloramentos basálticos, conforme demonstrado na Figura 9.

**Figura 9.** Geologia da bacia do rio Caverá.



Os arenitos da Formação Botucatu, abrangem a maior parte da bacia e são caracterizados por arenitos finos e arenitos quartzosos. Já as rochas sedimentares da Formação Guará ocorrem nas porções menos elevadas, próximo dos depósitos aluvionares e estão representadas por arenitos e conglomerados oligomíticos. Os conglomerados são excelentes marcadores da energia do depósito sedimentar aonde foram formados, pois o tamanho e arredondamento dos clastos variam conforme a energia. (Gianinni, in Teixeira et al, 2000).

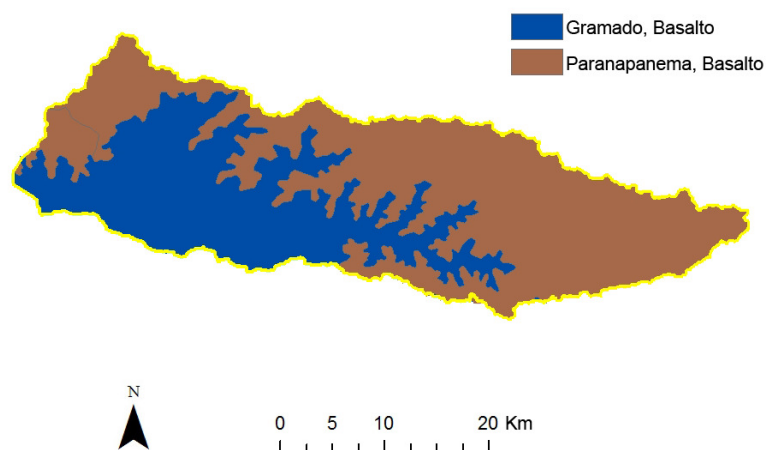
Os depósitos aluvionares são compostos principalmente por areia, mas também há ocorrência de argila, silte e cascalho.

As rochas vulcânicas da Formação Serra Geral estão representadas pelas unidades Gramado e Alegrete. Essas rochas apresentam porosidade por faturamento e estão associadas a solos de textura predominantemente argilosa.

#### 4.3.2 Bacia do rio Comandaí

A bacia do rio Comandaí está completamente inserida na Formação Serra Geral, e é composta exclusivamente por basaltos pertencentes as unidades Gramado e Parapanema (vide Figura 10). Essas rochas apresentam um grau de fraturamento elevado.

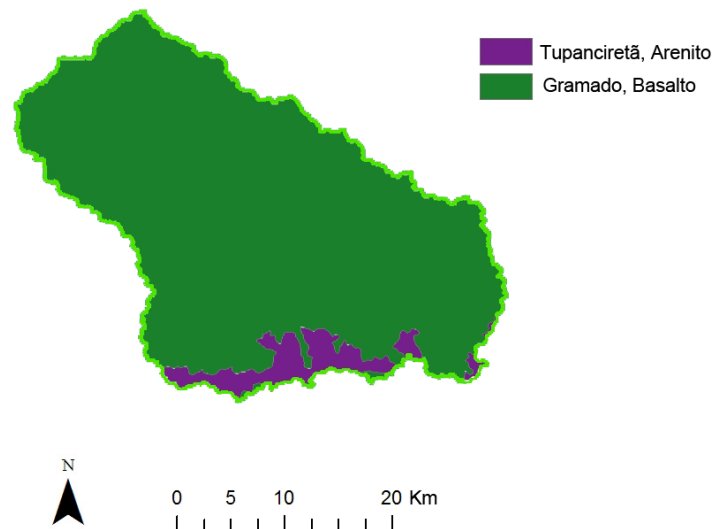
**Figura 10.** Geologia da bacia do rio Comandaí.



### 4.3.3 Bacia do rio Conceição

Na bacia do rio Conceição há ocorrência de rochas ígneas vulcânicas, da Formação Serra Geral, e sedimentares, da Formação Tupanciretã (vide Figura 11). A Formação Serra Geral é composta majoritariamente por rochas basálticas que estão intensamente fraturadas e pertencem à unidade Gramado.

**Figura 11.** Geologia da bacia do rio Conceição.

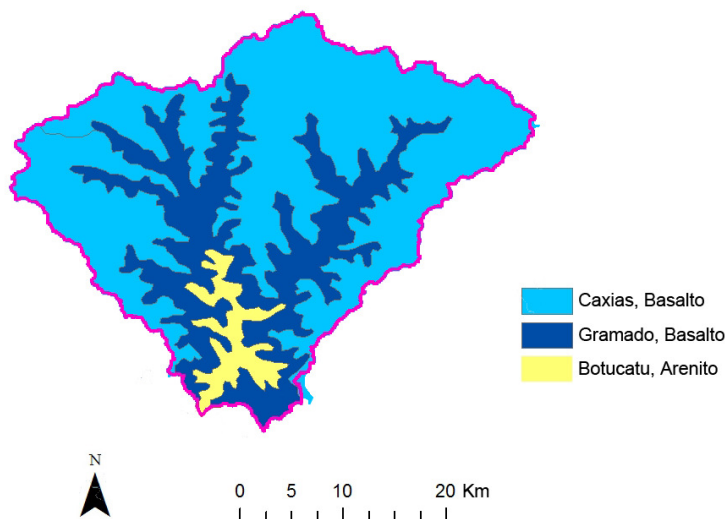


A Formação Tupanciretã envolve arenitos e conglomerados, com intercalações de argila e seixos de basalto que aparecem ao sul. Existem indícios de que tais rochas sejam arenitos intertrápicos, que ocorrem de modo extensivo em função da erosão de derrames sobrepostos, constituindo litologias de elevada permeabilidade intergranular. (MMA, 2006).

### 4.3.4 Bacia do rio Jaguarzinho

A bacia do rio Jaguarzinho está inserida na Formação Serra Geral, e é composta majoritariamente por rochas ígneas vulcânicas, que apresentam permeabilidade por fraturas. Nas porções altas da bacia predomina a ocorrência de rochas do tipo riodacito e quartzo latito pertencentes à unidade Caxias. Outra porção significativa é composta por basaltos da unidade Gramado. Nas porções mais baixas do terreno, junto aos talvegues, ocorrem arenitos da Formação Botucatu que apresentam porosidade intergranular. Estas informações são observadas na Figura 12.

**Figura 12.** Geologia da bacia do rio Jaguarizinho.



#### 4.4 HIDROGEOLOGIA

O Sistema Aquífero Serra Geral é constituído por aquíferos fraturados que ocorrem associados às rochas ígneas vulcânicas (basaltos, riodacitos). As áreas mais produtivas do sistema Serra Geral estão condicionadas a fraturamentos e zonas vesiculares resultantes do resfriamento dos derrames basálticos. A deformação rúptil afetou posteriormente essas estruturas primárias, gerando fraturas que ampliaram as possibilidades de armazenamento e circulação de água (ANA, 2005).

Segundo FEPAM (2003) as características litológicas e estruturais do Sistema Aquífero Serra Geral o distinguem dos demais aquíferos fraturados que ocorrem associados às rochas cristalinas como os granitóides e gnaisses. Os principais diferenciais são as zonas vesiculares e amigdaloidais de topo de derrame e zonas de disjunção horizontal, que quando interceptadas por fraturamentos, interconectam-se podendo armazenar grandes volumes de água subterrânea. Os mecanismos de recarga do aquífero Serra Geral se dão preferencialmente por dois condicionamentos distintos: infiltração de águas pluviais a partir de rupturas regionais cobertas por manto de alteração e solo; e infiltração de água armazenada nas coberturas sedimentares pós-basálticas (caso de regiões cobertas pela Formação Tupanciretã).

Os principais aquíferos deste sistema são o Serra Geral I e Serra Geral II.

Embora aquíferos com porosidade por fraturas tenham tendência de média à baixa produtividade o sistema aquífero Serra Geral I representa uma exceção, em virtude da elevada

densidade de fraturas, e conseguintes altas capacidades específicas apresentadas (Kirchheim & Agra, 2011).

Este aquífero apresenta uma grande importância hidrogeológica na Região Hidrográfica do Uruguai, decorrente da elevada explotabilidade das suas zonas aquíferas. As águas subterrâneas são exploradas através de poços tubulares e captações de fontes, com vazões variando entre 1 e 220m<sup>3</sup>/h, sendo usadas para consumo humano, industrial, pastoril e também para balneabilidade (MMA,2006).

O Serra Geral II é um aquífero considerado como de média a baixa possibilidade para águas subterrâneas, por apresentar menor densidade fissural.

Sotoposto às rochas basálticas da Formação Serra Geral ocorre um pacote de rochas arenosas, denominado Sistema Aquífero Guarani (SAG). No Rio Grande do Sul, o SAG é constituído por rochas das Formações Botucatu e Guará, do Grupo Rosário do Sul (Formações Caturrita, Santa Maria, Sanga do Cabral) e da Formação Pirambóia. São aquíferos granulares porosos, que compreendem sedimentos não consolidados (depósitos aluviais de rios de grande porte, por exemplo) constituídos basicamente por areia e argila, rochas sedimentares porosas e permeáveis (arenitos, por exemplo) depositadas nas Bacias sedimentares brasileiras, como a Bacia do Paraná (MMA, 2006).

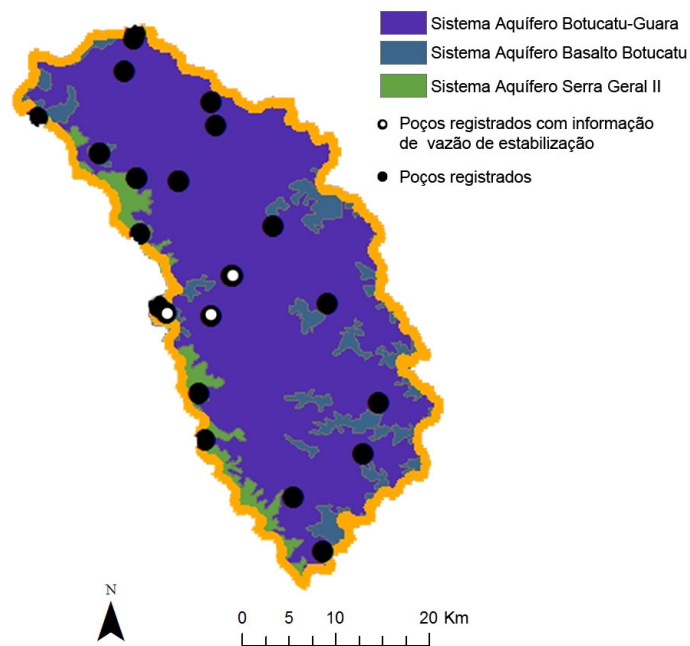
A Formação Botucatu ocorre de modo expressivo e contínuo nos afluentes do curso médio do rio Ibicuí. Essa unidade é constituída por arenitos finos a médios, podendo localmente evidenciar arenitos argilosos mal selecionados, os quais geraram zonas de permeabilidade por fissuramento. Em algumas regiões registram-se silicificações que contribuem para reduzir a permeabilidade dos arenitos, devido a derrames de lava basáltica sobrepostos a litologias da Formação Botucatu (MMA, 2006).

#### 4.4.1 Rio Caverá

O principal sistema aquífero desta bacia é o Guarani representado pelas unidades hidroestratigráficas Botucatu e Guará I (com média a alta possibilidade para águas subterrâneas, por porosidade intergranular). Nessa região ocorre recarga do Sistema Aquífero Guarani. Aparecem também porções de interação Basalto/Botucatu (praticamente improdutivos), além de porções no aquífero Serra Geral II (com média a baixa possibilidade para águas subterrâneas, por porosidade fissural), ilustrado na Figura 13.



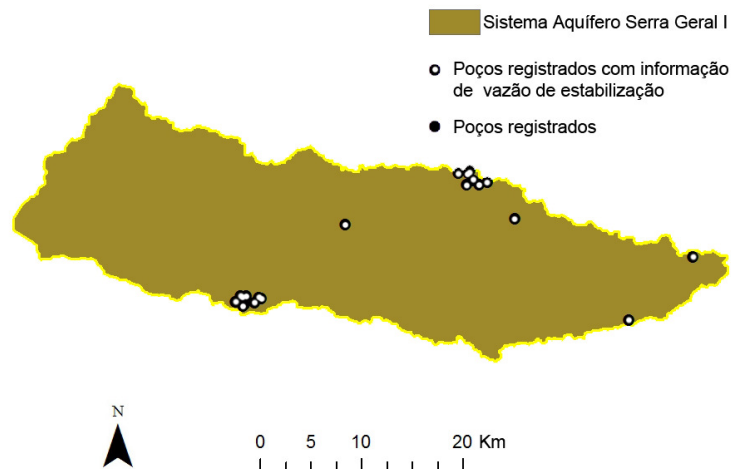
**Figura 13.** Hidrogeologia da bacia do rio Caverá com a localização dos poços identificados na região.



#### 4.4.2 Rio Comandaí

O rio Comandaí está inserido completamente na área do Sistema Aquífero Serra Geral e na unidade Serra Geral I (de alta a média possibilidade para águas subterrâneas em rochas de porosidade por fraturas), ilustrado na Figura 14

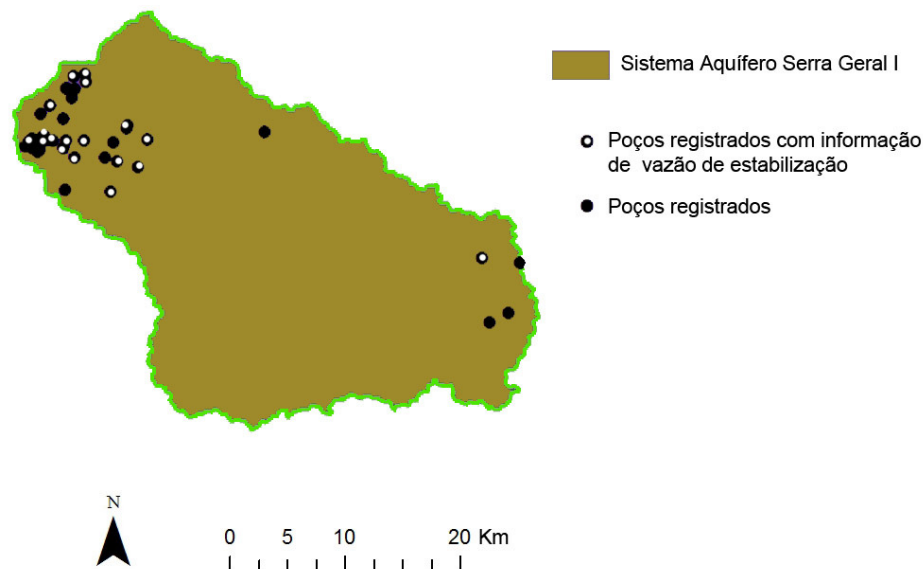
**Figura 14.** Hidrogeologia da bacia do rio Comandaí com a localização dos poços identificados na região.



#### 4.4.3 Rio Conceição

O rio Conceição está inserido completamente na área do Sistema Aquífero Serra Geral e na unidade Serra Geral I (de alta a média possibilidade para águas subterrâneas em rochas de porosidade por fraturas), conforme aparece na Figura 15.

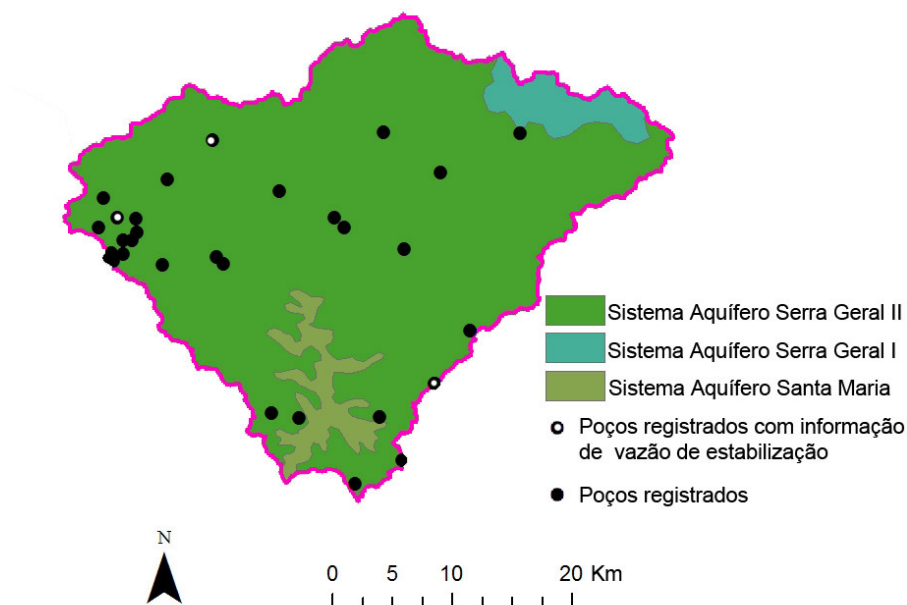
**Figura 15.** Hidrogeologia da bacia do rio Conceição com localização dos poços identificados na bacia.



#### 4.4.4 Rio Jaguarzinho

O rio Jaguarzinho está inserido majoritariamente sobre a área do Sistema Aquífero Serra Geral, unidade Serra Geral II (com média a baixa possibilidade para águas subterrâneas, por porosidade fissural) e Serra Geral I (vide Figura 16). Além disso, há ocorrência do Sistema Aquífero Guarani, numa pequena área, que é representado pelas rochas sedimentares da Formação Botucatu (com média a alta possibilidade para águas subterrâneas, por porosidade intergranular).

**Figura 16.** Hidrogeologia da bacia do rio Jaguarizinho com localização dos poços identificados na bacia.



## 4.5 CLIMA

Segundo o sistema de classificação climática de W. Köppen, o RS encontra-se numa área de clima mesotérmico úmido sem estação seca (Cf), possuindo duas subdivisões, Cfa e Cfb. A maior parte do estado, incluindo todas as bacias estudadas, são classificadas como do tipo Cfa, subtropical com temperatura média do mês mais quente superior a 22° C e a temperatura média do mês mais frio entre - 3° C e 18° C. (Fepam, 2010).

### 4.5.1 Precipitação

O clima da Região Hidrográfica Uruguai é temperado, apresentando uma regular distribuição intra-anual de chuvas, porém com alguma elevação no período de maio a setembro, coincidindo com o inverno. Segundo o DBRPNRH, a precipitação média anual é de 1.784mm, com temperatura média anual variando 16 a 20°C.

Em geral, a Região hidrográfica do Uruguai apresenta regularidade na distribuição de chuvas ao longo do ano, não havendo grandes variações mensais. Esse comportamento é veri-

ficado principalmente nas regiões do Planalto Meridional, com destaque para o norte do estado (região mais chuvosa).

Os rios Comandaí, Conceição e Jaguarizinho estão inseridos nesse contexto e apresentam precipitação acumulada anual média de aproximadamente 1850mm. (Atlas Pluviométrico do Brasil, CPRM, 2012)

Já o rio Caverá encontra-se em uma área de precipitação acumulada anual média de 1550mm, e que apresenta maiores variações, com ocorrência de extremos máximos e mínimos de distribuição irregular ao longo do ano.

#### 4.5.2 Evapotranspiração

A evapotranspiração é fortemente influenciada pela temperatura média mensal, havendo uma correlação clara entre os valores apresentados por essas duas variáveis climáticas. A relação entre os valores médios de precipitação e os de evapotranspiração, serve para caracterizar a deficiência de umidade que ocorre na Campanha Gaúcha, que apresenta, para os meses de dezembro e janeiro, diferenças superiores a 50 mm/mês, sendo janeiro o mês mais crítico (MMA,2006).

O balanço hídrico para as bacias estudadas, considerando que não haja recarga profunda, aponta que para todos os rios a relação evapotranspiração/precipitação é positiva considerando o período anual. Ou seja, a precipitação acumulada anual média é superior a evapotranspiração anual total, conforme a Tabela 1. Além disso, observa-se que, embora a evaporação média seja semelhante em todas as áreas estudadas, a bacia do rio Caverá dispõe de 300 mm de precipitação a menos em relação às demais bacias.

Cabe salientar também que, para a bacia do rio Caverá, em alguns períodos do ano a relação evapotranspiração/precipitação é desfavorável devido à irregularidade da distribuição de precipitação e a variação da intensidade da evapotranspiração, sendo necessária a retirada de água do lençol freático.

Segundo a FGV (1998), o “Levantamento e Avaliação de Recursos Naturais, Socioeconômicos e Institucionais do Rio Grande do Sul” (INCRA, 1973), apresenta um balanço hídrico para os solos da região e indica que, para os solos rasos, predominantes na Campanha Gaúcha, a deficiência de umidade já ocorre, em geral, no mês de outubro, prosseguindo até

o mês de março. Para os solos profundos esta deficiência é mais evidente de janeiro a março, indicando a necessidade de irrigação para todas as culturas de verão.

**Tabela 1.** Balanço Hídrico Sub-bacias.

<b>Rio</b>	<b>Vazão Média</b> (mm/ano)	<b>Precipitação Acumulada Média</b> (mm/ano)	<b>Evapotranspiração Média</b> (mm/ano)
Conceição	737	1850	1113
Comandaí	744	1850	1106
Jaguarzinho	835	1850	1015
Caverá	473	1550	1077

## 5 METODOLOGIA

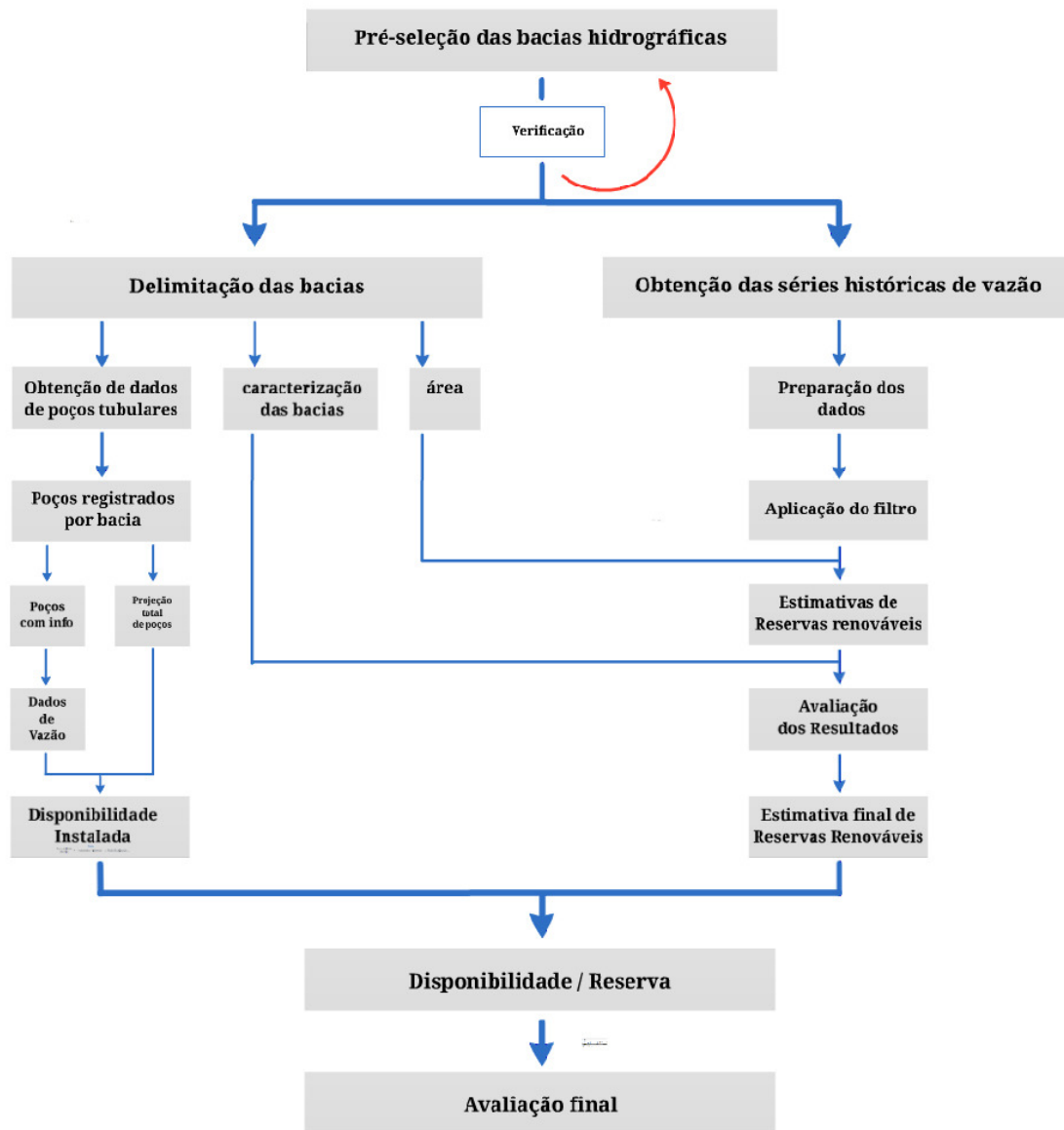
A estimativa de reservas renováveis através da aplicação de filtros numéricos de separação de escoamento depende basicamente da disponibilidade de séries históricas de vazão, da área da bacia e de um *software* de cálculo. Os cálculos de separação do escoamento, área das bacias e critérios e limitações que envolveram a escolha das bacias e estações fluvio-métricas de referência são detalhados nos próximos itens.

Os resultados obtidos foram comparados com dados de precipitação e disponibilidade hídrica instalada para fins de diagnóstico e verificação dos resultados.

Além disso, caracterizações geológica e hidrogeológica foram realizadas e utilizadas na interpretação dos resultados.

A organização das etapas da pesquisa pode ser mais bem observada no **Fluxograma 1**.

**Fluxograma 1.** Organização das etapas de pesquisa



## 5.1 DETERMINAÇÃO DAS BACIAS ESTUDADAS

Com a intenção de estabelecer um comparativo de resultados entre bacias de características diferentes foram escolhidas três regiões prioritárias distintas baseadas nas diversidades hidrogeológica e sua representatividade para o estado do Rio Grande do Sul. Essas regiões são caracterizadas pela ocorrência do Sistema Aquífero Serra Geral I (intensamente fissurada) I e Serra Geral II (moderadamente fissurado) que juntas ocupam 55% do território

gaúcho e o conjunto de arenitos aflorantes do Sistema Aquífero Guarani (de porosidade intergranular) que compreendem 13% do território estadual.

Ainda, os estudos foram concentrados em uma única região hidrográfica. Além de ser a maior do estado, a região da bacia do rio Uruguai fornece as melhores condições de estudo de diferentes formações hidrogeológicas em uma mesma bacia. Ainda, a Formação Serra Geral por si só, representa 39% dos poços registrados no estado (Kirchheim & Agra, 2011).

Foram escolhidas bacias de menor porte, pois possibilitam um melhor controle quanto às características geomorfológicas, geológicas e hidrogeológicas, além de controle de interferências locais (como a presença de barragens) e também de variações climáticas regionais.

Dentro do possível, foi priorizada a escolha de bacias de características hidrogeológicas uniformes.

Outro fator determinante foi a existência de estações fluviométricas na bacia de interesse. E ainda, a disponibilidade de dados, do ponto de vista quantitativo (maior sequência possível de anos consecutivos) e qualitativo (ausência de falhas).

Além disso, as áreas estudadas compreendem as porções das bacias que contribuem para a vazão medida nas estações fluviométricas, ou seja, contabiliza apenas as áreas à montante das estações.

Neste contexto, as bacias escolhidas, já descritas anteriormente, contam com áreas aproximadas de 1000 km<sup>2</sup>, conforme a tabela a seguir.

**Tabela 2.** Resumo de características das bacias de interesse.

Rio	Tipo aquífero	Aquífero	Produtividade	Área bacia (km <sup>2</sup> )
Caverá	poroso/intergranular	Botucatu	Alta	1164,8
Comandá	crystalino/fraturado	Serra Geral 1	Média	826,6
Conceição	crystalino/fraturado	Serra Geral 1	Média	808,5
Jaguarizinho	crystalino/fraturado	Serra Geral 2	Baixa	921,8

Essa análise foi feita com base em dados disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) e Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos (SNIRH) da Agência Nacional de Águas, e Mapas de Geodiversidade e Hidrogeologia disponibilizados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) através do Geobank.



Dados disponibilizados pelo Hidroweb (ANA): arquivo “bacia7.zip”, disponível no Hidroweb (ANA), (endereço: <http://hidroweb.ana.gov.br/>) contendo as informações necessárias de hidrografia, municipalidades, e estações fluviométricas.

Dados disponibilizados pelo CPRM: Mapa de Geodiversidade do Rio Grande do sul (escala 1: 750.000), e Mapa de Domínios e Sub-domínios Hidrogeológicos (endereço: <http://geobank.sa.cprm.gov.br/>). Foram utilizados na caracterização geológica e hidrogeológica da bacia.

Os dados foram visualizados com o auxílio do *software* ArcMap.

## 5.2 BASE DE DADOS

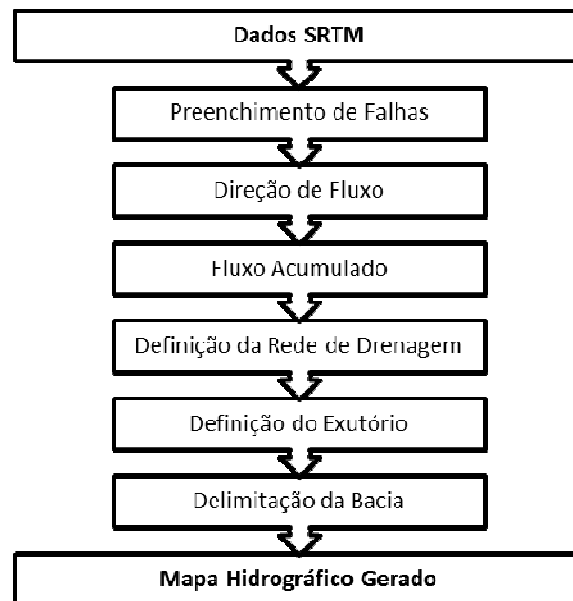
### 5.2.1 Delimitação das Bacias

Para a delimitação das bacias, além da hidrografia e localização das estações fluviométricas disponibilizadas pelo Hidroweb (ANA) é necessário um Modelo Digital de Elevação (MDE).

O MDE utilizado foi disponibilizado pelo CGIAR (Consultative Groupon International Agricultural Research), Farr, T. G., et al. (2007), através do site: <http://srtm.csi.cgiar.org/>

Os *softwares* ArcMap e ArcHydro (ESRI, 2010) foram utilizados para manipular os dados. O processo de delimitação das bacias subdividiu-se em 6 etapas: preenchimento de depressões (TerrainProcessing/ FillSinks), direção de fluxo (TerrainProcessing/ FlowDirection), área acumulada (TerrainProcessing/Flowaccumulation), definição da rede de Drenagem (TerrainPreprocessing/StreamDefinition), definição do exutório (Batch Point Generation), delimitação da bacia (WatershedProcessing /Batch SubwatershedDelineation).

**Fluxograma 2.** Delimitação das bacias hidrográficas



As áreas das bacias foram obtidas a partir da tabela de atributos das bacias delimitadas.

### 5.2.2 Séries Históricas de Vazão

Após a pré-seleção dos rios e respectivas estações fluviométricas foram obtidos os dados relativos às séries históricas de vazão de cada estação através do Sistema de Informações Hidrológicas (ANA) – endereço: <http://hidroweb.ana.gov.br/>.

Foi utilizado o software Manejo de Dados Hidroweb 4.0 (Ferramenta Facilitadora do Trabalho com Dados Hidrológicos Disponibilizados pela ANA, Fan & Collischonn, 2009), para realizar a conversão dos dados obtidos do formato ASCII Hidroweb para o formato ASCII Colunas, mais compatível com o software de cálculo Excel (Microsoft).

O *software* de cálculo foi utilizado para verificar a existência de falhas (dias sem dados de vazão) nas séries obtidas. A seguir foram selecionadas as maiores séries possíveis de dados sem falhas para anos consecutivos para cada estação.

A continuidade e a ausência de falhas são necessárias para a posterior aplicação dos filtros de cálculo utilizados na separação do escoamento de base.

### 5.2.3 Precipitação

As precipitações acumuladas anuais médias foram estimadas a partir do mapa de Isoietas Anuais (escala 1:5.000.000) constante no Atlas Pluviométrico do Brasil (CPRM), arquivo em *shapefile*, disponível em: <http://www.cprm.gov.br>.

Essas informações foram analisadas com o *software* ArcMap.

### 5.2.4 Extração de Água Subterrânea

Foi consultada a base de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIA-GAS) do Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

As localizações dos poços registrados foram obtidas diretamente em formato *shapefile* do site <http://siagasweb.cprm.gov.br>, selecionando uma região de interesse no mapa de visualização (função Visualizar Mapa).

Estes dados foram importados para o ArcMap sobrepostos às bacias de interesse, já delimitadas. Foi feita a identificação dos poços registrados localizados em cada área de interesse, e os municípios aos quais pertenciam.

Uma vez selecionados os poços, foi feita nova consulta ao banco de dados do SIAGAS, agora utilizando a função Pesquisa Geral, e pesquisa por município.

Foram finalmente obtidas as informações de vazão de estabilização assim como profundidade final de cada poço para o qual tais informações estavam disponíveis.

### 5.3 SEPARAÇÃO DE ESCOAMENTO DE BASE

No presente estudo foi utilizado um filtro digital de separação de escoamento com três formas de estimativa do parâmetro principal. Como as estimativas geram resultados diferentes, neste texto eles serão tratados como três filtros: o original de Eckhardt, o Inverso e o de Relação de Vazões.

Filtros digitais de separação de escoamento são algoritmos utilizados para calcular o fluxo de base de cursos d'água, supondo a separação da vazão de um rio em duas componentes, escoamento direto (oriundo do escoamento superficial) e indireto (de origem subterrânea-fluxo de base):

$$y_i = f_i + b_i \quad (1)$$

Onde:

y = vazão do rio

f = escoamento direto

b = fluxo base

i = intervalo

#### 5.3.1 Filtro de Eckhardt

O Filtro Digital Recursivo de Eckhardt (doravante denominado filtro de Eckhardt) foi publicado pelo Dr. K.Eckhardt em 2005, quando demonstrou que vários filtros publicados previamente (Lyne & Hollick, 1979; Chapman 1991; and Chapman 1999) poderiam ser representados por uma forma geral.

$$b_i = A \cdot b_{i-1} + B \cdot y_i \quad (2)$$

Sendo que  $b_i < y_i$ .

Ainda, Chapman (1999) e Fenicia et al (2006) demonstraram que a suposição de uma proporcionalidade linear entre o fluxo de saída de água do aquífero e a quantidade armazenada parece ser uma estimativa razoável para períodos mais longos de recessão, embora questionada por Wittenberg (1999).

Segundo Eckhardt, os parâmetros A e B na equação (2) podem ser expressos como funções da constante de recessão  $a$ , e um segundo parâmetro chamado BFI<sub>max</sub>. A constante de recessão  $a$  relaciona a descarga com um intervalo de tempo definido em períodos de recessão, quando o escoamento direto é nulo, e a recarga pode ser considerada desprezível e a recarga aquífera pode ser estimada através de análise das recessões.

$$b_i = a \cdot b_{i-1} \quad (3)$$

O BFI<sub>max</sub> é um fator que restringe o valor máximo do BFI que deve ser utilizado pelo algoritmo. O BFI é razão, a longo prazo, entre fluxo de base e vazão total.

Segundo Collischonn & Fan, o cálculo do BFI pode ser expresso da seguinte forma:

$$BFI = \frac{\sum_{i=1}^N b_i}{\sum_{i=1}^N y_i} \quad (4)$$

Eckhardt (2005) demonstrou que:

$$B = \frac{(1 - a) \cdot BFI_{\max}}{1 - a \cdot BFI_{\max}} \quad (5)$$

$$A = \left( \frac{1 - BFI_{\max}}{1 - a \cdot BFI_{\max}} \right) \cdot a \quad (6)$$

Portanto, o filtro de Eckhardt tem a seguinte forma:

$$b_i = \frac{(1 - BFI_{\max}) \cdot a \cdot b_{i-1} + (1 - a) \cdot BFI_{\max} \cdot y_i}{1 - a \cdot BFI_{\max}} \quad (7)$$

Sujeito a  $b_i \leq y_i$

O parâmetro  $a$  (constante de recessão) pode ser determinado por análise das recessões.

O termo recessão refere-se ao declínio da descarga natural de uma drenagem na ausência de entrada por precipitação e é assumida por leis de decaimento exponencial (Domenico et al., 1990).

Determina-se um período característico de recessão com um intervalo de tempo  $\Delta t$ , de  $t$  a  $t + \Delta t$ , e respectivos valores de vazão,  $Q_t$  e  $Q_{t+\Delta t}$ .

Assim podemos calcular a constante do período característico ( $k$ ) por:

$$k = \frac{-\Delta t}{\ln \left( \frac{Q_{(t+\Delta t)}}{Q_{(t)}} \right)} \quad (8)$$

E a constante de recessão ( $a$ ) por:

$$a = e^{\frac{-\Delta t}{k}} \quad (9)$$

Já para o parâmetro BFI<sub>max</sub>, diante da dificuldade de estimar valores objetivamente, Eckhardt propõe a predefinição de valores. Predefinição baseada em comparações dos resultados derivados do seu método com resultados obtidos por outros métodos de separação de escoamento. Os resultados foram agrupados considerando a natureza dos rios (perenes ou efêmeros) e a características hidrogeológicas simplificadas (aquífero poroso ou fraturado).

Os valores propostos predefinidos por Eckhardt podem ser observados na tabela 3 a seguir.

**Tabela 3.** Roteiro de Predefinição de BFI<sub>max</sub> de Eckhardt.

Natureza do rio	Tipo de Aquífero	BFI <sub>max</sub> Predefinido
Perene	cristalino	0,25
Efêmero	poroso	0,50
Perene	poroso	0,80

O estudo de Eckhardt envolveu rios nos Estados Unidos da América do Norte e na Alemanha. Segundo o próprio Eckhardt “esta análise está longe de finalizada, e deve ser continuada”.

Os cálculos foram realizados utilizando o *software* Excel (Microsoft).

### 5.3.2 Filtro Inverso

Em 2012, Collischonn & Fan propuseram uma maneira objetiva de calcular valores específicos de BFI<sub>max</sub> a serem utilizados no filtro de Eckhardt. O filtro de Eckhardt com BFI<sub>max</sub> determinado pelo filtro Inverso será denominado simplesmente como filtro Inverso.

Utilizando o método de Eckhardt e reorganizando a equação (3) é possível obter o escoamento de base do passo anterior ( $b_{i-1}$ ) que resultaria no escoamento de base presente ( $b_i$ ), dado o valor da constante de recessão  $a$ :

$$b_{i-1} = \frac{b_i}{a} \quad (10)$$

Collischonn & Fan (2012) demonstraram que essa equação pode ser transformada em um filtro regressivo para a determinação de uma estimativa preliminar do máximo valor possível do fluxo de base, dado o valor do parâmetro  $a$ , conforme:

$$b'_{i-1} = \frac{b'_i}{a} \quad (11)$$

Sujeito a  $b_{i-1} \leq y_{i-1}$ , onde  $b_{i-1}$  é a primeira aproximação do fluxo de base no intervalo  $i-1$ .

Para aplicar filtro regressivo (ou inverso) da equação (11) a série analisada deve terminar em recessão para que seja possível estipular que  $b_n = y_n$

O processo de cálculo começa pelo último dia da série analisada, quando considera-se que a vazão do rio esteja composta unicamente pelo fluxo de base.

Aplicando o filtro Inverso é possível calcular  $b'$  do penúltimo dia, e esse cálculo é repetido para cada dia anterior, até o primeiro dia da série. Assim, o comportamento da vazão do rio em períodos recessivos é projetado para trás no tempo, segundo a constante de recessão e simulando a descarga contínua de um reservatório subterrâneo, sem o aporte de escoamento direto. Logo, é razoável que em episódios de cheias se considere que o incremento do fluxo de base durante esse episódio seja, no máximo, igual ao incremento projetado, para o mesmo período, considerando a constante de recessão.

Seguindo essa premissa, a estimativa do BFI<sub>max</sub> pode ser feita dividindo a soma de  $b'$  pela vazão total y conforme a equação (12).

$$BFI_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^N b'_i}{\sum_{i=1}^N y_i} \quad (12)$$

Após definido o BFI<sub>max</sub>, aplica-se esse valor específico ao filtro de Eckhardt.

Os cálculos foram realizados utilizando o *software* Excel (Microsoft).

### 5.3.3 Filtro de Relação de Vazões



Collischonn & Fan observaram uma forte correlação entre a relação Q90/Q50 e os valores de BFI<sub>max</sub> estimados pelo método do filtro Inverso. Logo, propuseram uma curva de regressão que pode ser utilizada para guiar os valores de BFI<sub>max</sub> baseando-se na relação Q90/Q50. Este método será denominado de filtro de Relação de Vazões. As vazões Q90 e Q50, por sua vez podem ser facilmente obtidas a partir da curva de permanência. Ainda, utilizando os dados referentes às 15 estações utilizadas em seu estudo, propuseram a seguinte equação para estimativa de BFI<sub>max</sub> na região central e sul do Brasil:

$$BFI_{\max} = 0.8344 \frac{Q_{90}}{Q_{50}} + 0.2146 \quad (13)$$

Após definido o BFI<sub>max</sub>, aplica-se esse valor específico ao filtro de Eckhardt.

Os cálculos foram realizados utilizando o *software* Excel (Microsoft).

## 5.4 RECARGA AQUÍFERA

A taxa de recarga aquífera (mm/ano) foi obtida por:

$$TR = \frac{\bar{b}}{A} \times 1000 \times 31622400 \quad (14)$$

Onde:

$TR$  = taxa de recarga aquífera (mm/ano);

$\bar{b}$  = média dos valores de fluxo de base (m<sup>3</sup>/s);

$A$  = área da bacia (m<sup>2</sup>);

1000 = fator de conversão de m para mm;

31622400 = fator de conversão de segundos para ano.

A recarga aquífera anual (m<sup>3</sup>) foi obtida através da fórmula:

$$R = \bar{b} \times 31622400 \quad (15)$$

Onde:

$R$  = recarga aquífera (m<sup>3</sup>);

$\bar{b}$  = média dos valores de fluxo de base ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

31622400 = fator de conversão de segundos para ano.

## 5.5 DISPONIBILIDADE HÍDRICA INSTALADA

O Cálculo da Disponibilidade Hídrica Instalada em cada bacia seguiu a seguinte rotina:

- Foi obtida a média das vazões de estabilização entre os poços que continham essa informação;
- O número total de poços (com ou sem dados de vazão) foi multiplicado por 10. Contabilizando que a cada 10 poços existentes, apenas um é cadastrado. (Conforme sugerido por Kirchheim & Agra, 2011);
- Foi multiplicada a vazão de estabilização média pelo número total de poços (contabilizando os poços não cadastrados), e;
- Conversão do valor de  $\text{m}^3/\text{h}$  para  $\text{m}^3/\text{ano}$ .

## 6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS

Os resultados são apresentados em duas etapas, análises qualitativa e quantitativa, sendo que a primeira etapa foi subdividida sequencialmente de acordo com o tipo de aquífero (fraturado e poroso), o principal sistema aquífero (Serra Geral I e II, e Guarani), e as bacias de interesse.

A análise qualitativa dos resultados apresenta a base de dados utilizada, assim como observações sobre a inspeção visual dos hidrogramas e análises comparativas entre as estimativas geradas por cada método para cada rio. Ainda, são consideradas as características geológicas regionais para cada rio, e sua relação e influência sobre os resultados.

A análise quantitativa apresenta os resultados gerados pelos três filtros para cada uma das quatro bacias estudadas. São discutidas questões relativas aos métodos e justificada a escolha final do filtro Inverso para o cálculo da recarga aquífera. Aspectos regionais, tais como geologia e precipitação, são destacados no auxílio à interpretação dos resultados. Por fim, são quantificadas as reservas renováveis finais, cujos valores são comparados com estimativas das disponibilidades hídricas instaladas em cada bacia.

### 6.1 ANÁLISE QUALITATIVA DOS RESULTADOS

#### 6.1.1 Aquífero fraturado/basalto

Dos quatro rios estudados três estão localizados em regiões de aquíferos cristalinos, sendo que os rios Comandá e Conceição estão inseridos na região do Sistema Aquífero Serra Geral I (produtividade de água subterrânea considerada média) e o rio Jaguarzinho está situado sobre o Sistema Aquífero Serra Geral II (considerado de baixa produtividade).

##### 6.1.1a Serra Geral I

###### 6.1.1a.1 Rio Comandá

Os dados históricos de vazão referentes ao Rio Comandá foram extraídos da estação Passo São João, conforme a tabela a seguir.

**Tabela 4.** Base de dados – Rio Comandaí.

Dados da Estação Fluviométrica						
Nome:	Passo São João					
Código:	74880000					
Disponibilidade Temporal Total			Maior série de anos consecutivos sem falhas			
Período			Período		Quant. (anos)	
1941	-	2012	1942	-	1983	42

As vazões mínimas, médias e máximas são apresentadas na Tabela 5.

**Tabela 5.** Vazões características da série – Comandaí

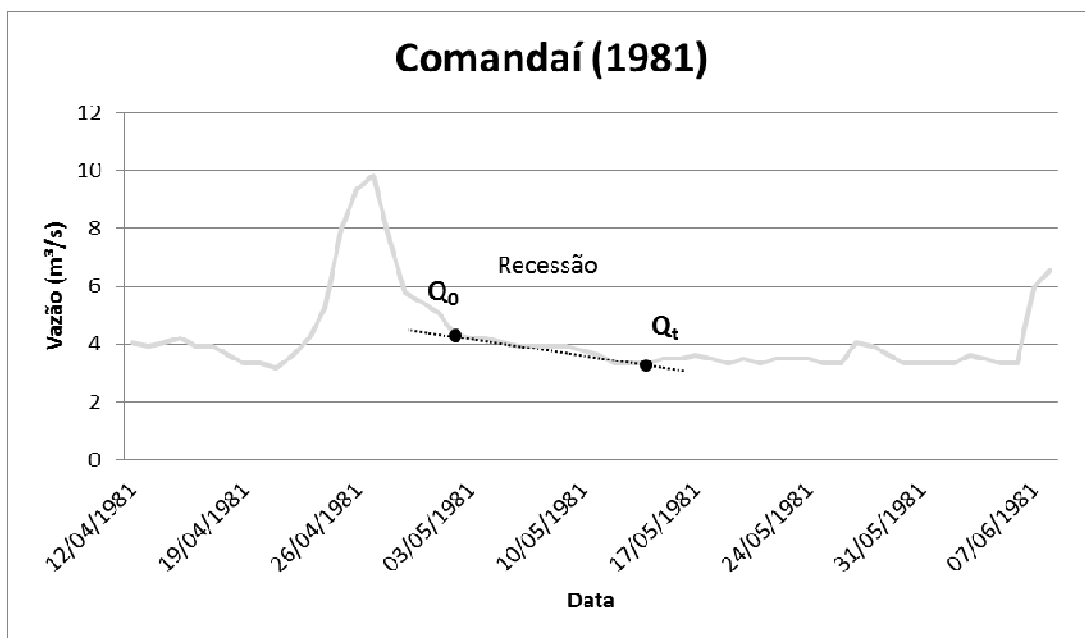
Vazões (m <sup>3</sup> /s)					
Q <sub>mínima</sub>	Q <sub>90</sub>	Q <sub>50</sub>	Q <sub>média</sub>	Q <sub>10</sub>	Q <sub>máxima</sub>
0,84	3,48	10,55	19,50	43,28	330,00

Conforme descrito na metodologia, foram aplicados três métodos distintos de separação do escoamento de base em cada um dos quatro rios estudados. O filtro de Eckhardt (que possui valores predefinidos de BFI<sub>max</sub>), e os dois métodos propostos por Collischon & Fan, o filtro da Relação de Vazões, baseado na simplificação da equação do filtro Inverso (que utiliza a relação Q<sub>90</sub>/Q<sub>50</sub> no cálculo do BFI<sub>max</sub>) e outro, filtro Inverso, que utiliza um filtro regressivo na determinação do BFI<sub>max</sub>.

Para melhor visualização, apenas uma fração dos 42 anos de dados é apresentada na forma de hidrograma. Assim, tanto para o rio Comandaí quanto para os demais rios apresentados neste estudo, os hidrogramas apresentados referem-se aos anos base utilizados para o cálculo da constante de recessão. Dessa forma, além de analisar as três separações de escoamento calculadas, é possível observar o período de recessão utilizado no método do filtro inverso.

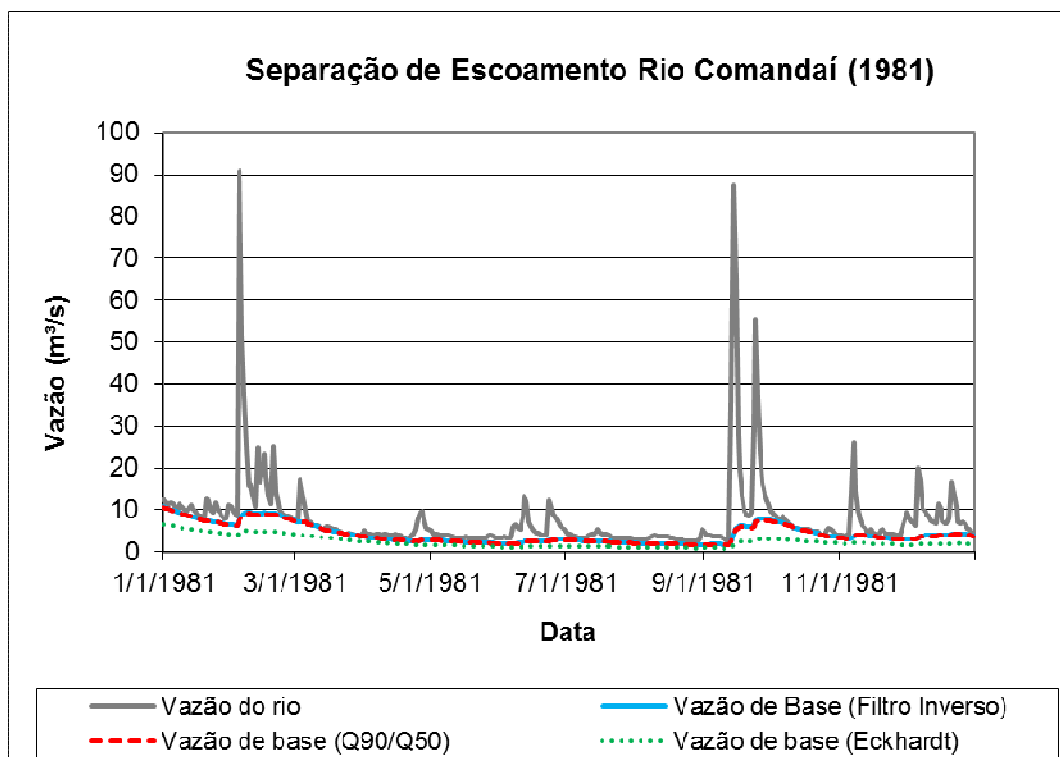
Para o rio Comandaí, a constante de recessão ( $a$ ) foi estimada em 0,977 com base nas vazões medidas nos dias 02 e 14 de maio de 1981, conforme a Figura 17.

**Figura 17.** Curva de Recessão do rio Comandaí



A inspeção visual do hidrograma do rio Comandaí (**Figura 18**), permite observar a convergência de dois dos três métodos utilizados (filtro de Relação de Vazões e filtro Inverso), uma vez que as duas linhas estão sobrepostas. Ainda, conforme o esperado, observa-se que durante períodos de recessão, essas duas estimativas se aproximam à vazão total do rio. Ou seja, nesses períodos, a vazão do rio é composta apenas pela água oriunda das reservas subterrâneas.

Da mesma forma pode-se destacar que o filtro de Eckhardt diverge desses resultados, pois estima uma vazão de base bastante inferior aos demais métodos e, principalmente, inferior às vazões do rio em períodos de recessão. Tal fato indica que, no caso do rio Comandaí, a vazão de base calculada pelo filtro de Eckhardt é subestimada.

**Figura 18.** Hidrograma Anual - Comandaí

A concordância dos filtros de Relação de Vazões e Inverso e sua divergência em relação ao filtro de Eckhardt são reforçadas quando comparados os respectivos valores de BFI<sub>max</sub>, disponíveis na **Tabela 6**. Enquanto o filtro de Eckhardt estima que a parcela máxima da vazão do rio constituída por água subterrânea seja de 25% (BFI<sub>max</sub>=0,25), os filtros de Relação de Vazões e Inverso estimam essa contribuição máxima em 49% e 50% respectivamente.

**Tabela 6.** Comparativo de BFI<sub>max</sub> - Comandaí

Filtro	Parâmetro base	Tipo	BFI <sub>max</sub>
Eckhardt	natureza do rio/tipo geológico	predefinido (rio perene em aquífero cristalino)	0,25
Relação de Vazões	razão Q90/Q50	calculado	0,49
Inverso	Última vazão de recessão	calculado	0,50

Conforme destacado na metodologia a determinação do BFI<sub>max</sub> para o filtro de Eckhardt depende da natureza do rio (perene ou efêmero) e a estrutura do aquífero (poroso ou fraturado) e está restrito a três valores predefinidos (0,25; 0,50; 0,8). Contudo, considerando

que todos os rios apresentados neste estudo são perenes, a estimativa da máxima contribuição de água subterrânea para a vazão dos rios fica ainda limitada, com apenas dois valores possíveis, 25% e 80%.

No filtro de Relação de Vazões o cálculo do BFI<sub>max</sub> depende do regime de vazões do próprio rio enquanto no filtro Inverso o BFI<sub>max</sub> depende mais especificamente do comportamento do rio em períodos de recessão. Assim, ambos os filtros permitem calcular BFI<sub>max</sub> específicos para cada caso dentro de um universo infinito de valores no intervalo de 0,0 a 1,0 (ou 0% a 100%) par o filtro Inverso, e de 0,21 a 1,0 para o filtro de Relação de Vazões.

#### 6.1.1a.2 Rio Conceição

Os dados históricos de vazão referentes ao Rio Conceição foram extraídos da estação Conceição, conforme a tabela a seguir.

**Tabela 7.** Base de dados – Rio Conceição

<b>Dados da Estação Fluviométrica</b>						
Nome:	Conceição					
Código:	75200000					
<b>Disponibilidade Temporal</b>			<b>Maior Série de anos consecutivos sem falhas</b>			
<b>Total</b>						
Período			Período		Quant. (anos)	
1942	-	2012	1943	-	1979	37

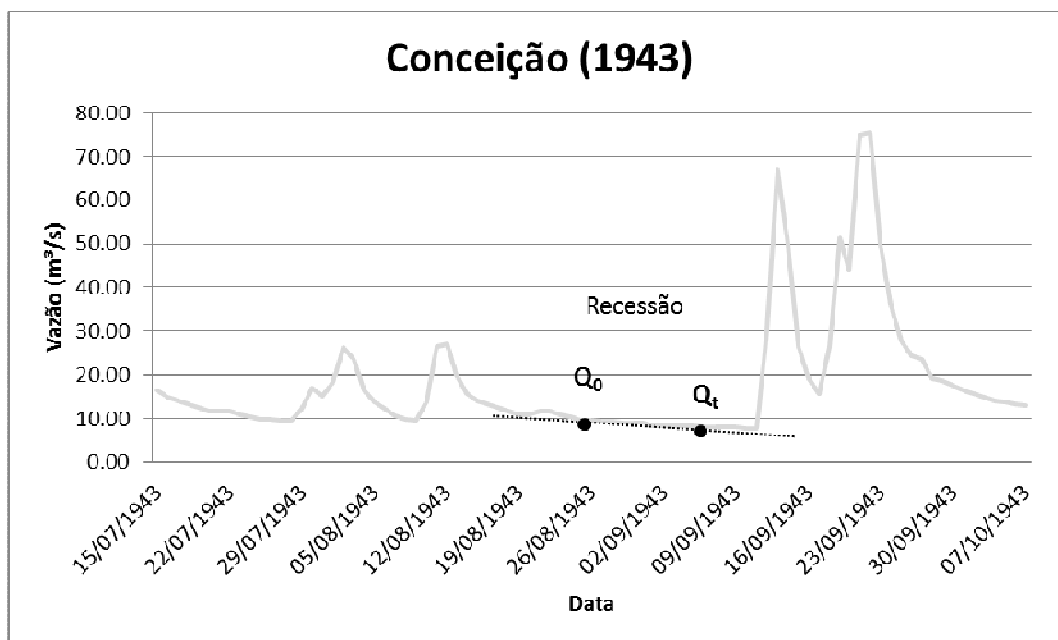
As vazões mínimas, médias e máximas são apresentadas na Tabela 8.

**Tabela 8.** Vazões características da série – Conceição

<b>Vazões (m<sup>3</sup>/s)</b>					
<b>Q<sub>mínima</sub></b>	<b>Q<sub>90</sub></b>	<b>Q<sub>50</sub></b>	<b>Q<sub>média</sub></b>	<b>Q<sub>10</sub></b>	<b>Q<sub>máxima</sub></b>
0,98	4,13	11,00	18,88	41,30	242,00

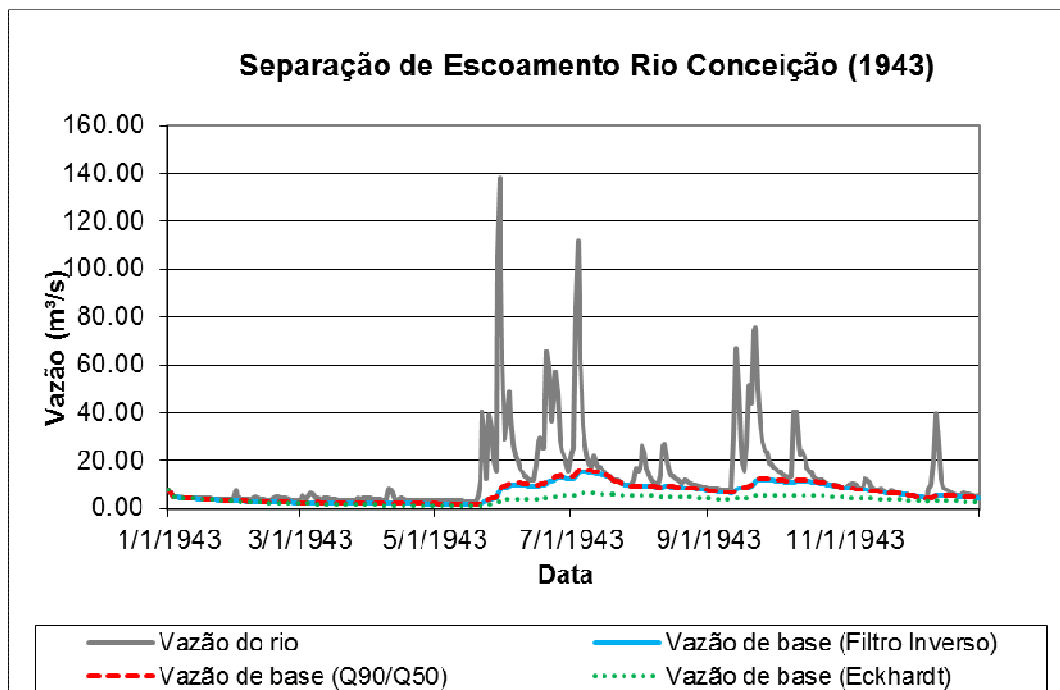
A constante de recessão ( $a$ ) para o rio Conceição foi estimada em 0,984 com base nas vazões medidas nos dias 26 de agosto e 06 de setembro de 1943, conforme a Figura 19.

**Figura 19.** Curva de Recessão do rio Conceição



As vazões medidas ao longo do ano de 1943 são apresentadas a seguir na forma de hidrograma (Figura 20).

**Figura 20.** Hidrograma Anual - Conceição



A inspeção visual do hidrograma aponta a convergência dos três métodos no grande período de recessão do primeiro semestre. As linhas sobrepostas, neste período, se aproximam



da vazão total do rio. Ou seja, a vazão do rio é composta majoritariamente por água oriunda das reservas subterrâneas.

Da mesma forma, em períodos de cheia, observa-se a divergência da estimativa de Eckhardt em relação às demais. Percebe-se ainda que, durante o segundo semestre, o filtro de Eckhardt fornece uma estimativa bastante inferior às demais e também aos períodos recessivos de entre-cheias. O filtro de Relação de Vazões e o filtro Inverso parecem acompanhar consistentemente todos os momentos recessivos ao longo do hidrograma. Além disso, respondem suavemente a grandes cheias, sugerindo não haver superestimativa.

Na Tabela 9 observa-se que o valor de BFI<sub>max</sub> predefinido por Eckhardt é duas vezes inferior aos valores de BFI<sub>max</sub> calculados. Tal variação sugere a necessidade de avaliar uma gama mais ampla de valores de BFI<sub>max</sub> e suas respectivas estimativas de recarga aquífera. Talvez mais importante ainda seja apontar a proximidade dos valores de BFI<sub>max</sub> calculados em relação ao valor de BFI<sub>max</sub> proposto por Eckhardt para rios efêmeros (0,50), de características completamente distintas às do rio Conceição. Tal fato evidencia a vulnerabilidade da estimativa de BFI<sub>max</sub> baseada apenas em características genéricas, sem levar em conta condições locais, tais quais, ocupação do solo, cobertura vegetal, topografia, camada superficial do solo.

**Tabela 9.** Comparativo de BFI<sub>max</sub> - Conceição

<b>Filtro</b>	<b>Parâmetro base</b>	<b>Tipo</b>	<b>BFI<sub>max</sub></b>
Eckhardt	natureza do rio/tipo geológico	pré-definido (rio perene em aquífero cristalino)	0,25
Relação de Vazões	razão Q90/Q50	calculado	0,53
Inverso	Última vazão de recessão	calculado	0,51

Portanto é reforçada mais uma vez a necessidade de uma metodologia mais flexível em relação ao BFI<sub>max</sub>, gerando valores de acordo com as especificidades de cada rio.

## 6.1.1b Serra Geral II

### 6.1.b.1 Rio Jaguarizinho

Os dados históricos de vazão referentes ao Rio Jaguarizinho foram extraídos da estação Ernesto Alves, conforme a tabela a seguir.

**Tabela 10.** Base de dados fluviométricos – Rio Jaguarizinho

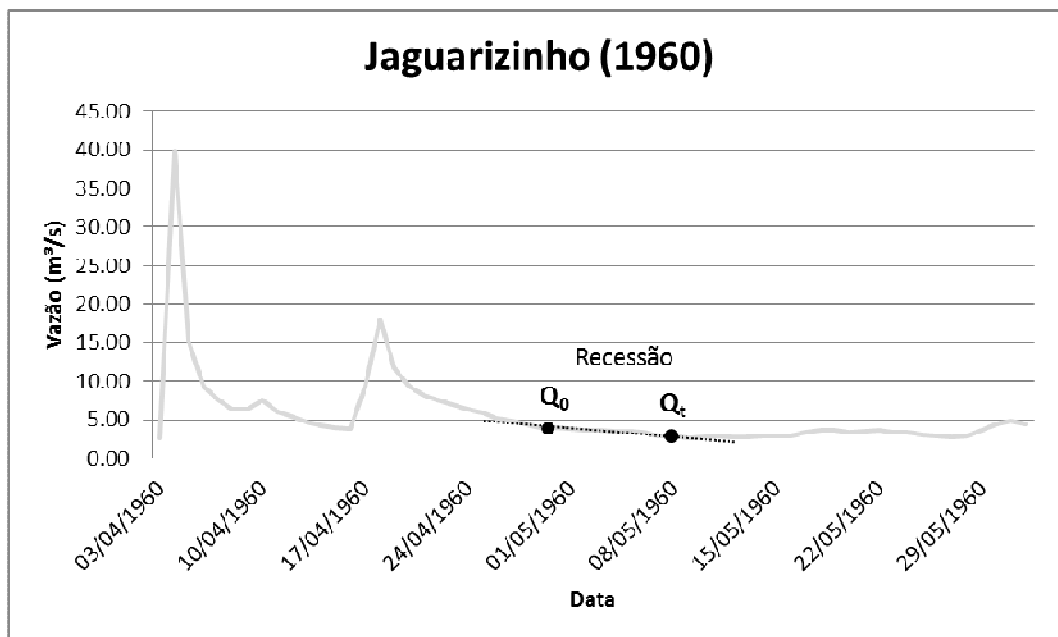
Dados da Estação Fluviométrica						
Nome:	Ernesto Alves					
Código:	76460000					
Disponibilidade Temporal Total			Maior Série de anos consecutivos sem falhas			
Período			Período		Quant. (anos)	
1958	-	2012	1959	-	1977	19

As vazões mínimas, médias e máximas são apresentadas na Tabela 11.

**Tabela 11.** Vazões características da série – Jaguarizinho

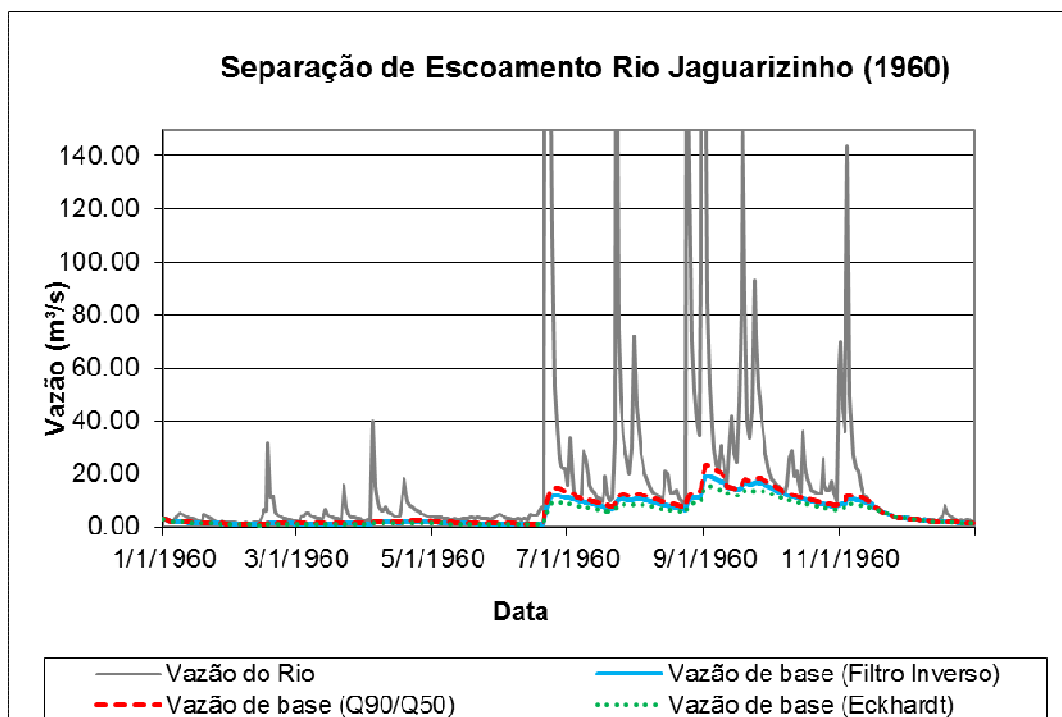
Q mínima	Vazões (m³/s)					Q máxima
	Q90	Q50	Q média	Q10		
0,09	1,52	9,23	24,39	51,66	936,00	

A constante de recessão ( $a$ ) para o rio Jaguarizinho foi estimada em 0,969 com base nas vazões medidas nos dias 29 de abril e 08 de maio de 1960, conforme a Figura 21.

**Figura 21.** Curva de Recessão do rio Jaguarizinho

As vazões medidas ao longo do ano de 1960 são apresentadas a seguir na forma de hidrograma (Figura 22).

**Figura 22.** Hidrograma Anual - Jaguarizinho



A inspeção visual do hidrograma aponta uma boa convergência entre os três métodos, principalmente em maiores períodos de recessão. Enquanto as estimativas geradas pelo filtro de Relação de Vazões são sempre maiores àquelas geradas pelo filtro de Eckhardt são sempre as menores. Contudo, as três estimativas parecem razoáveis.

Na tabela 12 observa-se no rio Jaguarizinho a menor variação entre valores de BFI<sub>max</sub> em comparação com os demais rios.

**Tabela 12.** Comparativo de BFI<sub>max</sub> - Jaguarizinho

Filtro	Parâmetro base	Tipo	BFI <sub>max</sub>
Eckhardt	natureza do rio/tipo geológico	pré-definido (rio perene em aquífero cristalino)	0,25
Relação de Vazões	razão Q90/Q50	calculado	0,35
Inverso	Última vazão de recessão	calculado	0,30

Conforme o esperado, o rio Jaguarizinho apresenta valores de BFI<sub>max</sub> inferiores aos dos rios Comadái e Conceição, por estar inserido na zona abrangida pelo Sistema Aquífero Serra Geral II, do qual se espera a menor produtividade dentre os três aquíferos apresentados.

Mais uma vez, avariação dos valores de BFI<sub>max</sub> para cada um dos métodos, sugere a necessidade de considerar as especificidades locais e avaliar uma gama mais ampla de valores de BFI<sub>max</sub> e suas respectivas estimativas de recarga aquífera.

## 6.1.2 Aquífero Poroso/Arenito

### 6.1.2a Sistema Aquífero Guarani - Botucatu e Guará

#### 6.1.2a.1 Rio Caverá

Os dados históricos de vazão referentes ao rio Caverá foram extraídos da estação Passo do Osório, conforme a tabela a seguir.

**Tabela 13.** Base de dados – Rio Caverá

<b>Dados da Estação Fluviométrica</b>						
Nome:	Passo do Osório					
Código:	76742000					
<b>Disponibilidade Temporal Total</b>			<b>Maior Série de anos consecutivos sem falhas</b>			
Período			Período		Quant. (anos)	
1977	-	2012	2004	-	2007	4

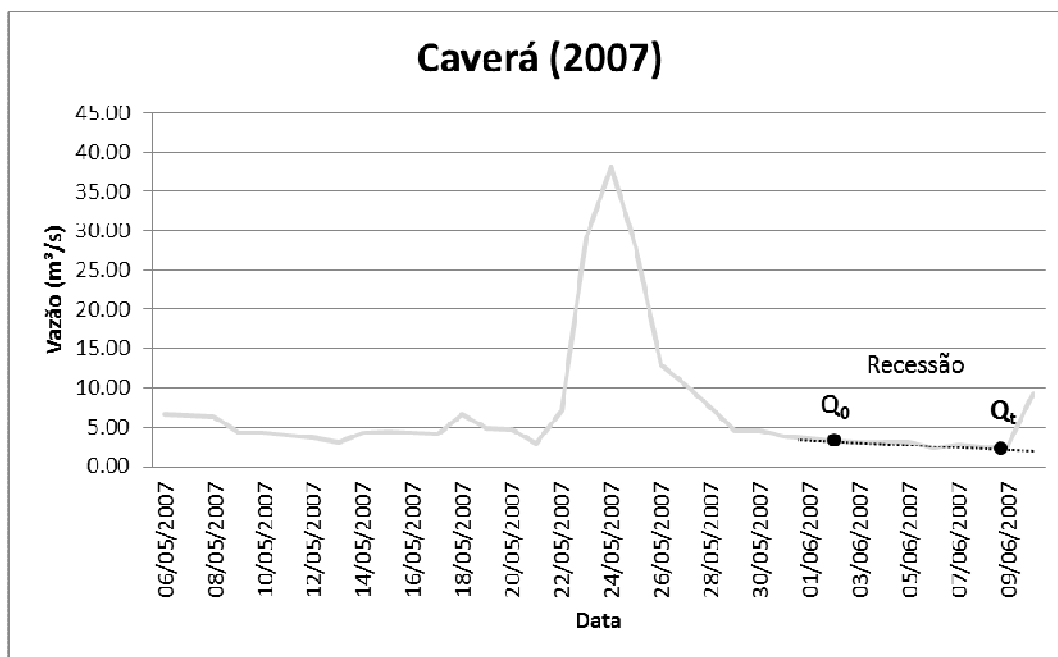
As vazões mínimas, médias e máximas são apresentadas na Tabela 14.

**Tabela 14.** Vazões características da série – Caverá

<b>Vazões (m<sup>3</sup>/s)</b>					
<b>Q mínima</b>	<b>Q90</b>	<b>Q50</b>	<b>Q média</b>	<b>Q<sub>10</sub></b>	<b>Qmáxima</b>
0,13	0,47	7,84	17,47	47,76	320,00

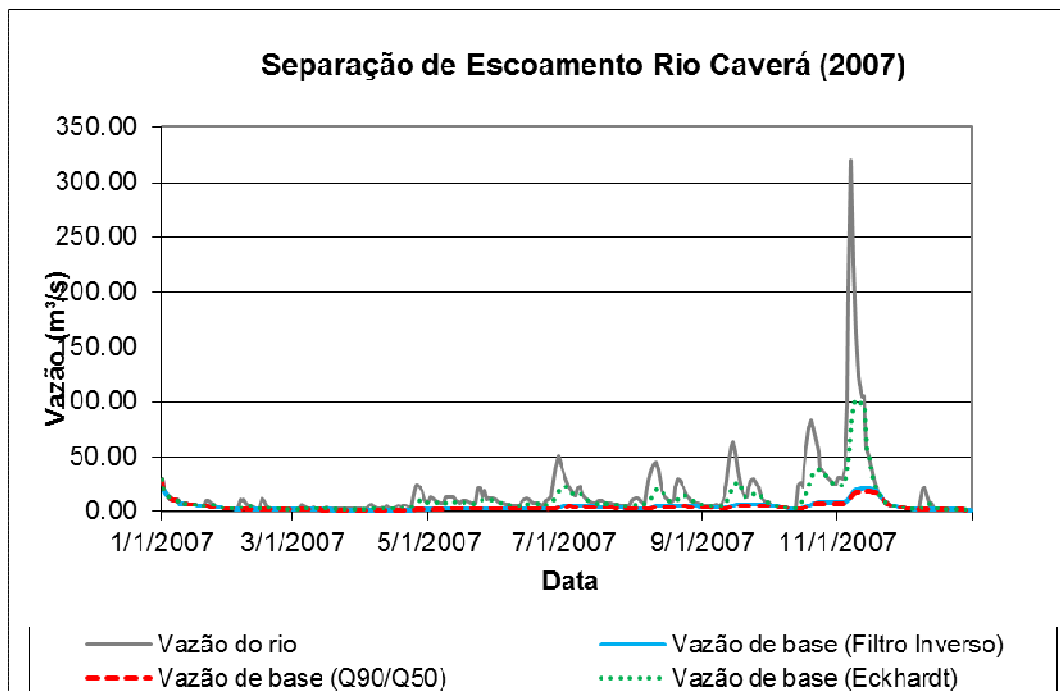
A constante de recessão ( $a$ ) para o rio Caverá foi estimada em 0,965 com base nas vazões medidas nos dias 02 a 09 de junho de 2007 conforme a Figura 23.

**Figura 23.** Curva de Recessão do rio Caverá



As vazões medidas ao longo do ano de 2007 são apresentadas a seguir na forma de hidrograma (Figura 24).

**Figura 24.** Hidrograma Anual - Caverá



A inspeção visual do hidrograma do rio Caverá permite observar a convergência de dois dos três métodos utilizados (filtro de Relação de Vazões e filtro Inverso), uma vez que as

duas linhas estão sobrepostas. Ainda, conforme o esperado, observa-se que durante períodos de recessão, para essas duas estimativas, a vazão do rio é composta, praticamente, apenas pelas águas oriundas das reservas subterrâneas.

Este caso é bastante parecido aos dos rios Comandá e Conceição quanto a comparação dos métodos. Isto é, as estimativas dos filtros de Relação de Vazões e Inverso são praticamente idênticas, enquanto o filtro de Eckhardt tem comportamento completamente distinto. Contudo, enquanto no rio Comandá o filtro de Eckhardt por muito subestima a contribuição subterrânea ao rio, no rio Caverá acontece o contrário, havendo discrepante superestimativa. Tal afirmação é comprovada pelo fato de o escoamento de base estimado apresentar picos que acompanham as cheias.

A concordância dos filtros de Relação de Vazões e Inverso e sua divergência em relação ao filtro de Eckhardt pode ser melhor compreendida quando comparados os respectivos valores de BFI<sub>max</sub>, disponíveis na Tabela 14.

**Tabela 14.** Comparativo de BFI<sub>max</sub> - Caverá

<b>Filtro</b>	<b>Parâmetro base</b>	<b>Tipo</b>	<b>BFI<sub>max</sub></b>
Eckhardt	natureza do rio/tipo geológico	pré-definido (rio perene em aquífero poroso)	0,80
Relação de Vazões	razão Q90/Q50	calculado	0,26
Inverso	Última vazão de recessão	calculado	0,29

Enquanto o filtro de Eckhardt estima que a parcela máxima da vazão do rio constituída por água subterrânea seja de 80% (BFI<sub>max</sub>=0,80), os filtros de Relação de Vazões e Inverso estimam essa contribuição máxima em apenas 26% e 29% respectivamente.

Embora o rio Caverá esteja localizado em região de aquífero poroso (Botucatu Guará), do qual se espera grande contribuição à vazão de base, os resultados apontam o contrário.

Esperar-se-ia que os valores de BFI<sub>max</sub> fossem próximos aos estimados por Eckhardt para aquíferos dessa natureza (0,80). No entanto, os filtros de Relação de Vazões e Inverso apresentam, na verdade, valores muito próximos ao estimado por Eckhardt para aquíferos cristalinos.

Essa é uma variante interessantíssima, pois indica que outro fator, que não a classificação genérica do aquífero, esteja alterando o comportamento esperado do rio. É importante ressaltar que métodos como os da Relação de Vazões e Inverso têm a vantagem de contemplar a possibilidade de gerar resultados contrários à hipótese inicial e que tal condição não é possível com o filtro de Eckhardt, devido à predefinição do valor de BFI<sub>max</sub>.

## 6.2 ANÁLISE QUANTITATIVA DOS RESULTADOS

Conforme ressaltado na análise qualitativa dos resultados, o filtro de Eckhardt subestima os escoamentos de base nos casos dos rios Comandaí, Conceição e Jaguarzinho (aquíferos cristalinos fraturados) enquanto superestima no caso do rio Caverá (aquífero poroso).

O filtro de Relação de Vazões demonstrou boa concordância e correlação com os resultados obtidos com a aplicação do filtro Inverso, contudo a inspeção visual dos hidrogramas possibilitou constatar alguns trechos de aparente subestimativa do escoamento de base. Embora o método de Relação de vazões tenha sido desenvolvido a partir do filtro de Eckhardt, a sua simplificação e introdução da razão entre as vazões Q<sub>90</sub> e Q<sub>50</sub> para o cálculo do BFI<sub>max</sub> configuram, na verdade, uma alteração do método. Este fato reforça a escolha final pelo método do filtro Inverso que, além de ter apresentado os resultados mais satisfatórios na análise qualitativa dos dados gerados, não envolve simplificação e sim apresenta a possibilidade de cálculo de BFI<sub>max</sub> específicos, de acordo com o comportamento recessivo de cada rio.

Um resumo dos resultados obtidos com os três métodos é apresentado na Tabela 15. Observa-se que, em todos os casos, a recarga aquífera é inferior a um quinto da precipitação. Ainda, segundo os resultados gerados pelo filtro de Eckhardt para aquíferos cristalinos fraturados a fixação do valor de BFI<sub>max</sub> para essa geologia (0,25) limita a recarga aquífera a, no máximo, um décimo da precipitação.

**Tabela 15.** Resumo Geral de Estimativas de Recarga

Bacia	Filtro	Precipitação anual (mm)	BFImax	Recarga (mm/ano)	Recarga/Precipitação
<b>Comandaí</b>	Eckhardt	1850	0,25	186	10,1%
	Relação de Vazões		0,49	333	18,0%
	Inverso		0,50	339	18,3%
<b>Conceição</b>	Eckhardt	1850	0,25	183	9,9%
	Relação de Vazões		0,53	349	18,9%
	Inverso		0,51	338	18,3%
<b>Jaguarizinho</b>	Eckhardt	1850	0,25	192	10,4%
	Relação de Vazões		0,35	246	13,3%
	Inverso		0,30	220	11,9%
<b>Caverá</b>	Eckhardt	1550	0,80	287	18,5%
	Relação de Vazões		0,26	109	7,0%
	Inverso		0,29	117	7,6%

Embora no caso do rio Caverá (filtro de Eckhardt) o resultado de uma recarga de 18,5% em relação à precipitação seja bastante razoável, e possa até ser considerada baixa para um rio localizado em região de aquífero poroso, vale lembrar que a inspeção visual deste hidrograma revelou picos anormais em épocas de cheia, evidenciando superestimativa. Os resultados gerados pelos filtros de Relação de vazões e Inverso parecem coerentes, mas é inegável que a estimativa de que a recarga em um aquífero poroso represente apenas 7% da precipitação gera surpresa. Enquanto os filtros Inverso e de Relação de Vazões geraram valores de BFImax próximos ao fixado por Eckhardt para aquíferos fraturados, a “superestimativa” do filtro de Eckhardt gera uma recarga de apenas 18,5% (igual as estimativas dos rios Comandaí e Conceição, de aquíferos fraturados). Assim, o caso de rio Caverá aponta claramente a necessidade de estudos específicos para cada bacia de interesse, já que a dependência de parâmetros genéricos pode causar grande variação nas estimativas.

O resumo geral das estimativas também permite observar a variação e distribuição dos valores de BFImax calculados num intervalo contido entre os valores predefinidos por Eckhardt (0,25 e 0,80). Ainda, registra-se a ocorrência de quatro valores de BFImax (0,49; 0,50; 0,51 e 0,53) próximos ao valor predefinido por Eckhardt para rios efêmeros (0,50), sendo que os quatro rios estudados são perenes. Assim, reforça-se a necessidade de utilização de parâmetros específicos a cada situação.

Logo, considerando as análises visuais dos hidrogramas, a necessidade de estudos específicos que se adaptem às condicionantes locais, e as demais ponderações apresentadas, optou-



se pela utilização do filtro Inverso na estimativa de recarga aquífera nas quatro bacias estudadas.

Os resultados finais são apresentados na Tabela 16 conjuntamente a um resumo das características regionais de cada bacia.

**Tabela 16.** Resultado Final: Estimativas de Recarga (filtro Inverso)

Bacia	Aquífero		Precipitação (mm/ano)	Recarga (mm/ano)	Recarga/Precipitação
	Tipo	Produtividade			
<b>Comandaí</b>	Fraturado	Média	1850	339	18,3%
<b>Conceição</b>	Fraturado	Média	1850	338	18,3%
<b>Jaguarzinho</b>	Fraturado	Baixa	1850	220	11,9%
<b>Caverá</b>	Poroso	Alta	1550	117	7,6%

Destaca-se a concordância dos resultados dos rios Comandaí e Conceição que, apresentam recargas idênticas, estão localizados na mesma região hidrogeológica (aquífero Serra Geral I) e são alimentados pela mesma precipitação anual total média.

Além disso, apresentam recarga superior à do rio Jaguarzinho. É interessante destacar que este resultado condiz com as diferenças entre as características hidrogeológicas dessas regiões. O rio Jaguarzinho está localizado na região do aquífero Serra Geral II, uma região de basalto menos fraturado, que apresenta menor produtividade aquífera.

Tais fatos são indicativos da coerência e confiabilidade do método, principalmente, para regiões de aquífero cristalino.

Embora a inspeção visual da separação de escoamento de base do rio Caverá (aquífero poroso) também tenha sido satisfatória, a recarga final é bastante inferior ao esperado, sendo inclusive inferior às recargas das demais bacias (de aquífero cristalino). Este é, sem dúvida, um resultado interessante, pois aponta a possibilidade de um comportamento contrário ao determinado simplesmente pela região geológica. A justificativa para uma recarga tão baixa pode estar relacionada à existência de condicionantes locais. Algumas questões como a ocorrência de silificação em zonas de arenito mais próximas às camadas basálticas (derrames vulcânicos) e que poderiam reduzir significativamente a porosidade do aquífero, ou ocorrência de solos muitos rasos que, saturados, contribuiriam diretamente para o escoamento, ou ainda, níveis elevados de recarga profunda e casos de compactação do solo poderiam influenciar tais resultados. O cálculo do coeficiente de escoamento (rela-

ção entre a vazão média dos rios e a precipitação média) foi realizado com o intuito de melhorar o entendimento em relação ao comportamento do rio Caverá.

**Tabela 17.** Coeficientes de Escoamento das Bacias

Rio	Vazão Média (mm/ano)	Precipitação Acumulada Média (mm/ano)	Coefficiente de Escoamento (Qmed/Pmed)
Conceição	737	1850	0,40
Comandaí	744	1850	0,40
Jaguarzinho	835	1850	0,45
Caverá	473	1550	0,31

O coeficiente de escoamento na bacia do rio Caverá é menor do que nas outras bacias, o que pode estar ocorrendo em função de uma menor precipitação média anual. Além disso, é possível que a bacia do rio Caverá seja uma área de recarga para um aquífero mais profundo, não conectado ao próprio rio Caverá.

Contudo, a confirmação destas hipóteses depende de outros estudos específicos não contemplados neste trabalho.

Em relação às recargas é interessante o fato de que as máximas recargas estimadas tenham ficado abaixo de um quinto da precipitação registrada em cada região, as respectivas reservas renováveis são bastante significativas.

A determinação das recargas aquíferas para as quatro bacias, Caverá (117 mm/ano), Comandaí (339 mm/ano), Conceição (338 mm/ano) e Jaguarzinho (220 mm/ano) possibilita a realização de uma série de análises e verificações essenciais para a boa gestão dos recursos hídricos locais.

No presente trabalho foi feito um levantamento da disponibilidade instalada em cada bacia. Constatou-se que, baseado nos dados do SIAGAS para as áreas de estudo (a montante das estações fluviométricas de referência), a projeção da disponibilidade instalada total corresponde a, no máximo, 13,5% (rio Comandaí) da reserva renovável. Para as bacias dos demais rios as estimativas ficam próximas dos 6%. Contudo, essa estimativa parece confiável apenas para o rio Comandaí, onde a 100% dos poços registrados contém dados de vazão de estabilização. Para os demais rios esta informação estava disponível apenas parcialmente: Conceição (48%), Jaguar e Caverá (10%).

Ainda, apenas no caso do rio Comandaí, a vazão de estabilização média condiz com as vazões médias disponíveis na literatura para as Sub-bacias e, regionalmente, para os aquíferos envolvidos.

Por isso, além das estimativas baseadas na disponibilidade de dados em cada área de estudo (denominadas estimativas “1” – Tabela 17) foram realizadas as estimativas denominadas 2, 3 e 4. As estimativas “2” são referentes às vazões médias de estabilização disponíveis para cada Sub-bacia, segundo levantamento realizado por Kirchheim & Agra (2011). As estimativas “3” são baseadas nas vazões médias de extração do aquífero, segundo a ANA (2005). Já a estimativa “4” se refere à vazão média de estabilização verificada por Kirchheim & Mattiuzi (2012) especificamente para a bacia do rio Conceição.

**Tabela 18.** Reservas Renováveis e Disponibilidades Instaladas

	BACIA											
	Comandaí		Conceição			Jaguarizinho			Caverá			
	1*	2**	1*	2**	4****	1*	2**	3***	1*	2**	3***	
Poços Cadastrados	18		46			30			23			
Poços com dados de vazão	18		22			3			3			
Projeção de Poços informais	162		414			270			207			
<b>Total de Poços</b>	<b>180</b>	<b>180</b>	<b>460</b>	<b>460</b>	<b>460</b>	<b>300</b>	<b>300</b>	<b>300</b>	<b>230</b>	<b>230</b>	<b>230</b>	
Média das vazões cadastradas	(m <sup>3</sup> /h)	24,1	19,0	4,0	21,3	9,0	4,7	17,0	13,8	3,9	27	13,8
Disponibilidade Instalada Total	(m <sup>3</sup> /h)	4332	3420	1832	9784	4140	1400	5100	4140	897	6210	3174
	(hm <sup>3</sup> /ano)	38,0	30,0	16,0	85,7	36,3	12,3	44,7	36,3	7,9	54,4	27,8
Reserva Renovável Estimada	(hm <sup>3</sup> /ano)	280,1	280,1	273,0	273,0	273,0	203,1	203,1	203,1	136,7	136,7	136,7
<b>Disponibilidade Instalada Total/ Reserva Renovável</b>		<b>13,5%</b>	<b>10,7%</b>	<b>5,9%</b>	<b>31,4%</b>	<b>1,3%</b>	<b>6,0%</b>	<b>22,0%</b>	<b>17,9%</b>	<b>5,7%</b>	<b>39,8%</b>	<b>20,3%</b>

\*Baseado em dados do SIAGAS (CPRM) para as áreas de estudo.

\*\* Baseado em dados do SIAGAS (CPRM) para: Sub-bacia do rio Ijuí (Aquífero de referência: Serra Geral I); Sub-bacia do rio Ibicuí, Jaguarizinho (Aquífero de referência: Serra Geral I), Caverá (Aquífero de referência: Botucatu); Sub-bacia do rio Turvo (Aquífero de referência: Serra Geral I). (Kirschheim & Agra, 2011)

\*\*\* Baseado na vazão média para o Sistema Aquífero Guarani. ANA (2005).

\*\*\*\*Baseado em dados do SIAGAS (CPRM) para a bacia do rio Conceição. (Kirschheim & Mattiuzi, 2012)

Vale ressaltar a metodologia utilizada para a estimativa do número total de poços em cada área de estudo baseada em Kirchheim (2011) que sugere o registro de apenas um poço a cada dez existentes. Ainda, dada a incerteza dessa projeção, recomenda-se cautela na interpretação dos resultados. Ao mesmo tempo em que pode haver superestimativa pode haver também uma subestimativa da disponibilidade instalada.

Assim reforça-se a importância da apresentação de estimativas baseadas em vazões médias de exploração oriundas de fontes e escalas diversas.

A Agência Nacional de Águas recomenda como valor inicial, na ausência de estudos específicos de impacto de extração de água que permitam exploração mais intensa, que sejam utilizados até 20% da recarga aquífera (ou reservas renováveis). Segundo a análise aqui apresentada os rios Caverá e Jaguarizinho merecem especial atenção, pois já estariam consumindo 39,8% e 22,0% de suas reservas renováveis respectivamente, segundo os dados disponíveis para as Sub-bacias (estimativas “2”) que parecem ser os dados de menor escala mais confiáveis. Essa situação é reforçada pelos resultados gerados a partir de dados regionais (baseado nos sistemas aquíferos – estimativas “3”), embora com menor criticidade, 20,3% e 17,9%, respectivamente.

Ainda, na escala regional, o rio Conceição também parece apresentar situação preocupante, 31,4% das reservas renováveis comprometidas. Contudo, para este rio há informação específica na literatura do valor médio das vazões de estabilização. Tal valor resulta em uma estimativa de 13,3% (disponibilidade instalada/reservas renováveis), portanto abaixo dos 20% estipulados pela ANA. Por isso, parece mais razoável considerar que o rio Conceição esteja aquém do nível de atenção.

Para o rio Comandaí os valores de vazões médias de estabilização convergem parecendo consolidar a utilização de cerca de 13% de suas reservas renováveis.

O relatório de Demanda e Disponibilidade de Recursos Hídricos da ANA (2005), aponta a região da Bacia do rio Uruguai entre as cinco regiões hidrográficas brasileiras mais críticas em relação ao balanço demanda/disponibilidade. Ainda, segundo a ANA (2002) a Sub-bacia Ibicuí (onde estão localizados os rios Jaguarizinho e Caverá) tem uma demanda superior à sua disponibilidade. O presente estudo reforça essas indicações ao mesmo tempo em que apresenta as diferenças e variações dentro da Bacia do rio Uruguai, reforçando a importância de estudos localizados e específicos.

## 7 CONCLUSÕES

A seguir é apresentado um resumo dos principais resultados apontados por este trabalho, em relação à aplicação e adequabilidade dos métodos de estimativa de recarga aquífera utilizados, à quantificação das recargas aquíferas realizadas, e às análises elaboradas a partir destas estimativas. Assim, são revisitados os objetivos iniciais deste trabalho. Além disso são apresentadas ponderações sobre a importância e representatividade dos resultados gerados.

Quanto aos métodos utilizados para quantificar o fluxo de base dos cursos d'água estudados é necessário ressaltar que os resultados obtidos neste trabalho indicam que os três valores do parâmetro BFI<sub>max</sub> predefinidos por Eckhardt (considerando rios nos E.U.A e na Alemanha) são insuficientes e incompatíveis com a realidade local. Apenas para o rio Jaguarizinho o valor predefinido forneceu uma estimativa razoável. O rio Jaguarizinho está inserido em uma zona de porosidade condicionada por fraturas, historicamente de baixa produtividade, o aquífero Serra Geral II. Tal fato sugere que o valor de BFI<sub>max</sub> predefinido por Eckhardt para rios perenes em aquíferos cristalinos seja mais adequado a essa realidade e possa então ser usado apenas em situações similares. Ainda, nos demais casos ocorrem graves desvios nas estimativas, para mais (Caverá) e para menos (Comandaí e Conceição).

Já a determinação de valores específicos do parâmetro BFI<sub>max</sub> através do filtro Inverso produz resultados visivelmente consistentes para os quatro casos estudados. Para os rios Comandaí e Conceição a estimativa de recarga aquífera final ficou em 18,3% e 18,8% da precipitação anual respectivamente, o que condiz com estimativa de 17% feita para o Aquífero Serra Geral pela Agência Nacional de Águas. O Aquífero Serra Geral II é sabidamente menos produtivo que o Serra Geral I. Neste contexto, a recarga aquífera de 12,2% da precipitação anual, calculada para o rio Jaguarizinho é bastante satisfatória. No caso do rio Caverá a relação recarga/precipitação de apenas 7,6% surpreendeu. Embora a inspeção visual do hidrograma apontasse comportamento consistente, por se tratar de aquífero poroso, esperava-se uma maior contribuição subterrânea à vazão do rio, superior inclusive, à dos demais rios. No entanto foi observado o contrário. A justificativa para uma recarga tão baixa pode estar relacionada a condicionantes locais como as levantadas na discussão dos

resultados (exemplo, coeficiente de escoamento mais baixo para o rio Caverá, indicando possibilidade de recarga profunda). Contudo, a confirmação destas hipóteses depende de outros estudos específicos não contemplados neste trabalho.

Todavia essa é uma variante interessantíssima pois indica que o método do filtro Inverso tem a vantagem de contemplar a possibilidade de gerar resultados contrários à hipótese inicial e que tal condição não é possível com o filtro de Eckhardt, devido a predefinição do valor de  $BF_{max}$ .

Vale ressaltar também que o método simplificado de estimativa de  $BF_{max}$  através da equação de Relação de Vazões ( $Q_{90}/Q_{50}$ ) gera resultados muito próximos aos gerados pelo filtro Inverso. Logo, este método demonstrou ser perfeitamente aplicável às diferentes bacias da região hidrográfica do rio Uruguai.

A determinação das recargas aquíferas para as quatro bacias, Caverá (117 mm/ano), Comandá (339 mm/ano), Conceição (338 mm/ano) e Jaguarzinho (220 mm/ano) possibilita a realização de uma série de análises e verificações, como a avaliação da relação disponibilidade instalada/reservas renováveis realizada neste trabalho, essenciais para a boa gestão dos recursos hídricos locais. Segundo a análise apresentada aqui apenas as bacias dos rios Caverá e Jaguarzinho merecem especial atenção, pois apresentam um comprometimento de suas reservas renováveis superior ao recomendado pela ANA.

Contudo, vale ressaltar a estimativa da disponibilidade instalada foi feita para um cenário que não é o real, pois o número de poços cadastrados no SIAGAS não representa a realidade. Assim, embora tenha sido realizada uma projeção de poços não registrados, pode haver variações consideráveis, para mais ou para menos.

Portanto é necessário interpretar os resultados como indicativos e, não, considerá-los como valores absolutos.

Ainda em relação às recargas aquíferas, é interessante ressaltar que nenhuma estimativa de recarga aquífera superou 20% da precipitação anual acumulada, nem mesmo a superestimativa do filtro de Eckhardt (com  $BF_{max}$  predefinido) para o rio Caverá. Este pode ser um patamar interessante a ser observado.

Finalmente, foi mostrado e avaliado neste estudo como o filtro de Eckhardt aliado à estimativa de  $BF_{max}$  específico proposta por Collischonn e Fan pode ser uma importante

ferramenta para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Além disso, representa um avanço importante para a separação de escoamento por filtros numéricos, principalmente pela sua flexibilidade e consistência.

## RECOMENDAÇÕES

É importante ressaltar que o cálculo de recarga aquífera a partir do fluxo de base é um método estimativo e que está sujeito a erros significativos (Domenico, 1972). Portanto recomenda-se cautela na interpretação dos resultados. Em alguns casos, a linearidade do modelo pode ser questionada (Wittenberg, 1999). Também é necessário avaliar uma série de condições iniciais tais quais, disponibilidade de dados, ausência de extração significativa de água subterrânea, ausência de regularização das vazões. Ainda, é necessário lembrar que há outros métodos mais precisos disponíveis, embora mais complexos. Todavia, esta técnica é uma maneira rápida e economicamente acessível de produzir dados iniciais que podem indicar ações prioritárias na gestão das bacias e que possam ser aprimorados por técnicas mais precisas conforme necessário. Desta forma, como trabalhos futuros, que serão realizados, pretende-se comparar as estimativas de recarga obtidas neste estudo com outras formas de estimativa, como balanço hídrico, para comparação dos resultados. Neste caso, espera-se que sejam obtidos valores semelhantes aos aqui encontrados.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAS. 2013. **Água Subterrânea – educação**. Disponível online em <http://www.abas.org/educacao.php>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. Indicadores de saneamento por regiões hidrográficas. Baseado nos dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico realizado pelo IBGE em 2000. Brasília, 2002.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil. Brasília, 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS . Hidroweb : Sistema de informações hidrológicas. Disponível em <http://www.hidroweb.ana.gov.br>. Acessado em 16 de abril de 2013.

ARNOLD, JG; ALLEN, PM. 1999. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records. JAWRA - AWRA V. 35, N.2, April.

BERTOL, G. A. AVALIAÇÃO DA RECARGA ANUAL NO AQUIFERO BAURU NO MUNICÍPIO DE ARAGUARI, MINAS GERAIS. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. 111 p. Belo Horizonte. 2007.

BERTOL , G. A.; CAMARGOS, C.C.; VELÁSQUEZ, L.N.M.; BRANCO, O.E.A; COTA, S.D.S. Aplicação do método do cálculo do balanço hídrico na avaliação da recarga no aquífero bauru em Araguari - MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14, 2006. Sao Paulo. *Anais...*Sao Paulo, 2006.

BONGANHA, C.A. 2005. A utilização da modelagem matemática como ferramenta para a gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos subterrâneos: uma proposta para o município de Araraquara, São Paulo. Dissertação de Mestrado. UNIARA. 124 p.

BORGHETTI, N.R.B.; BORGHETTI J.R.; ROSA FILHO, E.F. (Eds.) 2004. Aquífero Guarani a Verdadeira Integração dos Países do Mercosul . Curitiba, 214 p.

CHANG, H.K. 2001. Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani. GEF/Banco Mundial/OEA. Componente 3b:uso atual e potencial do aquífero Guarani-Brasil.

CHAPMAN, TG. 1991. Comment on 'Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses' by R. J. Nathan and T. A. McMahon. *Water Resources Research* **27**: 1783-1784.

CHAPMAN, T. 1999. A comparison of algorithms for stream flow recession and base flow separation. *Hydrological Processes* **13**: 1783-1784.



COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS (CPRM) 2012. Atlas Pluviométrico do Brasil. (Escala: 1:5.000.000). Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=1351&sid=9>>. Acessado em 07 de maio de 2013.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). Qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo. São Paulo – 2001 – 2003. CETESB, 2004a. 106 p.

COSTA, F.M. 2005. Análise por Métodos Hidrológicos e Hidroquímicos de Fatores Condicionantes do Potencial Hídrico de Bacias Hidrográficas – Estudo de Casos no Quadrilátero Ferrífero (MG) . Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia Universidade Federal de Ouro Preto, 147 p.

COSTA, W. D. Avaliação de reservas, potencialidade e disponibilidade de aquíferos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, (10.: 1998: São Paulo), Anais... São Paulo, ABAS, 1998. CD-ROM.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. Introduzindo Hidrologia. Disponível em: [http://galileu.iph.ufrgs.br/collischonn/apostila\\_hidrologia/apostila.html](http://galileu.iph.ufrgs.br/collischonn/apostila_hidrologia/apostila.html). Acesso em: 03 maio de 2013.

COLLISCHONN, W.; FAN, F. Defining parameters for Eckhardt's digital baseflow filter. *Hydrological Processes*, Wiley Online Library, DOI; 10.1002/hyp.9391, 2012.

CARDOSO, F. et al. Poços tubulares construídos no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15, 2008. Natal. *Anais...* Curitiba, 2008.

Caderno da Região Hidrográfica do Uruguai / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. – Brasília: MMA, 2006. 128 p. : il. color. ; 27cm

CHOW, VT; MAIDMENT, DR; MAYS LW. 1998. *Applied hydrology*. McGraw-Hill: Singapore; 572.

DEWANDEL, B.; LACHASSAGNE, P.; BAKALOWICZ, M.; WENG, P. H.; ALMALKI, A. Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs. Application to the Oman ophiolite had-rock aquifer. *Journal of Hydrology*, 274, p. 248-269, 2002.

DOMENICO, P. A.; SCHWARTZ, F. W. Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley & Sons, Singapore, 1990. p. 824.

DRUMOND, M.M.; RODRIGUES, P.C.H.; CAMARGOS, C.C.; MINARDI, P.S.P. 2005. Balanço Hídrico com base em medições de infiltração feitas com a Técnica de Traçadores: Um Estudo Realizado na Bacia Representativa de Juatuba – MG.

ECKHARDT K. 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Process* **19**: 507-515. DOI: 10.1002/hyp.5675.

FAN, F.M.; COLLISCHONN, W. Ferramenta Facilitadora do Trabalho com Dados Hidrológicos Disponibilizados pela ANA. Salão IC UNIPAMPA. 2009

FARR, T. G., et al. (2007), The Shuttle Radar Topography Mission, *Rev. Geophys.*, 45, RG2004, [doi:10.1029/2005RG000183](https://doi.org/10.1029/2005RG000183).

FEITOSA, F.A.C. 2000. Hidráulica de Poços. In: Feitosa F.A.C. & Manuel Filho J. (eds.) *Hidrogeologia Conceitos e Aplicações*. CPRM/REFO, LABHID-UFPE, Fortaleza, pp.: 243-292.

FENICIA, F; SAVENIJE; HHG; MATGEN, P; PFISTER, L. 2006. Is the groundwater reservoir linear? Learning from data in hydrological modelling. *Hydrological and Earth System Sciences* 10 :139-150.

FEPAM. 2003. Levantamento e Análise de Dados Secundários Relativos aos Meios Físico, Biótico e Socioeconômico da Bacia Hidrográfica dos Rios Turvo, Santa Rosa e Santo Cristo – Inventário dos Recursos Hídricos Superficiais e Subterrâneos da Bacia Hidrográfica dos rios Turvo, Santa Rosa e Santo Cristo. Disponível em [http://www.fepam.rs.gov.br/programas/monitoramento\\_uru.asp](http://www.fepam.rs.gov.br/programas/monitoramento_uru.asp).

FREIRE, C.C., PEREIRA, J.S., KIRCHHEIM, R. 1998. A Importância da gestão dos recursos hídricos subterrâneos. In: I Simpósio Internacional sobre Gestão de Recursos Hídricos. ABRH. Gramado. CDROM.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS (FGV) 1998. Plano Nacional de Recursos Hídricos.

GIANNINI, P.C.F. Depósitos e Rochas Sedimentares. In TEIXEIRA, Wilson et Ali. *Decifrando a Terra* (pg. 285-301). São Paulo: Oficina de Textos, 2000 ISBN [85-86238-14-7](https://www.isbn-international.org/number/85-86238-14-7).

GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL/ SEMA (2010). *Zoneamento Ambiental da Silvicultura*. Porto Alegre.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. 2000: Informações socioeconômicas: população, indicadores sociais, pesquisa nacional de saneamento básico. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>.

INCRA (1973). Levantamento e avaliação de recursos naturais, sócio-econômicos e institucionais do Rio Grande do Sul. Brasília, v. 1.

KIRCHHEIM, R. E.; AGRA, S. G. Diagnóstico hidrogeológico do Estado do RS: uma ferramenta para o plano estadual de recursos hídricos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 27 nov. - 01 dez. 2011, Maceió. **Anais...** Maceió: ABRH, dez. 2011.

KIRCHHEIM, R. E.; MATTIUZI, C. D. P. Diagnóstico hidrogeológico na bacia do Ijuí, RS: O SIAGAS como ferramenta de análise. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 17.; ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 18., 23-26 out. 2012, Bonito, MS. **Resumos Expandidos...** Bonito, MS: CBAS, out. 2012. p. 1-4.

LAROCQUE, M; FORTIN, V; PHARAND, MC; RIVARD, C. 2010. Groundwater contribution to river flows – using hydrograph separation, hydrological and hydrogeological models in a Southern Quebec aquifer. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 7: 7809–7838.

LEAL, A.S. 1999. As águas subterrâneas no Brasil. Ocorrências, disponibilidades e usos. O Estado das Águas no Brasil. (Série Estudos e Informações Hidrológicas e Energéticas. ÁGUA). ANEEL. Brasília. CDROM.

Lei Estadual Nº 10.350/94. GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. Disponível em: <http://www.legislacao.sefaz.rs.gov.br/Site/Document.aspx?inpKey=97721&inpCodDispositive=&inpDsKeywords=>. Acessado em 10 de abril de 2013.

LOURENCETTI, C. Herbicidas mais empregados no cultivo de cana-de-açúcar no município de Araraquara (SP): desenvolvimento e validação de método de quantificação e avaliação do potencial de lixiviação em solos argiloso e arenoso (área de regarga do sistema aquífero Guarani). Tese de Doutorado. UNESP – Instituto de Química de Araraquara. 2006. 155 p.

LYNE, VD; HOLLICK, M. 1979. Stochastic time-variable rainfall runoff modelling. Hydrology and Water Resources Symposium, Institution of Engineers Australia, Perth; 89-92.

MINARDI, P.S.P., Velásquez L.N.M., Bomtempo V.L. 2004. I Relatório de Avanço Técnico e Financeiro Apresentado à Secretaria Geral do Projeto Sistema Aquífero Guarani – SAG. UFMG e CDTN/CNEN, Belo Horizonte, MG, Brasil.

MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE/CNRH n.º 32/2003. Institui a Divisão Hidrográfica Nacional. Disponível em: [http://www.aesa.pb.gov.br/legislacao/resolucoes/cnrh/32\\_2003\\_divisao\\_hidrografica\\_nacional.pdf](http://www.aesa.pb.gov.br/legislacao/resolucoes/cnrh/32_2003_divisao_hidrografica_nacional.pdf). Acessado em 23 de maio 2013.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 16 jun. 2013.

MOURÃO, M. A. A. *Caracterização hidrogeológica do aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG*. Belo Horizonte: UFMG, 2007. 297p. (Tese de Doutorado).

REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. 1999. ÁGUAS DOÇES DO BRASIL Capital Ecológico, Uso e Conservação. Institutos de Estudos Avançados da USP, Academia Brasileira de Ciências, ed. Escrituras, São Paulo, 717 p.

REBOUÇAS, A.C. 1988. Groundwater in Brazil. Episodes, v. 11, n. 3, p. 209-214.

REBOUÇAS, A.C., 1976. Recursos hídricos da Bacia do Paraná. S.Paulo, SP. Tese de Livre Docência. IGC/USP, 143 p.

ROCHA, G., 1997. O Grande Manancial do Cone Sul. Estudos Avançados, USP. Vol.30, p.191-212.

ROSS, Jurandyr L. S. Geografia do Brasil. - 4. ed. 1 reimpr. - São Paulo: EDUSP, 2003.

SAMPER, C.F.J. 1998. Evaluación de la recarga por la lluvia mediante balances de agua: utilización, calibración e incertidumbres. Boletim Geológico y Minero, p 31-54.

SOPHOCLEOUS, M. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, **10**:52-67. 2002.

TUCCI, C.E.M. & CABRAL, J. 2003. Qualidade da Água Subterrânea. Centro de Gestão de Estudos Estratégicos. 53 p.

VASCONCELOS, S.M.S. 2005. Avaliação da recarga subterrânea através da variação do nível potenciométrico no Aquífero Dunas/Paleodunas , Fortaleza, Ceará. In: Revista Brasileira de Recursos Hídricos. 10 :49 – 56 p.

WAHNFRIED, I.; HIRATA, R. 2005. Comparação dos Métodos de Estimativa de Recarga de Aquíferos em uma Planície Aluvionar na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo). In: ABRH – Revista Brasileira dos Recursos Hídricos. 15 – 25 p.

WITTENBERG, H. 1999. Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes. *Hydrological Processes* **13**: 715-726.