

---

---

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

---

---

**CAMILA DALLA PORTA MATTIUZI**

**ESTIMATIVA DE RECARGA A PARTIR DA SEPARAÇÃO DE  
ESCOAMENTO DE BASE NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
IBICUÍ/RS**

Porto Alegre

Dezembro 2013



**CAMILA DALLA PORTA MATTIUIZ**

**ESTIMATIVA DE RECARGA A PARTIR DA SEPARAÇÃO DE ESCOAMENTO DE  
BASE NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IBICUÍ/RS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO  
APRESENTADO AO CURSO DE ENGENHARIA  
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
RIO GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO  
DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Orientador: Walter Collischonn

Coorientador: Roberto Kirchheim

Porto Alegre

Dezembro 2013

CAMILA DALLA PORTA MATTIUIZI

ESTIMATIVA DE RECARGA A PARTIR DA SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO DE BASE  
NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO IBICUÍ/RS

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em **11/12/2013** pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....

Prof. Pedro Antônio Roehe Reginato

.....

Eng. Karine Pickbrenner

.....

Msc. Fernando Mainardi Fan

Conceito: A

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus pela oportunidade.

Agradeço aos meus pais, Mauri e Regina, por todo incentivo, apoio e carinho durante esta jornada.

Agradeço ao Roberto Kirchheim por todos os ensinamentos e oportunidades, pelas conversas e orientações durante a realização deste trabalho, e principalmente pelo incentivo e apoio constantes.

Agradeço ao Professor Walter Collischonn pela orientação e pelos ensinamentos que possibilitaram a realização deste trabalho, e também pelo incentivo acadêmico-científico.

Agradeço ao Doutorando Fernando Fan pela orientação, pelas conversas e ensinamentos, e por ser um modelo a ser seguido.

Agradeço a todos os amigos e companheiros que estiveram presentes nesta jornada, pelo apoio, carinho e pelos momentos.

Agradeço a todos os professores pelo aprendizado que tornou possível a minha formação em Engenharia Ambiental.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas pelo ensino de qualidade.

Agradeço à Companhia de Pesquisa em Recursos Minerais pela oportunidade de estágio e de realização deste trabalho.

A resposta certa, não importa nada:  
o essencial é que as perguntas estejam certas.

*Mario Quintana*

## RESUMO

**Mattiuzi, C.D.P. Estimativa de Recarga a partir da Separação de Escoamento de Base na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí/RS.** 2013. 72p. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Ambiental – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este estudo se propõe a estimar as taxas de recarga aquífera na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí, localizada no Estado do Rio Grande do Sul, a partir da utilização do método de separação de escoamento de base, utilizando o filtro numérico de Eckhardt (2005) com dados de medição de vazão disponibilizados pela Agência Nacional de Águas. A partir dos resultados obtidos foi realizada uma comparação entre as taxas de recarga com as características geológicas, hidrogeológicas e tipologias de solo encontradas na Bacia do Rio Ibicuí. As taxas de recarga variaram entre 13% e 47%. A partir desta análise foram apontados diversos fatores que podem explicar as variações nas taxas de recarga nas sub-bacias da Bacia do Rio Ibicuí, como variações nas precipitações nas sub-bacias, heterogeneidade geológica e hidrogeológica, e composições distintas dos solos da região. Além disso, foi realizada uma comparação das medições de níveis d'água em piezômetros localizados na Bacia do Rio Ibicuí que apontou uma correlação entre os valores de precipitação, vazão e nível d'água medidos com os valores de vazão de base obtidos no presente estudo.

Palavras-chave: escoamento de base, filtro de Eckhardt, recarga aquífera.

## ABSTRACT

**Mattiuzi, C.D.P. Recharge Estimation from Base Flow Separation on the Hydrographic Basin of Ibicuí/RS.** 2013. 72p. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Ambiental – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

This study aims to estimate the rates of aquifer recharge in Ibicuí Basin, located in the state of Rio Grande do Sul, from the use of the method of base flow separation using the numeric filter of Eckhardt (2005 ) with flow measurement data available from the National Water Agency. The results obtained of recharge rates were compared with the geological, hydrogeological and soil types found in the River Basin Ibicuí characteristics. The recharge rates varied between 13% and 47%. From this analysis were pointed out several factors that might explain variations in recharge rates in the sub-basins of the Ibicuí Basin, as variations in rainfall in the sub-basins, geological and hydrogeological heterogeneity and different compositions of soils in the region. Furthermore, a comparison of measurements of water levels in piezometers located in Ibicuí Basin pointed out that a correlation between the amounts of precipitation, flow and water level measured values with the base flow values obtained in the present study.

Keywords: base flow, Eckhardt's filter, aquifer recharge.



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Região Hidrográfica do Rio Uruguai .....   | 23 |
| Figura 2. Agrupamentos Geológicos na Região da Bacia do Rio Ibicuí .....   | 31 |
| Figura 3. Demandas de Água Subterrânea na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí .....                                       | 32 |
| Figura 4. Localização das Sub-bacias e seus Exutórios .....  | 44 |
| Figura 5. Precipitação média na Bacia do Ibicuí e Isoietas .....   | 44 |
| Figura 6. Hidrograma Unitário do Posto Fluviométrico do Passo da Cachoeira .....                                       | 46 |
| Figura 7. Período de Recessão Escolhido da Estação do Passo da Cachoeira.....  | 46 |
| Figura 8. Hidrograma da Estação do Passo da Cachoeira: Vazão e Vazão de Base .....                                     | 46 |
| Figura 9. Distribuição das Taxas de Recarga nas Sub-bacias .....   | 48 |
| Figura 10. Sub-bacias e Agrupamento das Unidades Geológicas .....  | 49 |
| Figura 11. Mapa de Solos das Sub-bacias .....  | 54 |
| Figura 12. Imagens dos Piezômetros do RIMAS: a) Azevedo Sodré b) Passo da Cachoeira .....                              | 58 |
| Figura 13. Localização das Sub-bacias do Passo da Cachoeira e Azevedo Sodré, poços do RIMAS e Exutórios .....          | 58 |
| Figura 14. Comparação entre Vazão, Vazão de Base, Nível D'água e Precipitação na Sub-bacia do Azevedo Sodré.....       | 59 |
| Figura 15. Comparação entre Vazão, Vazão de Base, Nível D'água e Precipitação na Sub-bacia do Passo da Cachoeira ..... | 60 |
| Figura 16. Unidades Geológicas e Tipologia de Solo da Sub-bacia do Passo da Cachoeira.....                             | 62 |
| Figura 17. Unidades Geológicas e Tipologia de Solo da Sub-bacia do Azevedo Sodré.....                                  | 62 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1. Estações Fluviométricas Seleccionadas .....   | 35 |
| Tabela 2. Precipitação e Área das Sub-bacias Delimitadas .....  | 43 |
| Tabela 3. Resultados da Aplicação da Metodologia de Separação de Escoamento de Base .....   | 47 |
| Tabela 4. Resultados dos Cálculos de Taxa de Recarga, Evapotranspiração, Coeficiente de Escoamento e Porcentagens de Recarga para as Sub-bacias ..... | 48 |
| Tabela 5. Taxas de Recarga em Sub-bacias de Arcabouço Geológico Pouco Permeável .....   | 50 |
| Tabela 6. Taxas de Recarga em Sub-bacias de Arcabouço Geológico Medianamente Permeáveis .....   | 51 |
| Tabela 7. Taxas de Recarga em Sub-bacias de Arcabouço Geológico Permeável .....   | 52 |
| Tabela 8. Tipologia de Solo nas Sub-bacias .....  | 55 |

## **LISTA DE ANEXOS**

|   |    |
|---|----|
| ANEXO 1. Tipologias de solos no Rio Grande do Sul ..... | 70 |
| ANEXO 2. Mapa Geológico do Rio Grande do Sul .....      | 71 |
| ANEXO 3. Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul ..... | 72 |

# SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| 1. Introdução .....                                  | 14 |
| 1.2. Formulação da Questão de Estudo .....           | 15 |
| 2. Objetivo .....                                    | 16 |
| 3. Revisão Bibliográfica .....                       | 17 |
| 3.1. Demanda de água subterrânea .....               | 17 |
| 3.2. Recarga de Água Subterrânea .....               | 19 |
| 3.3. Métodos de Estimativa de Recarga .....          | 20 |
| 4. Área de Estudo.....                               | 23 |
| 4.1. Descrição Climática.....                        | 25 |
| 4.2. Descrição Geomorfológica .....                  | 25 |
| 4.3. Descrição dos Solos.....                        | 26 |
| 4.4. Descrição Geológica.....                        | 28 |
| 4.5. Descrição Hidrogeológica .....                  | 31 |
| 4.6. Seleção dos Postos Fluviométricos.....          | 34 |
| 5. Metodologia .....                                 | 36 |
| 5.1. Separação de Escoamento de Base .....           | 36 |
| 5.2. Dados Hidrológicos .....                        | 39 |
| 5.3. Delimitação das Bacias Hidrográficas .....      | 40 |
| 5.4. Taxa de Recarga Aquífera.....                   | 40 |
| 5.5. Precipitação Média nas Bacias.....              | 41 |
| 5.6. Informações de Solos.....                       | 41 |
| 5.7. Informações Geológicas.....                     | 41 |
| 5.8. Coeficiente de Escoamento .....                 | 42 |
| 5.9. Evapotranspiração .....                         | 42 |
| 6. Apresentação e Análise dos Resultados .....       | 43 |
| 6.1. Análise a partir do Agrupamento Geológico ..... | 49 |
| 6.2. Análise a partir da Tipologia de Solos .....    | 53 |

|   |    |
|---|----|
| 6.3. Análise da Variação do Nível D'Água..... | 57 |
| 7. Conclusões e Recomendações.....            | 63 |
| Referências Bibliográficas .....              | 66 |

## 1. Introdução

Os recursos hídricos representam fator fundamental para o desenvolvimento ambiental, social e econômico e, por esta razão, a compreensão do seu comportamento e dinâmica é imprescindível. O conhecimento detalhado das disponibilidades e demandas hídricas, bem como o estudo de suas interações, é essencial para um planejamento e gestão adequados, condição fundamental para seu uso sustentável.

Os recursos hídricos abrangem águas superficiais e subterrâneas: do volume total de água do planeta, 97,5% compõem os mares e oceanos, restando apenas 2,5% de água doce. Porém, deste total, 68,9% formam as calotas polares, geleiras e neves eternas, 0,9% corresponde à umidade do solo e pântanos, 0,3% aos rios e lagos, e os 29,9% restantes são águas subterrâneas. Desta maneira, do total de água doce disponível para consumo, descontando-se aquela presente nas calotas polares, geleiras e neves eternas, as águas subterrâneas representam um total de 96% (MMA, 2007).

A partir destas proporções fica evidente a importância que as águas subterrâneas detêm, desempenhando papel vital no abastecimento público e privado, suprindo as mais variadas necessidades de água em diversas cidades e comunidades, tanto no cenário internacional e, principalmente nacional. As águas subterrâneas também são fundamentais para manutenção de corpos d'água superficiais, pois a perenização da maior parte dos rios, lagos e pântanos depende da descarga de aquíferos, através dos fluxos de base (Hirata, Zobbi e Oliveira, 2010).

Os fluxos de base representam uma parcela do que na hidrologia clássica é denominado de parcela indireta do escoamento superficial, onde a parcela direta é materializada pelo escoamento superficial propriamente dito.

Um dos maiores desafios no que diz respeito ao estudo das águas subterrâneas envolve a quantificação das disponibilidades hídricas subterrâneas, ou seja, estimar a magnitude de suas reservas, sejam estas permanentes ou reguladoras (ditas renováveis). A identificação das parcelas direta e indireta do escoamento pode ser realizada através de métodos de separação de escoamento, que utilizam a análise das vazões em uma bacia ao longo do tempo. A parcela indireta do escoamento superficial, conforme visto, possui origem subterrânea e é de grande interesse, já que corresponde à capacidade de

recarga do aquífero (Dora, 2013). Estas recargas se equivalem às reservas renováveis de água subterrânea, as quais podem ser interpretadas como sendo uma parte ou até mesma a totalidade da parcela explotável dos aquíferos.

Sendo assim, a estimativa de recarga de água subterrânea é um fator chave em estudos de disponibilidade, gestão e modelagem dos recursos hídricos subterrâneos. Por exemplo, o conhecimento da taxa de alimentação de um sistema aquífero é um subsídio necessário para a tomada de decisões visando o aproveitamento sustentável das águas subterrâneas, procurando assim, evitar efeitos ambientais indesejados decorrentes, por exemplo, da superexploração dos aquíferos (Eilers, 2004).

A compreensão das recargas constitui-se em uma espécie de elo, capaz de aproximar as abordagens metodológicas da hidrologia superficial e subterrânea, atualmente divergentes em grande parte, contribuindo de fato para melhor definir a tão desejada gestão integrada.

## **1.2. Formulação da Questão de Estudo**

O interesse em estudar a relação e interação entre as águas superficiais e subterrâneas tem aumentado, tanto no cenário acadêmico como nos estudos regionais que alicerçam a gestão pública dos recursos hídrico. O método de separação de escoamento de base é baseado na premissa de que existe um fluxo no qual os cursos d'água são em parte responsáveis pela recarga subterrânea, e que os aquíferos contribuem parcialmente com a vazão dos rios, através das descargas de água subterrânea.

A partir da separação do escoamento superficial e de base é possível realizar uma estimativa da recarga aquífera. Esta informação é essencial para uma caracterização dos aquíferos que possibilite uma gestão adequada deste recurso, concomitante com o manancial superficial, pois a superexploração de recursos hídricos subterrâneos afeta, não somente a oferta de água subterrânea e os custos relacionados à sua extração, mas também as reservas superficiais.

Tendo em vista a relevância de um conhecimento aprofundado acerca da recarga aquífera em uma bacia hidrográfica, conforme descrito anteriormente, este trabalho visa

estimar a taxa de recarga aquífera na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí utilizando o método de separação de escoamento de base. A perspectiva de se considerar a interação que um manancial exerce sobre o outro é essencial para o gerenciamento dos recursos hídricos dentro de uma visão integrada do ciclo hidrológico na bacia.

Ainda, este trabalho visa comparar os resultados obtidos a partir da separação de escoamento de base com as características físicas da bacia, almejando explicar de forma integrada os processos hídricos que ocorrem na interface entre a água superficial e a água subterrânea.

A gestão dos recursos hídricos no Brasil obedece a uma série de Leis e Resoluções, contidas na Política Nacional dos Recursos Hídricos, a começar pela Lei as Águas Nº. 9.433 da República Federativa do Brasil de 1997. Nesta legislação considera-se a bacia hidrográfica como unidade de gestão dos recursos hídricos. Também se reconhece que a captação de águas subterrâneas deve obter a autorização para que seja feita sua instalação e operação. As normas culminam na Resolução nº. 15 de 11 de janeiro de 2001, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH, que reconhece a indissociável interação entre água superficial e subterrânea, necessitando de uma gestão integrada (Martelli, 2012).

## **2. Objetivo**

O objetivo do presente trabalho é fornecer subsídio para uma gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos no contexto da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí através do dimensionamento das taxas de recargas aquíferas utilizando o método de separação de escoamento de base, relacionando estes resultados com as unidades geológicas e tipologias de solos encontradas na região.

Este estudo também se propõe a avaliar a metodologia da separação do escoamento de base utilizando o Filtro de Eckhardt (Eckhardt, 2005) com as considerações propostas por Collischonn e Fan (2012) aplicada à Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí.



### **3. Revisão Bibliográfica**

Os recursos hídricos superficiais representam importante reserva de água, sendo possivelmente a fonte de mais fácil captação para uso em atividades humanas. Entretanto, esses mananciais representam parcela reduzida na distribuição global de água – apenas cerca de 0,9% do total de água doce. As águas subterrâneas, por outro lado, constituem um recurso estratégico no caso de escassez de outras fontes, correspondendo a cerca de 30% do total de água doce no planeta (Martelli, 2012).

As águas subterrâneas e superficiais não atuam de forma isolada, mas sim apresentam interações em diversos âmbitos, de maneira que o uso ou a contribuição de um recurso tem, normalmente, efeito sobre o outro. A extração de água de corpos hídricos superficiais pode provocar a diminuição da contribuição superficial ao aquífero; da mesma forma, todo volume de água subterrânea retirado de um aquífero implica, também, em uma redução da sua contribuição aos corpos hídricos superficiais. Por isso, um profundo entendimento dos princípios básicos de interações entre água subterrânea e superficial é necessário para o gerenciamento efetivo dos recursos hídricos (Martelli, 2012).

#### **3.1. Demanda de água subterrânea**

No Brasil, o crescimento das explorações e o aumento constante do consumo de água subterrânea se deve, principalmente, à crescente demanda de água, ao comprometimento e à poluição das reservas superficiais, ao melhor conhecimento dos aquíferos, embora ainda apresente lacunas, e ao aprimoramento da indústria de perfuração de poços (Martelli, 2012).

Avaliações preliminares apresentadas em Hirata, Zobbi e Oliveira (2010) contabilizam que os aquíferos servem ao abastecimento de 30-40% da população do país, sobretudo em cidades de médio e pequeno porte. No mesmo estudo várias capitais são também relacionadas como, por exemplo, Natal, Fortaleza, Belém, Maceió, Recife, Porto Velho e São Paulo, onde o abastecimento é feito, em alguma proporção, pelo recurso subterrâneo. No Estado de São Paulo, 70% dos núcleos urbanos são abastecidos

total ou parcialmente pelas águas subterrâneas; no semi-árido nordestino, as comunidades rurais dependem fundamentalmente das águas subterrâneas, assim como a irrigação no oeste da Chapada do Apodi, entre os estados do Ceará e do Rio Grande do Norte.

No Brasil a água proveniente de fontes subterrâneas supre as mais variadas necessidades residenciais, industriais e rurais, sendo utilizada no setor de serviços, irrigação agrícola, lazer, entre outros. Além disso, as águas subterrâneas são responsáveis pelo turismo através das águas termais ou minerais; assim como pelo suprimento do forte e crescente mercado de água mineral e potável de mesa engarrafada (Hirata *et al.*, 2010).

O aumento significativo da demanda e exploração de água subterrânea se fez possível devido, principalmente, a fatores econômicos (o verdadeiro custo da água subterrânea é geralmente baixo com relação aos benefícios econômicos diretos obtidos do seu uso); tecnológicos (progresso do conhecimento científico na ocorrência, movimento e exploração da água subterrânea); de segurança (possibilidade de enfrentar a variabilidade da precipitação); e institucionais (a exploração da água subterrânea pode ser facilmente realizada por usuários individuais, indústrias ou pequenos municípios) (Martelli, 2012).

As reservas renováveis de água subterrânea no Brasil, ou seja, suas recargas efetivas, alcançam 42.289 m<sup>3</sup>/s e correspondem a 24% do escoamento dos rios em território nacional (vazão média anual de 179.433 m<sup>3</sup>/s) e 49% da vazão de estiagem (considerada como a vazão de estiagem com 95% de permanência) (Hirata *et al.*, 2010).

Em relação às demandas da água subterrânea, há incertezas em relação ao número de poços existentes no Brasil. Diversos estudos foram realizados utilizando dados de órgãos gestores estaduais de recursos hídricos e da Agência Nacional de Águas e foram estimados a existência de cerca de 416 mil poços perfurados no Brasil desde 1958, dos quais 63 mil estariam fora de operação (aproximadamente 15% do total). A média atual de poços perfurados é de 10.800 por ano (Hirata *et al.*, 2010; Cardoso *et al.*, 2008).

Em função dessa crescente demanda, as águas subterrâneas estão sob forte pressão. A superexploração, ou seja, a extração de água em volume maior do que o reposto pela natureza, pode provocar a redução da quantidade de água que abastece os

rios, a seca de nascentes, o esgotamento dos reservatórios, entre tantos outros impactos negativos. Somam-se a esses os problemas relacionados com a contaminação das águas pelas atividades humanas (ação antrópica). Portanto, é essencial que haja um sistema adequado de gestão e uso das águas subterrâneas (MMA, 2007).

### **3.2. Recarga de Água Subterrânea**

A disponibilidade futura da água subterrânea depende essencialmente de um bom sistema de gerenciamento deste recurso. Para isso, são necessárias diversas informações, algumas mais facilmente determinadas, como clima, precipitação, taxa de extração, os principais usos, etc; e outras que ainda não são totalmente compreendidas, como as taxas de recarga. A taxa de recarga subterrânea pode ser definida como a quantidade de água que contribui para o aumento ou a reposição das reservas dos aquíferos (Healy, 2010).

A compreensão das taxas e dos locais de recarga é fundamental para o conhecimento aprofundado dos fluxos de água subterrânea; questão que está estritamente relacionada com a contaminação dos mananciais aquíferos. O estudo da recarga aquífera pode auxiliar na tomada de decisão de disposição de resíduos, implantação de indústrias e no gerenciamento ambiental da área. Em geral existe uma relação direta entre o movimento do contaminante em direção ao aquífero com o aumento das taxas de recarga (Healy, 2010). Ou seja, áreas com altas taxas de recarga estão associadas com uma maior vulnerabilidade do aquífero em questão.

O conhecimento das taxas de recarga também é essencial para a construção de modelos de fluxo subterrâneo. Estes modelos necessitam de diversas variáveis, mas são excelentes ferramentas para o estudo de cenários de extração de água subterrânea bem como a vulnerabilidade de aquíferos, podendo também ser utilizado em casos de contaminação aquífera.

A recarga aquífera pode ocorrer através de mecanismos “difusos”, nos quais a recarga ocorre em uma grande área em resposta a infiltração de água proveniente de eventos de precipitação; e mecanismos “focados” nos quais a recarga é resultado do movimento da água de rios, canais e lagos em direção ao aquífero (Healy, 2010).

Da mesma forma que os cursos d'água são responsáveis pela recarga subterrânea, também existe o fluxo inverso, no qual o aquífero contribui com a vazão dos rios, através da descarga de água subterrânea (Martelli, 2012). Portanto, mesmo existindo diversos meios que a água percorre até a calha do rio, e não sendo possível separar totalmente esses meios, é comum separarmos o escoamento dos rios em dois componentes: direto (de origem superficial) e indireto (de origem subterrânea) (Collischonn e Fan, 2012). A seguir são descritos brevemente alguns métodos de separação de escoamento, objetivando a identificação de ambas as parcelas direta e indireta.

### **3.3. Métodos de Estimativa de Recarga**

Existem diversas metodologias para estimar a taxa de recarga aquífera, e todas elas requerem um amplo conhecimento sobre a área de estudo, já que tal processo é influenciado por diversos fatores, entre eles: clima, geologia, solos, topografia, vegetação e hidrologia, entre outros. Estes fatores trazem variáveis essenciais para o processo de estimativa de recarga, como a quantidade de chuvas, tipo e uso de solo, formações geológicas e aquíferos presentes na região, tipo de vegetação e uso do solo e finalmente, presença de cursos d'água e outros mananciais. A seguir estão descritos brevemente alguns métodos de estimativa de recarga mais comumente utilizados.

- Método da Variação do Nível d'Água (NA): este método é baseado na premissa que o aumento no nível da água subterrânea em aquíferos não confinados são causados pela chegada de água à zona saturada do aquífero (Healy, 2010). Para o uso deste método deve-se fazer medições do NA em poços de monitoramento, sendo que a diferença entre os níveis mais elevados e mais baixos da superfície potenciométrica corresponde à recarga. Bons resultados são obtidos em áreas de NA rasos, já que possibilitam uma rápida elevação com a precipitação (Wahnfried e Hirata, 2005). Este método pode não ser apropriado se a taxa de retirada de água da zona saturada não for suficientemente mais lenta que a taxa de recarga de água. Este método também é sensível, pois o nível d'água também pode variar em função de outros fatores, como irrigação de áreas próximas, bombeamento de água, mudança na vegetação do local, entre outros.

- Métodos Químicos – Traçadores: Traçadores são amplamente utilizados pois fornecem estimativas quantitativas e qualitativas da recarga, identificam as zonas de recarga e também estimam a velocidade do fluxo da água, o que dá informações da dispersão hidrodinâmica da água subterrânea. Normalmente são utilizados como traçadores íons, isótopos, gases e o calor (Healy, 2010). Esta técnica utiliza uma grande variedade de elementos químicos para caracterizar o fluxo de água na zona não saturada. Os chamados traçadores podem ser divididos em: (i) históricos, ou seja, análise de assinaturas decorrentes de um evento particular, por exemplo, testes nucleares; (ii) ambientais, entre eles, cloretos, nitratos, isótopos estáveis; e, (iii) artificiais, que são aplicados diretamente no local investigado, por exemplo, uso de tritium injetado. Os problemas associados a estes métodos estão relacionados com as incertezas decorrentes da amostragem e interpretação dos resultados, bem como, pelas inúmeras simplificações conceituais adotadas (Eilers, 2004).

- Balanço Hídrico: técnica de balanço hídrico considera os principais processos hidrológicos como entradas e saídas de um balanço volumétrico. Estas variáveis são baseadas nos principais processos físicos controlando o conteúdo volumétrico de um dado volume de solo durante um dado período de tempo (Eilers, 2004).

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). Os principais componentes do balanço hídrico são: (i) água total armazenada no solo e o déficit de água no solo; (ii) precipitação, escoamento superficial direto e infiltração; (iii) evapotranspiração potencial e evapotranspiração efetiva em função da disponibilidade de água no solo; (iv) o conceito de armazenamento temporário nas camadas superficiais do solo; e, (v) a drenagem de água da zona de solo, ou a recarga potencial (Eilers, 2004).

- Separação do escoamento de base: este método utiliza os dados de séries históricas de vazão para determinar as parcelas direta e indireta do escoamento, a partir da análise do hidrograma e da aplicação de filtros numéricos. Estes filtros são algoritmos que calculam a separação do escoamento a partir de dados de vazão, sendo facilmente automatizados.

Diversos filtros foram propostos ao longo dos anos; uma das maiores contribuições para o estudo do uso de filtros para a separação do escoamento de base foi dada por Eckhardt (2005), que desenvolveu uma fórmula geral, da qual os outros filtros tornam-se apenas casos especiais. Esta fórmula geral tem como parâmetro o BFI<sub>max</sub> (índice máximo de escoamento de base), o qual possui valores pré-definidos propostos por Eckhardt, que são definidos de acordo com as características geológicas e da drenagem da bacia hidrográfica (Collischonn e Fan, 2012).

Collischonn e Fan (2012) propuseram novas formas de estimativa do parâmetro BFI<sub>max</sub>, dentre elas o método baseado na relação das vazões Q<sub>90</sub>/Q<sub>50</sub>. Este método foi aplicado para 15 bacias hidrográficas localizadas nas áreas central e sul do Brasil e foi obtida uma boa correlação; dessa forma, foi desenvolvida uma equação de correção do valor do BFI<sub>max</sub>. Uma descrição mais detalhada acerca deste método será realizada na seção da Metodologia deste trabalho.

## 4. Área de Estudo

A área de estudo deste trabalho é a região da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí (BHib), que está inserida na Região Hidrográfica do Rio Uruguai (RHU), conforme a Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, CNRH n.º 32/2003, base do Plano Nacional de Recursos Hídricos. A RHU possui 174.533 km<sup>2</sup>, correspondendo a 2% do território brasileiro, e abrange os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina; juntamente com as Regiões Hidrográficas do Paraná e do Paraguai forma a Bacia do Prata. A população total da região em 2010, segundo o IBGE, era de aproximadamente 3,92 milhões de habitantes (ANA, 2012).

A Região Hidrográfica do Rio Uruguai foi dividida em quatro sub-bacias de nível 1, são elas Uruguai Alto, Uruguai Médio, Ibicuí e Negro; estas quatro sub-bacias foram sub-divididas em 10 unidades (sub-bacias de nível 2). A sub-bacia de nível 1 do Rio Ibicuí foi dividida nas sub-bacias do Rio Santa Maria e sub-bacia Uruguai 3 (Ibicuí), ambas de nível 2, como pode ser visto na Figura 1 (MMA, 2006).

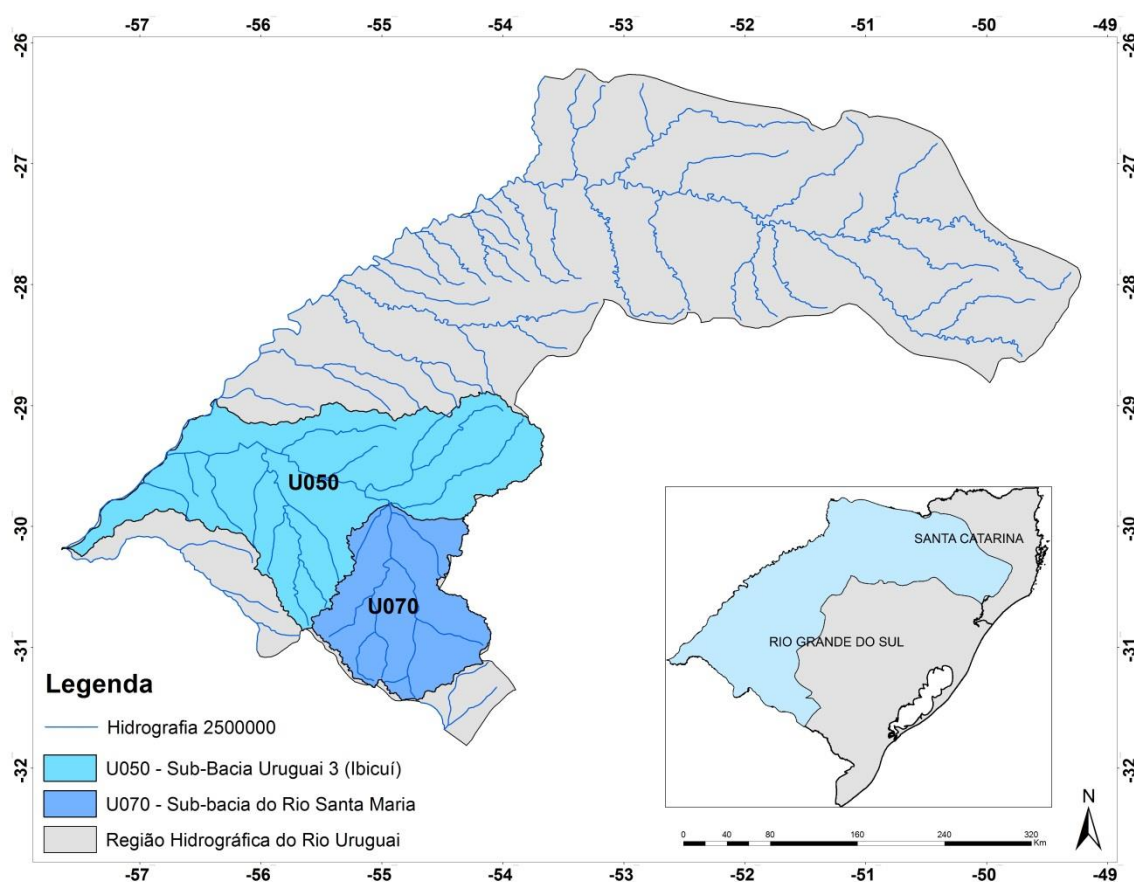


Figura 1. Região Hidrográfica do Rio Uruguai

A Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí possui uma área de drenagem de 47.320km<sup>2</sup>, e contém 29 municípios, totalizando uma população de 921.000 habitantes. Trata-se de uma bacia bem característica do médio Uruguai, com rios de Campanha, que foi subdividida em duas, de acordo com os dois grandes rios da bacia, como foi dito anteriormente. A seguir será feita uma breve descrição das duas sub-bacias da BHib (MMA, 2006; Profill, 2012):

- Sub-bacia do Rio Santa Maria (unidade U070): ocupa uma área de 15.784km<sup>2</sup>. Nesta bacia destaca-se a utilização majoritária dos recursos hídricos para irrigação no cultivo de arroz, o que tem gerado conflitos com o abastecimento público, principalmente em ocasiões de estiagens extremas. Destaca-se a existência de um plano de desenvolvimento para a bacia, baseado na construção de operação de um conjunto de barramentos para regularização de vazões para irrigação (MMA, 2006).
- Sub-bacia Uruguai 3 (Ibicuí) (unidade U050): ocupa uma área de 31.536km<sup>2</sup>, esta unidade abrange um conjunto de contribuintes do rio Ibicuí, além do próprio. Todos tem utilização predominante para a irrigação no cultivo arroz; os principais rios são: Ibicuí-Mirim, Toropi, Jaguari, Miracatu e Itu (pela margem direita); e Ibiratpuitã, Inhanduí e Ibirocaí (pela margem esquerda). A bacia não apresenta conflitos tão graves quanto os conflitos da bacia do Rio Santa Maria, uma vez que ocorre uma menor concentração de uso e uma maior disponibilidade hídrica (MMA, 2006).

Quatro tipologias quanto ao uso do solo e cobertura vegetal predominam na BHib: agropecuária (46%), campo (38%), mata ciliar (6,5%) e orizicultura (6,7%). Os principais usos consuntivos de água na bacia são: abastecimento público, criação animal, irrigação e abastecimento industrial. As demandas totais variam sazonalmente em função da irrigação do arroz (que ocorre nos meses de novembro a fevereiro); a demanda para a irrigação representa 98% do valor máximo da demanda. Os principais usos não-consuntivos na bacia são: a pesca, a mineração, a geração de energia e os balneários. No que se refere às águas subterrâneas, há ainda uma grande parcela a ser utilizada (apenas 15% das disponibilidades são utilizadas atualmente), configurando o seu caráter estratégico (Profill, 2012).



#### **4.1. Descrição Climática**

O clima na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí é classificado como Cfa e Cfb, segundo a classificação climática de Köppen. Em ambos os casos comporta-se como uma região de Clima Temperado, onde a temperatura do mês mais frio oscila entre -3°C a 18°C, apresentando chuvas em todas as estações.

Nas áreas de relevo mais baixo, próximas ao Rio Uruguai, onde a temperatura do mês mais quente é superior a 22°C, o clima é classificado como subtropical – Cfa; nas áreas onde a temperatura do mês mais quente é inferior a 22°C, ou seja, nas partes altas da bacia, o clima é classificado como temperado – Cfb. A precipitação média na bacia é de 1540mm/ano (MMA, 2006).

#### **4.2. Descrição Geomorfológica**

O Projeto Radam Brasil, incorporado pelo IBGE em 1986, foi o trabalho mais relevante realizado acerca da geomorfologia do Rio Grande do Sul. De acordo com esse projeto, a Bacia do Rio Ibicuí encontra-se em duas unidades geomorfológicas distintas, a Depressão Periférica do RS e o Planalto da Serra Geral. (Robaina *et al.*, 2010)

A unidade da Depressão Periférica do RS forma uma faixa leste-oeste no estado e representa uma área deprimida formada pelo contato entre os terrenos de rochas sedimentares e as rochas cristalinas mais coesas. As altitudes são inferiores a 200 metros com substrato formado por uma sequência de coberturas sedimentares da Bacia do Paraná de origem Mesozóica, por vezes, recobertos pelos depósitos recentes Quaternários. A Depressão Periférica é subdividida em:

- Depressão do Ibicuí: localizada na porção oeste da Depressão Periférica do RS, com processos geomorfológicos controlados pela drenagem do Rio Ibicuí e seus afluentes, atuando sobre um substrato de rochas sedimentares de diferentes tipos, com predomínio de arenitos. Nessa unidade ocorrem amplas e alongadas formas de topos convexos, regionalmente, conhecidas como coxilhas onde os processos erosivos são significativos (Robaina *et al.*, 2010).

- Planalto das Missões e Planalto da Campanha: ocorre exclusivamente no oeste do RS, ocupando toda a metade ocidental da Bacia do Ibicuí. Essa região caracteriza-se pela morfologia plana, sub-horizontalizada, com caimento suave para oeste em direção ao Rio Uruguai. Os fenômenos de erosão e movimentos de massa são generalizados e traduzidos pela ocorrência de sulcos, ravinas e voçorocas. O risco de desertificação é expressivo, especialmente associado ao arenito da Formação Botucatu.

A unidade do Planalto da Serra Geral é a mais expressiva na Bacia do Ibicuí, compondo as porções norte e oeste da bacia. Constitui-se numa área com altitudes que variam entre 100 e 500 metros. Apresenta sua origem ligada ao vulcanismo que cobriu os sedimentos da Bacia do Paraná no final do Mesozóico. É subdividida em:

- Planalto das Missões: compreende a porção norte da Bacia do Ibicuí com altitudes entre 180 e 500 metros constituindo-se numa porção elevada em relação às áreas próximas, delimitada por escarpas íngremes. Apresenta superfícies levemente onduladas que correspondem aos topos regionais pertencentes a resquícios de uma superfície de aplanamento. As litologias predominantes são constituídas por derrames de rochas vulcânicas ácidas e básicas da Formação Serra Geral. (Robaina *et al.*, 2010)
- Planalto da Campanha: ocorre na porção oeste da Bacia do Ibicuí e apresenta um relevo ondulado, com altitudes inferiores a 300 metros, decaindo de forma gradativa em direção a calha do rio Uruguai, situado a oeste. Esse compartimento apresenta menor número de derrames em relação ao Planalto das Missões, tendo como consequência menores altitudes e amplitudes das vertentes, proporcionando uma transição gradual para a Depressão do Ibicuí. A pouca espessura dos derrames e o desgaste das camadas superiores possibilita o afloramento de arenitos em algumas porções, observados também, na base de morros testemunhos (Robaina *et al.*, 2010).

### **4.3. Descrição dos Solos**

Existem diversos tipos de solo presentes no Rio Grande do Sul; sua formação é decorrente da combinação de vários fatores como o material de origem, clima, relevo,

entre outros. Através do Mapa de Solos do Brasil escala 1:5.000.000, disponível no site do IBGE, foi possível determinar os solos presentes na área da Bacia do Rio Ibicuí (IBGE, 2013). No ANEXO 1, está apresentado o mapa do RS com os solos, obtido a partir do mapa de solos do Brasil. Uma breve descrição de cada tipologia de solo é apresentada, a seguir.

- Argissolo vermelho Distrófico: os argissolos são profundos, variam de bem a imperfeitamente drenados, podendo apresentar de 8 a 15% de cascalho na sua textura. Possuem coloração avermelhada ou amarelada e um elevado teor de argila nos horizontes superficiais, o que garante alguma porosidade, mas baixas transmissividades. Ocorrem em relevo ondulado e são suscetíveis a erosão; são de ocorrência generalizada no Rio Grande do Sul, estando presentes inclusive na Depressão Central (Reinert *et al.*, 2007; CPRM, 2010).
- Chernossolo ebânico Órtico: os chernossolos são solos rasos a profundos, normalmente escuros e pouco coloridos, bem a imperfeitamente drenados. Apresentam razoáveis teores de matéria orgânica e argilominerais, possuindo um grau de intemperização baixo a intermediário. Esse tipo de solo é principalmente encontrado na Serra do Sudeste (CPRM, 2010).
- Latossolo vermelho Distrofíco: os latossolos são solos em avançado estágio de intemperização, bem drenados, profundos a muito profundos. Possuem pouco ou nenhum incremento de argila; os latossolos distróficos apresentam baixa saturação por bases e baixo teor de ferro. Estes são originados de sedimentos mais arenosos com materiais de alteração do basalto. As maiores extensões de latossolos ocorrem na região do Planalto e no Alto Uruguai (CPRM, 2010).
- Neossolo litólico Eutrófico: os neossolos são solos de formação recente, rasos a profundos, e possuem limitações no armazenamento de água. São desenvolvidos a partir de basaltos e possuem coloração escura, ocorrem principalmente em relevos suaves na fronteira oeste do RS. São moderadamente suscetíveis a erosão (Reinert *et al.*, 2007; CPRM, 2010).
- Nitossolo vermelho Eutrófico: os nitossolos são solos em avançado estágio de intemperização (processo de ferralitização), são normalmente profundos. Podem ser argilosos ou muito argilosos, o que garante uma baixa transmissividade. Ocorrem em relevos suaves a ondulado, principalmente nas regiões do Planalto

e das Missões até o Alto Uruguai, geralmente associados aos latossolos (CPRM, 2010).

- Planossolo háplico Eutrófico: os planossolos são solos imperfeitamente ou mal drenados, pouco porosos, medianamente profundos e encontrados em áreas de várzea com relevo plano a suavemente ondulado. Possuem coloração acinzentada nos horizontes superficiais e amareladas nos mais profundos. É originado a partir de siltitos e argilitos (folhelhos). São moderadamente suscetíveis à erosão; ocorrem principalmente na Depressão Central (Reinert *et al.*, 2007; CPRM, 2010).
- Plintossolo háplico Distrófico: são solos de drenagem moderada a imperfeita até mal drenados; os plintossolos háplicos não apresentam o horizonte B textural. Sua ocorrência está relacionada a áreas de baixada com relevo plano, bem como posições de transição entre várzeas e o início de coxilhas (CPRM, 2010).

#### **4.4. Descrição Geológica**

A bacia hidrográfica do rio Ibicuí apresenta características um pouco diferenciadas das demais, tendo em vista a natureza do relevo. A maior parte do curso do Rio Ibicuí abrange terrenos paleozóicos sedimentares da bacia do Paraná, tendo seu curso médio inferior capeamento pelas rochas da Formação Serra Geral, de pouca consistência (Viera, 1984). O alagamento das margens, várzeas e campos de pastagens é uma decorrência do baixo declive, que gera escoamentos mais lentos. Em períodos de cheias, o rio se torna navegável em quase toda a sua extensão. Uma descrição mais aprofundada da geologia da bacia será feita a seguir.

A geologia da BHb foi descrita, principalmente, com base no Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul, escala 1:750.000, elaborado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2010), conforme o ANEXO 2.

A geologia da área da Bacia do Ibicuí é composta, da base para o topo da coluna estratigráfica, pelo pacote sedimentar gonduânico correspondente à Formação Pirambóia, do Grupo Passa Dois; as Formações Sanga do Cabral, Santa Maria e Caturrita, do Grupo Rosário do Sul; a Formação Guará, e a Formação Botucatu. Essas formações de rochas sedimentares são capeadas, em parte, por sequências vulcânicas da

Formação Serra Geral, do Grupo São Bento, além de sedimentos da Formação Tupaciretã e depósitos aluvionares quaternários distribuídos ao longo de drenagens (CPRM, 2010).

Para a realização deste trabalho de estimativa de recarga a partir da separação do escoamento de base, foram agrupadas as geologias que apresentavam características semelhantes de composição, porosidade e transmissividade, entre outros fatores. A seguir é apresentada uma breve descrição geológica dos agrupamentos realizados, conforme pode ser visto na Figura 2.

- Aluviões Quaternários: Os depósitos quaternários referem-se a sedimentos aluvionares do tipo fluvial anastomosado, que ocorrem ao longo dos principais cursos d'água. Esses sedimentos apresentam frações granulométricas cascalhosas, arenosas e argilosas, semiconsolidados e inconsolidados.
- Arenitos Permianos: constituído principalmente pela Formação Rio Bonito; suas litologias são representadas por arenitos finos a médios, cinza e esbranquiçados, intercalados com camadas de siltitos argilosos, carbonosos de cor cinza-escuro, sendo aflorante em extensas áreas. A deposição da Formação Rio Bonito nessa área deu-se em ambiente continental transicional, litorâneo e marinho raso para o topo durante o período Permiano (Soares, 2009).
- Arenitos: Constituídos principalmente pela Formação Botucatu, que ocorre de forma espalhada na bacia, ocupando a porção central da mesma. De Idade Jurássica, é formada em ambiente continental eólico de clima desértico, sendo representada por campos de paleodunas compostas por arenitos finos a grossos, normalmente bimodais, com grãos bem arredondados e com alta esfericidade. O contato inferior com o embasamento é discordante.
- Coberturas Cretássicas: constituídas pela formação Tupanciretã e formação Santa Tecla. A Formação Tupanciretã ocorre de forma restrita no município homônimo, ao norte da porção oriental da bacia. Os sedimentos afloram sem continuidade física e encontra-se em contato discordante sobre as efusivas da Formação Serra Geral. Representa arenitos de granulação fina a média e mal classificados, além de arenitos conglomeráticos, conglomerados basais e finas camadas de argila. Apresentam-se geralmente maciços, mas podem apresentar estratificação plano-paralela e cruzada do tipo fluvial.

- Derrames Vulcânicos: são constituídos pela Formação Serra Geral, Fácies Gramado, Caxias e Alegrete. A Formação Serra Geral é predominante na área da bacia do Ibicuí. Essas rochas são produto de um importante evento de magmatismo basáltico; compreende um conjunto de rochas vulcânicas desde básicas até ácidas, com espessuras mais significativas, da ordem de 800 metros, cobrindo, aproximadamente, metade da superfície do estado do Rio Grande do Sul (Roisenberg e Viero, 2000). A Fácies Alegrete, presente na porção ocidental da bacia é representada por derrames de composição intermediária a ácida, variando entre andesitos e riodacitos com estruturas de fluxo e autobrechas no topo e na base. A Fácies Gramado ocorre, principalmente, ao norte da porção oriental e com ocorrência mais restritas na porção central da bacia. É representada por derrames basálticos granulares de textura fanerítica fina a porfírica, apresentando intercalações com os arenitos da Formação Botucatu. A Fácies Caxias ocupa exclusivamente a área norte da porção oriental da bacia, representando derrames de rochas ácidas acamadadas de matriz afanítica com fenocristais de plagioclásio e clinopiroxênio, com zonas vesiculares apresentando vesículas estiradas e vidro vulcânico maciço. Essas rochas estão posicionadas estratigraficamente acima das rochas básica.
- Embasamento cristalino: Compreende as rochas pré-cambrianas ígneas e metamórficas.
- Pelitos Permeanos: são constituídos pelo Grupo Passa Dois, que ocupa uma pequena área ao sul da porção oriental da região em estudo. Esta formação pode ser dividida em três associações de fácies: lençóis eólicos, depósitos de dunas e depósitos interdunas (Dias, 2006). No conjunto é representada por arenitos e arenitos argilosos com pouca cimentação, cuja ocorrência é limitada ao sul da Bacia do Paraná.
- Pelitos Triássicos: formados pelo Grupo Rosário do Sul, que é constituído por depósitos continentais Permo-Triássicos, sendo composto pelas formações Sanga do Cabral e Santa Maria. A Formação Sanga do Cabral ocupa a porção central e oriental da bacia, principalmente nos municípios de Mata e São Vicente do Sul. Apresentando idade triássica, essa formação é constituída na base por conglomerados intraformacionais e arenitos conglomeráticos, mal selecionados, com estratificação cruzada acanalada e planar de pequeno a médio porte,

associados a estas unidades ocorrem arenitos finos com laminação plano-paralela. A Formação Santa Maria ocorre restrita a borda leste da bacia no município de Santa Maria. Apresenta idade triássica e possui duas porções distintas: a porção basal e é constituída por arenitos feldspáticos de canais fluviais de granulometria grossa a média e elevada porosidade, enquanto que a porção de topo compreende litofácies pelíticas de planícies de inundação formado por siltitos, maciços a pouco laminados (Nanni, 2008).

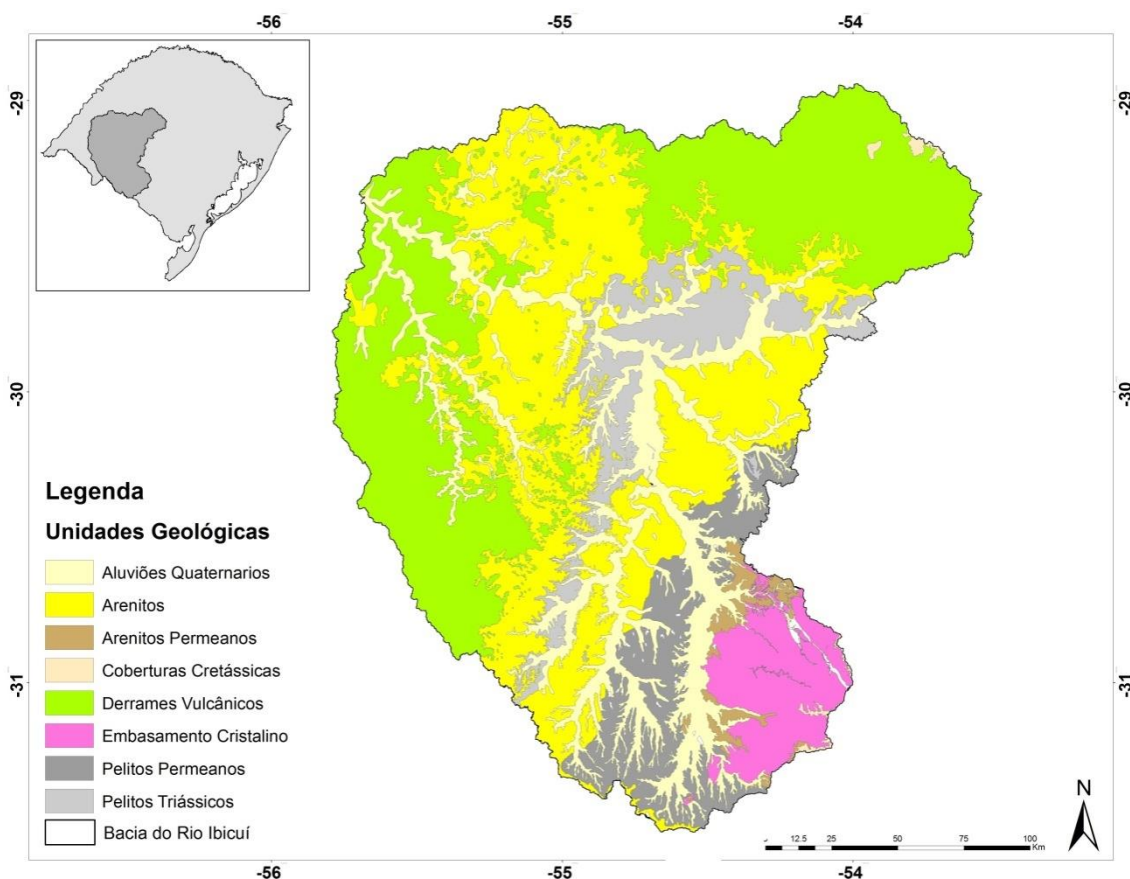


Figura 2. Agrupamentos Geológicos na Região da Bacia do Rio Ibicuí

#### 4.5. Descrição Hidrogeológica

No contexto do RS a BHib apresenta um total de 1.189 poços de captação de água subterrânea, sendo estes muito produtivos e de grandes capacidades específicas. Em toda sua extensão o Sistema Aquífero Guarani ocorre de forma confinada e/ou aflorante, formando zonas de recarga e descarga regional. Este fato lhe confere expressivo potencial hídrico e um caráter estratégico regional. As principais demandas

de água subterrânea na BHib estão relacionadas ao abastecimento doméstico urbano e rural, conforme ilustra a Figura 3. Destaca-se o expressivo uso da água para irrigação (4% do total das demandas) proporção maior do que o observado para o restante do RS. Próximo aos centros urbanos, como o município de Alegrete, as proporções de uso industrial são maiores. As sub-bacias de montante da BHib evidenciam um perfil de uso mais associado a pequenas propriedades rurais (Kirchheim, Mattiuzi e Figueira, 2013).

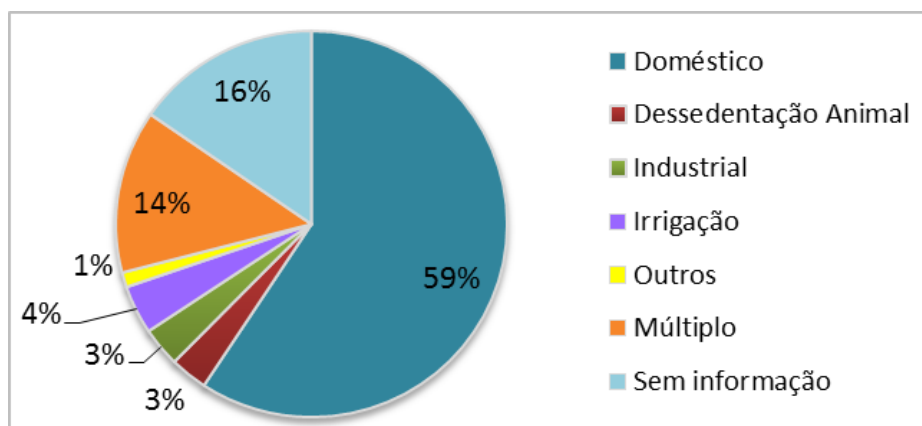


Figura 3. Demandas de Água Subterrânea na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí

O mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul escala 1:750.000 foi desenvolvido pela CPRM em 2005 a partir de diversas fontes de informações, como artigos, teses e dissertações somadas às informações do cadastramento de poços de água subterrâneas (SIAGAS). Neste projeto os aquíferos do estado foram separados conforme a porosidade e a potencialidade para a ocorrência de águas subterrâneas, e então classificados em seis grupos (CPRM, 2010).

Na bacia hidrográfica do rio Ibicuí estão presentes todos os grupos de aquíferos do Estado, como pode ser visto no mapa apresentado no ANEXO 3. A seguir será realizada uma breve descrição de cada unidade aquífera.

- Grupo 1. Aquíferos com alta a média possibilidade para águas subterrâneas em rochas e sedimentos com porosidade intergranular: corresponde a 6.145km<sup>2</sup> da área da bacia, ou seja, 15%. Este grupo de aquíferos é composto pelos sistemas aquíferos Botucatu/Guará 1 (restrito à zona oeste do estado, composto por arenitos finos, quartzosos, róseos a avermelhados, apresentando intercalações pelíticas e cimento argiloso na unidade Guará; na área de afloramento suas



capacidades específicas variam de 1 a 3 m<sup>3</sup>/h/m, na porção confinada pelas rochas vulcânicas a capacidade específica ultrapassa 4m<sup>3</sup>/h/m podendo a chegar em 10 m<sup>3</sup>/h/m), Santa Maria (restrito à região central do estado, composto por arenitos grossos a conglomeráticos na base, lamitos avermelhados, siltitos e arenitos finos a médio no topo; as capacidades específicas variam de 0,5 a 1m<sup>3</sup>/h/m nas áreas de afloramento, podendo chegar a 4m<sup>3</sup>/h/m nas áreas confinadas) (CPRM, 2010).

- Grupo 2. Aquíferos com média a baixa possibilidade para águas subterrâneas em rochas e sedimentos com porosidade intergranular: correspondem a 12.928km<sup>2</sup> da área da bacia estudada, ou seja, 31%. Este grupo é composto pelos sistemas aquíferos Botucatu/Guará 2 (ocorre na fronteira oeste do estado, é composto predominantemente por arenitos finos a médios, róseos a avermelhados, com intercalações siltico-arenosas; as capacidades específicas são normalmente inferiores a 0,5 m<sup>3</sup>/h/m), Sanga do Cabral/Pirambóia (ocorre desde a fronteira com o Uruguai até a região de Taquari, é composto por camadas siltico-arenosas avermelhadas, com matriz argilosa, arenitos finos a muito finos, com cimento calcífero; suas capacidades específicas variam entre 0,5 a 1,5 m<sup>3</sup>/h/m), Palermo/Rio Bonito (composto por arenitos finos a médios, cinza a esbranquiçados, intercalado com camadas de siltito argilosos e carbonosos, de cor cinza escura; apresenta capacidades específicas médias inferiores a 0,5 m<sup>3</sup>/h/m) (CPRM, 2010).
- Grupo 3. Aquíferos com alta a média possibilidade para águas subterrâneas em rochas com porosidade por fraturas: corresponde a 1454km<sup>2</sup> da área da bacia, ou seja, 3%. É formado pelo sistema aquífero Serra Geral 1 (ocorre no centro-oeste do Planalto Sul-Riograndense, é composto por rochas basálticas amigdaloides e fraturadas, capeadas por espesso solo avermelhado; suas capacidades específicas variam muito, predominando valores de 1 a 4m<sup>3</sup>/h/m) (CPRM, 2010).
- Grupo 4. Aquíferos com média a baixa possibilidade para águas subterrâneas em rochas com porosidade por fraturas: na bacia em estudo, ocupa uma área de 13.679km<sup>2</sup>, ou seja, 33% da área total. É formado pelo sistema aquífero Serra Geral 2 (este sistema está presente na porção oeste do estado, junto ao Rio Uruguai, na região central e também no planalto; é formado por riolitos, riodacitos e basaltos; a capacidade específica é normalmente inferior a 0,5m<sup>3</sup>/h/m, embora na região oeste do estado possa chegar a 2m<sup>3</sup>/h/m; possui

pouca espessura de solo e manto de alteração, apresentando alta vulnerabilidade a contaminação das águas subterrâneas) (CPRM, 2010).

- Grupo 5. Aquíferos limitados de baixa possibilidade para água subterrânea em rochas com porosidade intergranular ou por fraturas: corresponde a uma área de 5.512km<sup>2</sup>, ou seja, 13% da bacia estudada. É composto pelo sistema aquífero Embasamento Cristalino 2 (sua litologia são granitos, gnaisses, andesitos, xistos, filitos e calcários metamorfizados, que estão, localmente, afetadas por fraturas e falhas; geralmente apresentam capacidades específicas inferiores a 0,5m<sup>3</sup>/h/m).
- Grupo 6. Aquíferos praticamente improdutivos em rochas com porosidade intergranular ou por fraturas: corresponde a uma área de 2.215 km<sup>2</sup> da bacia, ou seja, 5%. São compostos pelo sistema aquífero Basalto/Botucatu (localizado na fronteira oeste, são áreas desfavoráveis ao armazenamento de água subterrânea devido a sua condição topo estrutural – basaltos sobre o Arenito Botucatu) (CPRM, 2010).

#### **4.6. Seleção dos Postos Fluviométricos**

Para o presente trabalho foram selecionados 15 postos fluviométricos da Agência Nacional de Águas localizados na bacia do rio Ibicuí, que possuíam uma longa série de dados de medição de vazão (ANA, 2013). Estes dados foram utilizados para a delimitação das bacias hidrográficas e para a aplicação do filtro de separação de escoamento de base. Na Tabela 1 estão listados os postos utilizados.

A partir da obtenção das séries de vazão foi realizada uma análise do histórico de medição destes dados; é importante ressaltar que os dados apresentam-se consistidos até o ano de 2009, a partir desse ano ainda estão no estado “bruto”.

Tabela 1. Estações Fluviométricas Seleccionadas

| Código   | Nome                       | Latitude (Y) | Longitude (X) | Histórico | Status     | Rio                  | Município        | Responsável | Operadora | Altitude (m) | Área de Drenagem (km <sup>2</sup> ) |
|----------|----------------------------|--------------|---------------|-----------|------------|----------------------|------------------|-------------|-----------|--------------|-------------------------------------|
| 76750000 | Alegrete                   | -29,7686     | -55,7872      | 1940-2013 | ativa      | Rio Ibirapuitã       | Alegrete         | ANA         | CPRM      | 66,18        | 5940                                |
| 76370000 | Azevedo Sodré              | -30,1056     | -54,6375      | 2004-2013 | ativa      | Rio Cacequi          | São Gabriel      | ANA         | CPRM      | 100          | 1220                                |
| 76085000 | Cachoeira dos Cinco Veados | -29,4289     | -54,0542      | 1976-2013 | ativa      | Rio Toropi           | Santa Maria      | ANA         | CPRM      | 160          | 1540                                |
| 76460000 | Ernesto Alves              | -29,3625     | -54,7353      | 1958-2013 | ativa      | Rio Jaquarizinho     | Jaguari          | ANA         | CPRM      | 300          | 926                                 |
| 76500000 | Jacaqua                    | -29,6853     | -55,1981      | 1942-2013 | ativa      | Rio Ibicui           | Alegrete         | ANA         | CPRM      | 20           | 27800                               |
| 76440000 | Jaguari                    | -29,4989     | -54,6892      | 1941-2013 | ativa      | Rio Jaguarí          | Jaguari          | ANA         | CPRM      | 100          | 2320                                |
| 76560000 | Manoel Viana               | -29,5942     | -55,4814      | 1967-2013 | ativa      | Rio Ibicui           | Manoel Viana     | ANA         | CPRM      | 80           | 29400                               |
| 76650000 | Passo da Cachoeira         | -29,3094     | -55,7058      | 1962-2013 | desativada | Rio Itu              | Manoel Viana     | ANA         | CPRM      | 60           | 2560                                |
| 76260000 | Passo do Guterres          | -30,8444     | -54,5442      | 1976-1989 | desativada | Arroio Taquarembó    | Lavras do Sul    | ANA         | ANA       | 160          | 576                                 |
| 76742000 | Passo do Osório            | -29,9503     | -55,6025      | 1977-2013 | ativa      | Arroio Cavera        | Alegrete         | ANA         | CPRM      | 100          | 1160                                |
| 76700000 | Passo dos Britos           | -29,9731     | -55,7478      | 1971-2000 | desativada | Rio Ibirapuitã       | Alegrete         | ANA         | ANA       | 100          | 3200                                |
| 76800000 | Passo Mariano Pinto        | -29,3092     | -56,0547      | 1944-2013 | ativa      | Rio Ibicui           | Itaqui           | ANA         | CPRM      | 60           | 42500                               |
| 76300000 | Ponte Ibicui da Armada     | -30,2808     | -54,9031      | 1967-2013 | ativa      | Rio Ibicui Da Armada | Rosário do Sul   | ANA         | CPRM      | 80           | 6010                                |
| 76310000 | Rosário do Sul             | -30,2428     | -54,9169      | 1967-2013 | ativa      | Rio Santa Maria      | Rosário do Sul   | ANA         | CPRM      | 100          | 12100                               |
| 76100000 | Vila Clara                 | -29,5561     | -54,3422      | 1941-2013 | ativa      | Rio Toropi           | São Pedro do Sul | ANA         | CPRM      | 80           | 2790                                |

## 5. Metodologia

Para a aplicação do filtro de separação de escoamento de base e a posterior análise dos resultados são necessários os dados referentes às séries históricas de vazão, bacias hidrográficas delimitadas, dados de precipitação média no local, informações acerca da geologia, hidrogeologia e tipologia de solos da área estudada e um software de cálculo. A seguir estão descritos mais detalhadamente as etapas do processo.

### 5.1. Separação de Escoamento de Base

Como foi dito anteriormente na Revisão Bibliográfica, a metodologia utilizada no presente estudo para realizar a separação de escoamento de base será a aplicação do Filtro Digital Recursivo de Eckhardt. Este método foi escolhido por diversos fatores, dentre eles a simplicidade de sua aplicação, já que é necessário um software simples de cálculo, a disponibilidade de dados de postos fluviométricos com longas séries históricas, e também a existência de casos de sucesso na utilização deste método, como Collischonn e Fan (2012) e Dora (2013).

O Filtro de Eckhardt é um algoritmo utilizado para calcular o fluxo de base em cursos d'água que ele faz a separação da vazão do rio em duas componentes: escoamento superficial (direto) e escoamento de base (indireto), conforme a Equação 1 (Eckhardt, 2005).

$$y_i = f_i + b_i \quad \text{Equação 1}$$

Onde

y = vazão do rio

f = escoamento superficial

b = escoamento de base

i = intervalo de tempo

Eckhardt (2005) demonstrou que diversos filtros poderiam ser equacionados de forma genérica (Equação 2) com uma restrição de que a vazão de base em qualquer tempo deve ser menor ou igual a vazão total do rio no mesmo tempo, ou seja,  $b_i \leq y_i$ .

$$b_i = A \times b_{i-1} + B \times y_i \quad \text{Equação 2}$$

Onde

$b$  = escoamento de base

$y$  = vazão do rio

$A$  e  $B$  = parâmetros de cálculo

$i$  = intervalo de tempo

De acordo com Eckhardt (2005), os parâmetros  $A$  e  $B$  apresentados na Equação 2 podem ser expressos em função da constante de recessão “ $a$ ” e do parâmetro BFI<sub>max</sub> (Base Flow Index maximum – Índice máximo de Escoamento de Base).

A constante de recessão “ $a$ ” está relacionada com a descarga em um intervalo de tempo definido em períodos de recessão; nestes períodos não há entrada por precipitação e, portanto, o escoamento superficial (direto) é nulo, havendo uma descarga natural do aquífero. Dessa maneira a recarga aquífera pode ser estimada através destas análises de recessões (Domenico e Schwartz, 1990).

Para o cálculo da constante de recessão “ $a$ ” deve-se inicialmente analisar o hidrograma do posto fluviométrico em busca de períodos característicos de recessão. O intervalo de tempo e seus respectivos valores de vazão são utilizados no cálculo da constante do período característico “ $k$ ”, conforme Equação 3. Em seguida o valor de “ $k$ ” é utilizado para o cálculo da constante “ $a$ ” (Equação 4). Neste trabalho foi determinado um período de recessão para cada posto fluviométrico, baseado na premissa de que as recessões são periódicas.

$$k = \frac{-\Delta t}{\ln\left(\frac{Q_{(t+\Delta t)}}{Q_{(t)}}\right)} \quad \text{Equação 3}$$

$$a = e^{\frac{-\Delta t}{k}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde

$k$  = constante do período característico

$Q$  = vazão

$a$  = constante de recessão

O parâmetro BFI (Base Flow Index – Índice de Escoamento de Base) é a razão, a longo prazo, entre o fluxo de base e a vazão total, conforme a Equação 5. Já o  $BFI_{max}$  é um fator que restringe o BFI e é utilizado para o cálculo do algoritmo. É importante ressaltar que este parâmetro pode ser influenciado pela geologia local (Collischon & Fan, 2012).

$$BFI = \frac{\sum_{i=1}^N b_i}{\sum_{i=1}^N y_i} \quad \text{Equação 5}$$

Onde

BFI = Índice de Escoamento de Base

$b$  = escoamento de base

$y$  = vazão do rio

Eckhard (2005) definiu as Equações 6 e 7 para a determinação dos valores de  $B$  e  $A$ , respectivamente:

$$B = \frac{(1-a) \times BFI_{max}}{1-a \times BFI_{max}} \quad \text{Equação 6}$$

$$A = \left( \frac{1-BFI_{max}}{1-a \times BFI_{max}} \right) \times a \quad \text{Equação 7}$$

Dessa forma, a equação de Eckhardt para o filtro digital tem a seguinte forma (Equação 8), sujeito a  $b_i \leq y_i$ .

$$b_i = \frac{(1-BFI_{max}) \times a \times b_{i-1} + (1-a) \times BFI_{max} \times y_i}{1-a \times BFI_{max}} \quad \text{Equação 8}$$

Eckhardt (2005) propõe valores predefinidos para o parâmetro BFI<sub>max</sub>, que são definidos a partir da natureza do curso d'água (perene ou efêmero) e da característica hidrogeológica do aquífero (poroso ou confinado). Estes valores foram determinados a partir da comparação de resultados de separação de escoamento de base por diversos métodos em diversos locais.

Collischonn & Fan (2012) propuseram outra forma para estimar o parâmetro BFI<sub>max</sub>, baseada na relação das vazões Q<sub>90</sub>/Q<sub>50</sub>. Esta razão foi utilizada para calcular o BFI<sub>max</sub> em 15 estações localizadas na região sul do Brasil, sendo obtidos resultados adequados. A partir disso foi realizada uma correlação e então obtida uma Equação (9) que relaciona o BFI<sub>max</sub> com a razão Q<sub>90</sub>/Q<sub>50</sub>; sujeito a BFI<sub>max</sub><1.

$$BFI_{max} = 0.8344 \frac{Q_{90}}{Q_{50}} + 0.2146 \quad \text{Equação 9}$$

Esta equação está ajustada para as regiões sul e central do Brasil; como a nossa área de estudo está localizada na região sul, este método foi utilizado na estimativa do parâmetro BFI<sub>max</sub> no presente estudo.

## 5.2. Dados Hidrológicos

Inicialmente foi realizada uma pesquisa pelo SNIRH (Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos) no qual foram selecionadas as estações fluviométricas da região hidrográfica da Bacia do Rio Ibicuí que continham uma série de dados históricos longa. Os dados de vazão foram obtidos a partir do Portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas, no qual é possível realizar o download dos arquivos correspondentes a cada estação selecionada.

Os arquivos de dados de vazão foram manipulados com os softwares Manejo de Dados Hidroweb 4.0 (Fan & Collischonn, 2009), o qual permitia a conversão dos dados para um formato mais acessível; e o Comparador de Hidrogramas (Fan & Collischonn,

2009) que permitia a visualização dos hidrogramas referentes a cada estação e facilitava a busca por períodos de recessão.

Os cálculos referentes a aplicação dos filtros foram realizados utilizando o software *Microsoft Excel*. Foram inicialmente calculadas as vazões (Q90, Q50, Qmín, Qmáx, Qmed) através das séries histórias diárias para cada estação fluviométrica selecionada. A seguir selecionava-se um período de recessão no hidrograma, para o cálculo da Constante de Período “k” e a Constante de Recessão “a”. A partir das vazões Q90 e Q50 obteve-se o valor de BFI<sub>max</sub> conforme Equação 9. Finalmente foi calculada a vazão de base através do Filtro de Eckhardt (Equação 8). Os valores médios da vazão de base obtidos para cada estação fluviométrica foram posteriormente utilizados no cálculo da Taxa de Recarga Aquífera.

### **5.3. Delimitação das Bacias Hidrográficas**

As bacias hidrográficas foram delimitadas utilizando a ferramenta ArcHydro do software ArcMap (HGE, 2013). Foram utilizados como exutórios das bacias os postos fluviométricos selecionados para este estudo. Inicialmente foi obtido um MDT (Modelo Digital de Elevação) no website do Instituto de Ecologia da UFRGS (Labgeo, 2013). Para a delimitação da bacia foi realizado o seguinte procedimento: Fill Sinks, Flow Direction, Flow Accumulation, Stream Definition e finalmente Batch Subwatershed Delimitation. Em seguida foi utilizada a ferramenta Dissolve para desagrupar as sub-bacias. Foi utilizada a função Calculate Geometry para a obtenção das áreas das bacias.

### **5.4. Taxa de Recarga Aquífera**

Para o cálculo da Taxa de Recarga Aquífera (mm/ano) são necessários os valores da vazão de base média para cada estação fluviométrica e a área de drenagem em cada sub-bacia, de acordo com a Equação 10.

$$TR = \frac{\bar{b}}{A} \times 1000 \times 31622400 \quad \text{Equação 10}$$



Onde

TR = taxa de recarga aquífera (mm/ano)

b = média dos valores de vazão de base ( $m^3/s$ )

A = área da bacia ( $m^2$ )

1000 = fator de conversão de m para mm

31622400 = fator de conversão de segundos para ano

### **5.5. Precipitação Média nas Bacias**

Para a obtenção do valor médio de precipitação das bacias delimitadas foi o utilizado também o software ArcMap. Inicialmente foi obtido o arquivo shapefile do Mapa de Isoietas de precipitações Médias Anuais do Brasil no Atlas Pluviométrico do Brasil, que apresenta os resultados de precipitação média para o período de 1977 a 2006 (30 anos) (CPRM, 2013). A partir deste arquivo shapefile foi criado um arquivo raster utilizando a ferramenta Topo do Raster. A seguir foi utilizada a função Extract by Mask para obter a precipitação média anual em cada bacia hidrográfica anteriormente delimitada.

### **5.6. Informações de Solos**

O mapa de solos do Brasil foi obtido a partir do site do IBGE e manipulado utilizando o software ArcMap. Para selecionar as tipologias de solo presentes na Bacia do Rio Ibicuí, foi utilizada a ferramenta Clip; a área de cada solo presente em cada sub-bacia foi obtida utilizando a função Calculate Geometry.

### **5.7. Informações Geológicas**

Como foi descrito anteriormente na Área de Estudo, as formações geológicas da região em estudo foram agrupadas em classes de acordo com a semelhança das suas propriedades hidrogeológicas. Este processo foi realizado utilizando o software

ArcMap. Depois de realizado este agrupamento, foi utilizada a ferramenta Clip para selecionar as unidades geológicas de cada bacia. Em seguida a área referente a cada geologia presente nas bacias foi obtida a partir da função Calculate Geometry.

## 5.8. Coeficiente de Escoamento

Foi realizado o cálculo do Coeficiente de Escoamento de cada sub-bacia para possibilitar uma comparação com os resultados obtidos de taxa de recarga aquífera. O Coeficiente de Escoamento foi obtido a partir da Equação 11, como pode ser visto a seguir:

$$CE = \frac{Q_{med}}{P_{med}} \quad \text{Equação 11}$$

Onde

CE = coeficiente de escoamento

Q med = vazão média (mm/ano)

P med = Precipitação média (mm/ano)

## 5.9. Evapotranspiração

Os valores de evapotranspiração (Et) para cada sub-bacia da Bacia do Rio Ibicuí foi realizado conforme a Equação 12:

$$Et = \frac{1-CE}{P_{med}}$$

Onde

CE = coeficiente de escoamento

P med = Precipitação média (mm/ano)

## 6. Apresentação e Análise dos Resultados

O filtro de Eckhardt para a separação de escoamento de base foi aplicado em 15 sub-bacias da Bacia do Rio Ibicuí. A seguir serão apresentados os resultados da aplicação dos filtros, e então será realizada a análise dos mesmos.

Como foi descrito anteriormente na Metodologia, o software ArcMap foi utilizado para a delimitação das bacias hidrográficas, para a obtenção da precipitação média em cada bacia, a partir da interpolação de isoietas, e para a separação dos tipos de geologias e tipos de solo em cada bacia. Na Tabela 2 estão apresentados os resultados destes procedimentos: estação fluviométrica utilizada como exutório, área da bacia, precipitação média; as áreas correspondentes a cada geologia e tipologia de solos serão apresentadas na próxima seção. Na Figura 4 pode-se visualizar as 15 sub-bacias delimitadas neste trabalho, na Figura 5 está apresentada a precipitação média na bacia do Ibicuí.

Tabela 2. Precipitação e Área das Sub-bacias Delimitadas

| Código   | Bacia                      | P<br>(mm/ano) | A<br>(km <sup>2</sup> ) |
|----------|----------------------------|---------------|-------------------------|
| 76750000 | Alegrete                   | 1545          | 5943                    |
| 76370000 | Azevedo Sodré              | 1607          | 1220                    |
| 76085000 | Cachoeira dos Cinco Veados | 1794          | 1542                    |
| 76460000 | Ernesto Alves              | 1893          | 922                     |
| 76500000 | Jacaqua                    | 1634          | 27373                   |
| 76440000 | Jaguari                    | 1840          | 2326                    |
| 76560000 | Manoel Viana               | 1638          | 28922                   |
| 76650000 | Passo da Cachoeira         | 1776          | 2564                    |
| 76742000 | Passo Do Osório            | 1566          | 1165                    |
| 76700000 | Passo dos Britos           | 1527          | 3197                    |
| 76800000 | Passo Mariano Pinto        | 1632          | 42108                   |
| 76300000 | Ponte Ibicui da Armada     | 1495          | 6004                    |
| 76310000 | Rosário do Sul             | 1502          | 12092                   |
| 76100000 | Vila Clara                 | 1801          | 2798                    |
| 76260000 | Passo dos Guterres         | 1569          | 574                     |

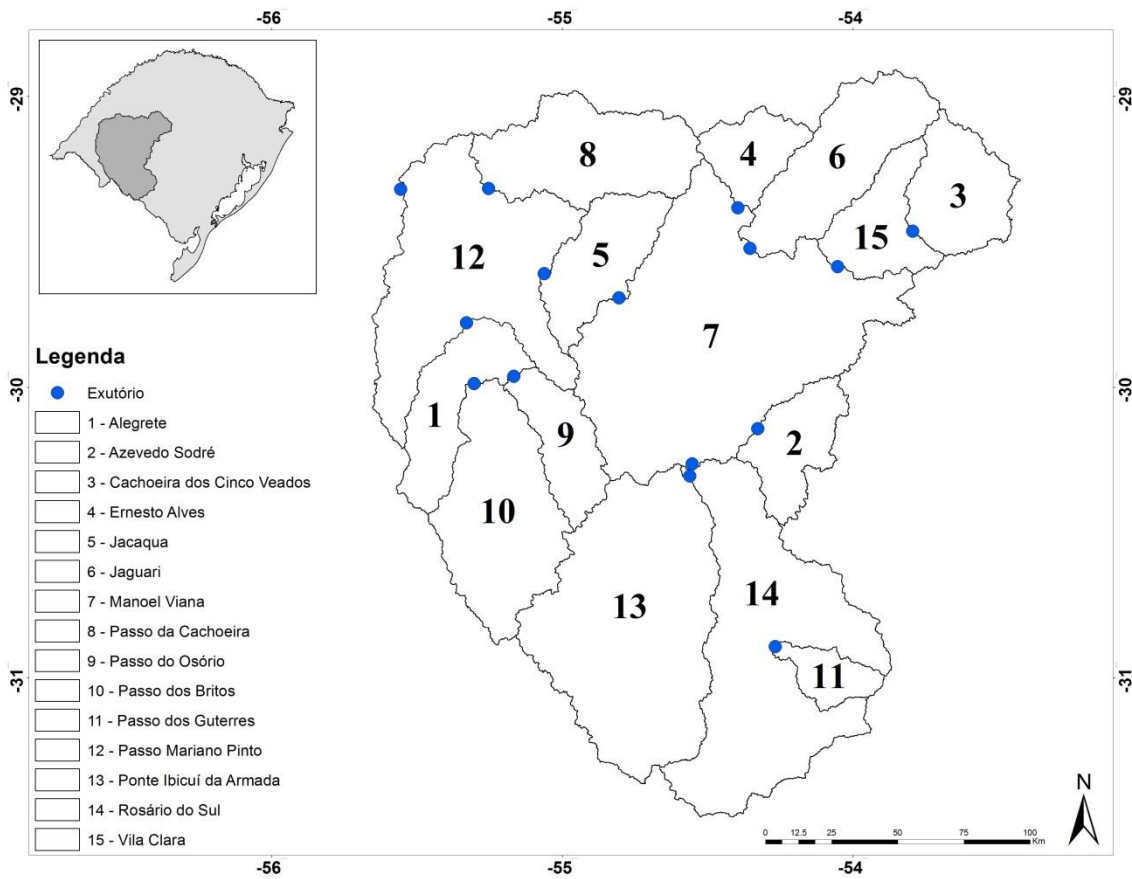


Figura 4. Localização das Sub-bacias e seus Exutórios

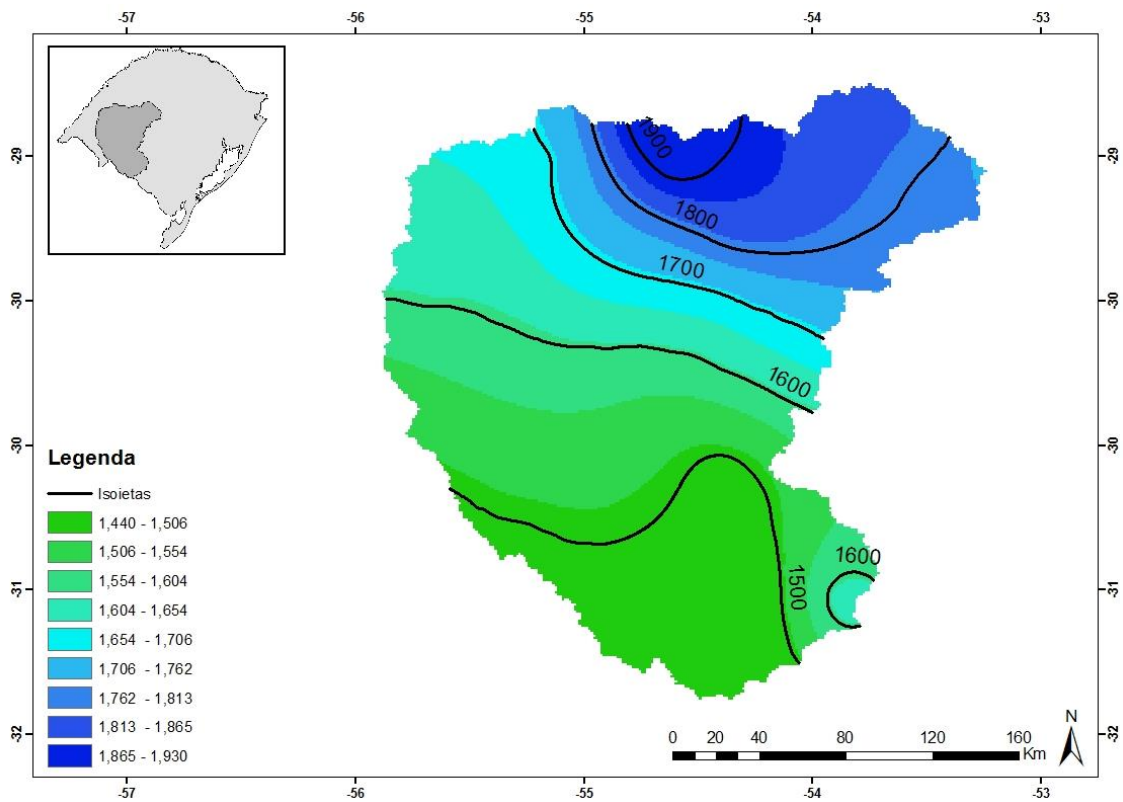


Figura 5. Precipitação média na Bacia do Ibicuí e Isoietas

A seguir foram realizados os cálculos das vazões e dos parâmetros necessário para a aplicação do filtro de separação de escoamento de base, a constante do período característico “k” e a constante de recessão “a”. Após a aplicação do filtro obteve-se a vazão de base média, utilizada para o cálculo da taxa de recarga aquífera. Uma descrição mais detalhada do processo de cálculo será apresentada utilizando como exemplo a sub-bacia resultante do Posto Fluviométrico do Passo da Cachoeira. Os resultados destas etapas de cálculo para todas as estações estão na Tabela 3.

Inicialmente foram calculadas as vazões máximas, mínimas, médias, Q90 e Q50 com os dados de vazão diários obtidos no portal Hidroweb da ANA. A seguir foi analisado o hidrograma (Figura 6) da estação em busca de períodos de recessões (como foi definido anteriormente, nestes períodos não há entrada por precipitação e, portanto, o escoamento superficial é nulo, havendo uma descarga natural do aquífero no curso d’água). O período da recessão para este posto foi de 8/12/2011 a 19/12/2011, como pode ser visto na Figura 7: houve um episódio de precipitação que causou o pico de vazão no dia 23 de novembro e em seguida houve uma diminuição na vazão do rio, até que os valores de vazão se mantiveram relativamente contínuos; este período caracteriza uma recessão. Em seguida foram calculados os parâmetros “k” e “a”, de acordo com as Equações 3 e 4, conforme descrito na metodologia.

Foi calculado o valor do BFI<sub>max</sub> que, juntamente com os dados de vazão e do coeficiente de recessão “a” serviu como valor de entrada para o cálculo do filtro de Eckhardt para a separação do escoamento de base. A partir do uso do filtro obteve-se a vazão de base média para a estação fluviométrica, e o hidrograma do escoamento de base, conforme a Figura 8.

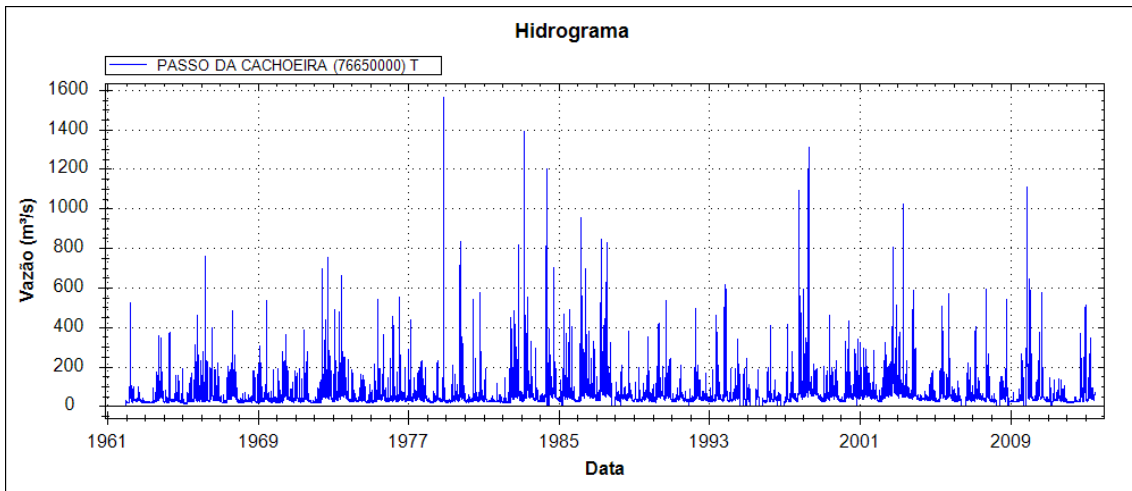


Figura 6. Hidrograma Unitário do Posto Fluviométrido do Passo da Cachoeira

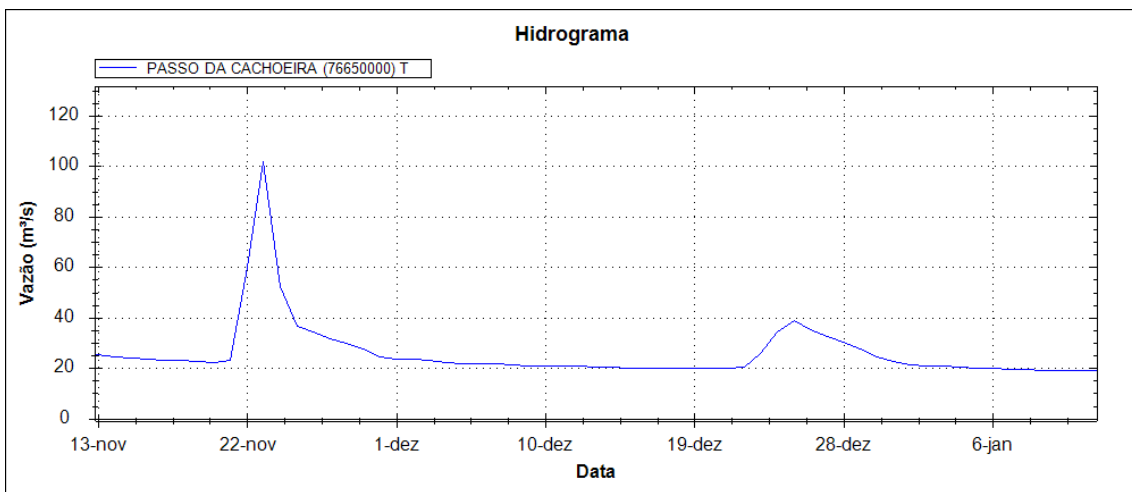


Figura 7. Período de Recessão Escolhido da Estação do Passo da Cachoeira

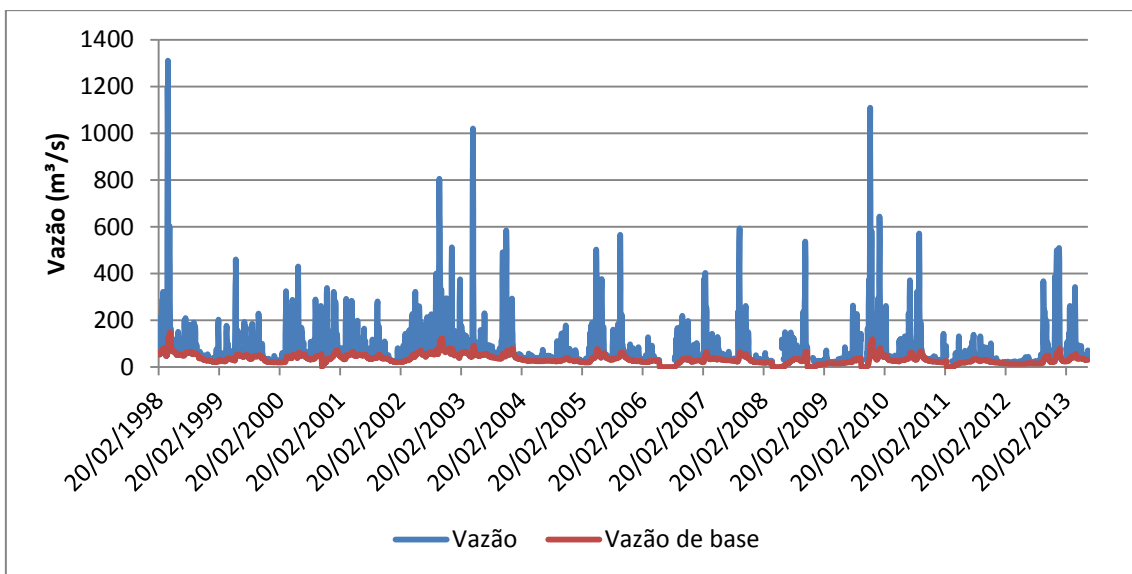


Figura 8. Hidrograma da Estação do Passo da Cachoeira: Vazão e Vazão de Base

Tabela 3. Resultados da Aplicação da Metodologia de Separação de Escoamento de Base

| Código   | Sub-bacia                  | k        | a       | Q med (m³/s) | Q base med (m³/s) |
|----------|----------------------------|----------|---------|--------------|-------------------|
| 76750000 | Alegrete                   | 18.67176 | 0.94785 | 121          | 32.8              |
| 76370000 | Azevedo Sodré              | 82.78401 | 0.98799 | 19.2         | 3.24              |
| 76085000 | Cachoeira dos Cinco Veados | 46.92872 | 0.97892 | 42.9         | 8.55              |
| 76460000 | Ernesto Alves              | 13.80639 | 0.93013 | 28.1         | 9.18              |
| 76500000 | Jacaqua                    | 32.99476 | 0.97015 | 582          | 139.7             |
| 76440000 | Jaguari                    | 47.72492 | 0.97926 | 60.4         | 15.1              |
| 76560000 | Manoel Viana               | 61.484   | 0.98387 | 660          | 202               |
| 76650000 | Passo da Cachoeira         | 149.8994 | 0.99335 | 65.7         | 30.7              |
| 76742000 | Passo do Osório            | 15.64227 | 0.93807 | 32.2         | 7.66              |
| 76700000 | Passo dos Britos           | 73.63898 | 0.98651 | 69.1         | 8.93              |
| 76800000 | Passo Mariano Pinto        | 47.1068  | 0.979   | 923.8        | 270               |
| 76300000 | Ponte Ibicui da Armada     | 22.41221 | 0.95636 | 103.1        | 30.9              |
| 76310000 | Rosário do Sul             | 27.35014 | 0.9641  | 228.9        | 61.5              |
| 76100000 | Vila Clara                 | 24.05139 | 0.95927 | 61.9         | 17.4              |
| 76260000 | Passo dos Guterres         | 21.38076 | 0.95431 | 16.1         | 3.08              |

Na etapa seguinte foram calculadas, para cada sub-bacia, as taxas de recarga (mm/ano), a evapotranspiração (mm/ano), o coeficiente de escoamento, e as porcentagens de recarga a partir da chuva total (TR/P) e da precipitação efetivamente disponível para recarga (TR/Pefe, sendo que a precipitação efetiva é precipitação total subtraída a evapotranspiração); os resultados estão na Tabela 4 e na Figura 9.

Como pode ser observado na coluna da porcentagem de recarga com relação à precipitação efetiva, os valores variaram entre 13 e 47%: existem algumas bacias que apresentaram recargas baixas, como é o caso de Passo dos Britos – 13%, e Azevedo Sodré -17%; assim como houve bacias com elevadas recargas, como Manoel Viana – 31%, Ernesto Alves – 33% e Passo da Cachoeira – 47%; as outras bacias se mantiveram com valores de recarga intermediários, entre 19 e 29%.

Essas diferenças entre os valores de recarga podem ser atribuídas a diversos fatores, como a geologia da bacia, o tipo e a espessura do solo, a intensidade de precipitação, entre outros. A seguir será aprofundada e discutida acerca destes fatores.

Tabela 4. Resultados dos Cálculos de Taxa de Recarga, Evapotranspiração, Coeficiente de Escoamento e Porcentagens de Recarga para as Sub-bacias

| Sub-bacia                  | Precip (mm/ano) | Et (mm/ano) | P-Et   | CE (qmed/pmed) | TR (mm/ano) | Rec %Plu | Rec %Pefe | A (km <sup>2</sup> ) |
|----------------------------|-----------------|-------------|--------|----------------|-------------|----------|-----------|----------------------|
| Alegrete                   | 1545            | 902.1       | 642.8  | 0.416054       | 174.6       | 11%      | 27%       | 5943                 |
| Azevedo Sodré              | 1607            | 1111.8      | 495.6  | 0.308407       | 84          | 5%       | 17%       | 1220                 |
| Cachoeira dos Cinco Veados | 1794            | 916.9       | 877.88 | 0.488877       | 175.3       | 10%      | 20%       | 1542                 |
| Ernesto Alves              | 1893            | 930.3       | 962.6  | 0.508545       | 314.9       | 17%      | 33%       | 922                  |
| Jacaqua                    | 1634            | 962.7       | 671.2  | 0.410826       | 161.3       | 10%      | 24%       | 27373                |
| Jaguari                    | 1840            | 1021        | 818.9  | 0.445056       | 204.8       | 11%      | 25%       | 2326                 |
| Manoel Viana               | 1638            | 917.9       | 720    | 0.43958        | 221.9       | 14%      | 31%       | 28922                |
| Passo da Cachoeira         | 1776            | 968.1       | 807.8  | 0.454843       | 378.7       | 21%      | 47%       | 2564                 |
| Passo do Osório            | 1566            | 694.6       | 871.2  | 0.556405       | 208.1       | 13%      | 24%       | 1165                 |
| Passo dos Britos           | 1527            | 845.6       | 681.31 | 0.446224       | 88.36       | 6%       | 13%       | 3197                 |
| Passo Mariano Pinto        | 1632            | 940.1       | 691.8  | 0.423919       | 202.8       | 12%      | 29%       | 42108                |
| Ponte Ibicui da Armada     | 1495            | 953.6       | 541.3  | 0.36208        | 162.5       | 11%      | 30%       | 6004                 |
| Rosário do Sul             | 1502            | 905         | 596.9  | 0.397422       | 160.9       | 11%      | 27%       | 12092                |
| Vila Clara                 | 1801            | 1102.2      | 698.7  | 0.38796        | 196.7       | 11%      | 28%       | 2798                 |
| Passo dos Guterres         | 1569            | 681.1       | 887.8  | 0.565857       | 169.7       | 11%      | 19%       | 574                  |

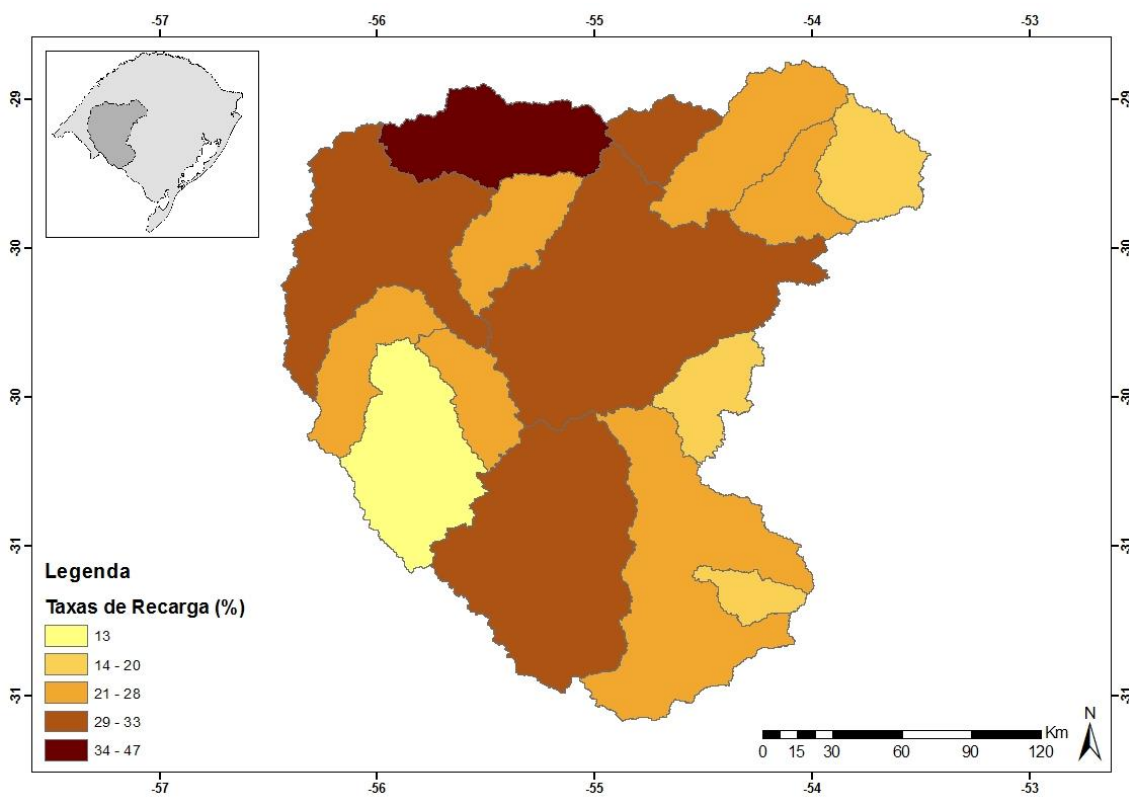


Figura 9. Distribuição das Taxas de Recarga nas Sub-bacias



## 6.1. Análise a partir do Agrupamento Geológico

O resultado do agrupamento das tipologias geológicas, conforme descrito na área de estudo, pode ser visualizado na Figura 10. Nas Tabelas Tabela 5, Tabela 6 e

Tabela 7 estão apresentados os tipos de geologia e solo de cada sub-bacia. Algumas sub-bacias possuem um arcabouço geológico semelhante, sendo este o critério utilizado para a organização dos resultados. As bacias foram subdivididas em três categorias: bacias de arcabouço geológico pouco permeável (bacias cujas geologias eram majoritariamente compostas por derrames vulcânicos, embasamento cristalino, pelitos Triássicos e Permeanos), cuja porcentagem de unidades pouco permeáveis vai de 67 a 96%; bacias de arcabouço geológico com permeabilidade intermediária, ou seja, bacias que apresentavam várias tipologias geológicas, de maneira que a porcentagem de unidades permeáveis é intermediária, variando de 48 a 54%; e bacias de arcabouço geológico bastante permeável (bacias cujas geologias eram majoritariamente compostas por arenitos, coberturas Cretássicas e aluviões quaternários), cuja porcentagem de unidades permeáveis varia de 21 a 35%.

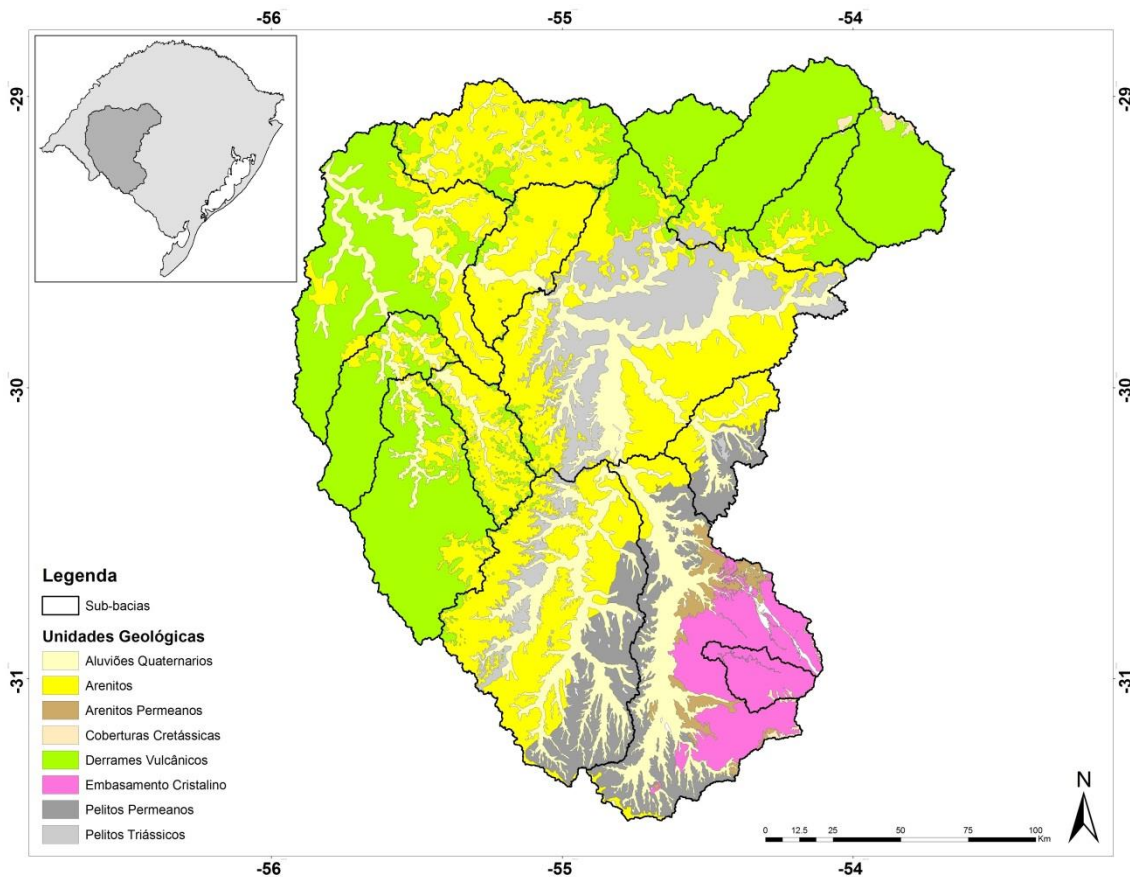


Figura 10. Sub-bacias e Agrupamento das Unidades Geológicas

Tabela 5. Taxas de Recarga em Sub-bacias de Arcabouço Geológico Pouco Permeável

| Sub-bacias de Arcabouço Geológico Pouco Permeável |               |                   |                |           |             |                        |            |            |
|---|---------------|-------------------|----------------|-----------|-------------|------------------------|------------|------------|
| Sub-bacia   | P<br>(mm/ano) | P efe<br>(mm/ano) | TR<br>(mm/ano) | % Rec (P) | % Rec (Pef) | Geologia               | Área (km²) | % Geologia |
| Cachoeira dos Cinco Veados                        | 1794          | 877               | 175            | 10%       | 20%         | Coberturas Cretássicas | 55         | 4%         |
|   |               |                   |                |           |             | Derrames Vulcânicos    | 1487       | 96%        |
| Passo dos Guterres                                | 1569          | 888               | 170            | 11%       | 19%         | Aluviões Quaternarios  | 6          | 1%         |
|   |               |                   |                |           |             | Arenitos Permeanos     | 0          | 0%         |
|   |               |                   |                |           |             | Coberturas Cretássicas | 16         | 3%         |
|   |               |                   |                |           |             | Embasamento Cristalino | 553        | 96%        |
| Ernesto Alves                                     | 1893          | 963               | 315            | 17%       | 33%         | Arenitos               | 44         | 5%         |
|   |               |                   |                |           |             | Derrames Vulcânicos    | 877        | 95%        |
| Jaguari   | 1840          | 819               | 205            | 11%       | 25%         | Arenitos               | 136        | 6%         |
|   |               |                   |                |           |             | Coberturas Cretássicas | 20         | 1%         |
|   |               |                   |                |           |             | Derrames Vulcânicos    | 2096       | 90%        |
|   |               |                   |                |           |             | Pelitos Triássicos     | 74         | 3%         |
| Vila Clara  | 1801          | 699               | 197            | 11%       | 28%         | Aluviões Quaternarios  | 29         | 1%         |
|   |               |                   |                |           |             | Arenitos               | 242        | 9%         |
|   |               |                   |                |           |             | Coberturas Cretássicas | 57         | 2%         |
|   |               |                   |                |           |             | Derrames Vulcânicos    | 2471       | 88%        |
| Passo dos Britos                                  | 1527          | 681               | 88             | 6%        | 13%         | Aluviões Quaternarios  | 224        | 7%         |
|   |               |                   |                |           |             | Derrames Vulcânicos    | 2560       | 80%        |
|   |               |                   |                |           |             | Arenitos               | 412        | 13%        |
| Alegrete  | 1545          | 643               | 175            | 11%       | 27%         | Aluviões Quaternarios  | 531        | 9%         |
|   |               |                   |                |           |             | Derrames Vulcânicos    | 3993       | 67%        |
|   |               |                   |                |           |             | Arenitos               | 1419       | 24%        |

Tabela 6. Taxas de Recarga em Sub-bacias de Arcabouço Geológico Medianamente Permeáveis

| Sub-bacias de Arcabouço Geológico Medianamente Permeáveis |            |                |             |           |             |                        |            |            |
|---|------------|----------------|-------------|-----------|-------------|------------------------|------------|------------|
| Sub-bacia   | P (mm/ano) | P efe (mm/ano) | TR (mm/ano) | % Rec (P) | % Rec (Pef) | Geologia               | Área (km²) | % Geologia |
| Jacaqua   | 1634       | 671            | 161         | 10%       | 24%         | Aluviões Quaternarios  | 5376       | 20%        |
|   |            |                |             |           |             | Arenitos               | 6939       | 25%        |
|   |            |                |             |           |             | Arenitos Permeanos     | 517        | 2%         |
|   |            |                |             |           |             | Coberturas Cretássicas | 138        | 1%         |
|   |            |                |             |           |             | Derrames Vulcânicos    | 6155       | 23%        |
|   |            |                |             |           |             | Embasamento Cristalino | 2399       | 9%         |
|   |            |                |             |           |             | PelitosPermeanos       | 2709       | 10%        |
|   |            |                |             |           |             | PelitosTriássicos      | 2995       | 11%        |
| Passo Marino Pinto  | 1632       | 692            | 203         | 12%       | 29%         | Aluviões Quaternarios  | 7017       | 17%        |
|   |            |                |             |           |             | Arenitos               | 12645      | 30%        |
|   |            |                |             |           |             | Arenitos Permeanos     | 517        | 1%         |
|   |            |                |             |           |             | Coberturas Cretássicas | 138        | 0%         |
|   |            |                |             |           |             | Derrames Vulcânicos    | 13531      | 32%        |
|   |            |                |             |           |             | Embasamento Cristalino | 2399       | 6%         |
|   |            |                |             |           |             | PelitosPermeanos       | 2709       | 6%         |
|   |            |                |             |           |             | PelitosTriássicos      | 3004       | 7%         |
| Manoel Viana  | 1638       | 720            | 222         | 14%       | 31%         | Aluviões Quaternarios  | 5568       | 19%        |
|   |            |                |             |           |             | Arenitos               | 8217       | 29%        |
|   |            |                |             |           |             | Arenitos Permeanos     | 517        | 2%         |
|   |            |                |             |           |             | Coberturas Cretássicas | 138        | 0%         |
|   |            |                |             |           |             | Derrames Vulcânicos    | 6225       | 22%        |
|   |            |                |             |           |             | Embasamento Cristalino | 2399       | 8%         |
|   |            |                |             |           |             | PelitosPermeanos       | 2709       | 9%         |
|   |            |                |             |           |             | PelitosTriássicos      | 3004       | 10%        |
| Rosário do Sul  | 1502       | 597            | 161         | 11%       | 27%         | Aluviões Quaternarios  | 3243       | 27%        |
|   |            |                |             |           |             | Arenitos               | 2881       | 24%        |
|   |            |                |             |           |             | Arenitos Permeanos     | 517        | 4%         |
|   |            |                |             |           |             | Coberturas Cretássicas | 61         | 1%         |
|   |            |                |             |           |             | Derrames Vulcânicos    | 93         | 1%         |
|   |            |                |             |           |             | Embasamento Cristalino | 2399       | 20%        |
|   |            |                |             |           |             | PelitosPermeanos       | 2313       | 19%        |

|  |  |  |  |  |  |                    |     |    |
|--|--|--|--|--|--|--------------------|-----|----|
|  |  |  |  |  |  | Pelitos Triássicos | 456 | 4% |
|--|--|--|--|--|--|--------------------|-----|----|

Tabela 7. Taxas de Recarga em Sub-bacias de Arcabouço Geológico Permeável

| Sub-bacias de Arcabouço Geológico Permeável |            |                |             |           |             |                       |                         |            |
|---|------------|----------------|-------------|-----------|-------------|-----------------------|-------------------------|------------|
| Sub-bacia                                   | P (mm/ano) | P efe (mm/ano) | TR (mm/ano) | % Rec (P) | % Rec (Pef) | Geologia              | Área (km <sup>2</sup> ) | % Geologia |
| Azevedo Sodré                               | 1607       | 496            | 84          | 5%        | 17%         | Aluviões Quaternários | 255                     | 21%        |
|   |            |                |             |           |             | Arenitos              | 535                     | 44%        |
|   |            |                |             |           |             | Pelitos Permeanos     | 396                     | 33%        |
|   |            |                |             |           |             | Pelitos Triássicos    | 31                      | 3%         |
| Ponte Ibicui da Armada                      | 1495       | 541            | 163         | 11%       | 30%         | Aluviões Quaternários | 1634                    | 27%        |
|   |            |                |             |           |             | Arenitos              | 2547                    | 43%        |
|   |            |                |             |           |             | Derrames Vulcânicos   | 93                      | 2%         |
|   |            |                |             |           |             | Pelitos Permeanos     | 1242                    | 21%        |
| Passo da Cachoeira                          | 1776       | 808            | 379         | 21%       | 47%         | Aluviões Quaternários | 181                     | 7%         |
|   |            |                |             |           |             | Arenitos              | 1827                    | 71%        |
|   |            |                |             |           |             | Derrames Vulcânicos   | 557                     | 22%        |
| Passo do Osório                             | 1566       | 871            | 208         | 13%       | 24%         | Aluviões Quaternários | 151                     | 13%        |
|   |            |                |             |           |             | Arenitos              | 773                     | 66%        |
|   |            |                |             |           |             | Derrames Vulcânicos   | 241                     | 21%        |

As bacias com arcabouço geológico pouco permeável apresentaram valores intermediários de recarga da precipitação efetiva, variando entre 13 e 33%, com valores de precipitação efetiva variando entre 643 e 963mm/ano. Ainda assim, as bacias com as menores e maiores recargas, Passo dos Britos (13%) e Ernesto Alves (33%), respectivamente, estão contidas nesta subdivisão geológica; podemos também perceber uma correlação entre estes valores de recarga com as precipitações efetivas entre essas duas bacias, 681 e 963mm/ano, respectivamente. Contrariando o que era esperado, a % de unidades pouco permeáveis é superior na bacia do Ernesto Alves (95%) do que na bacia do Passo dos Britos (80%). Isso sugere que a geologia pode não ser a única variável que influencia na relação do escoamento de base, ou seja, na interface rio/aquífero.

As bacias com arcabouço geológico de permeabilidade intermediária são as mais expressivas em área, e apresentam uma composição geológica homogênea; apresentam

recargas da precipitação efetiva entre 24 e 31%, o que está correlacionado com os próprios valores de precipitação efetiva, que variaram de 597 a 720mm/ano.

As bacias com arcabouço geológico geologia permeável apresentaram as maiores recargas de precipitação efetiva, entre 17 e 47%; novamente percebe-se uma correlação com a precipitação efetiva, que variou entre 496 e 871 mm/ano. A bacia do Azevedo Sodré foi a que apresentou os menores valores de recarga e de precipitação efetiva, 17% e 496mm/ano, respectivamente. Nesta divisão também está presente a bacia de Passo da Cachoeira, que apresentou a maior recarga efetiva de toda a Bacia do Rio Ibicuí, com 47%, sendo a precipitação efetiva 808 mm/ano. A parcela de rochas permeáveis presente na bacia do Passo da Cachoeira é de 78%, sendo 71% arenitos, que possuem uma alta capacidade de armazenamento e transmissividade, e 7% aluviões quaternários, que, embora sejam permeáveis e porosos, possuem uma capacidade de regularização inferior a do arenito.

Pode existir uma correlação entre a recarga aquífera e a distribuição espacial das unidades geológicas no âmbito de bacias hidrográficas, hipótese esta que, entretanto, não se confirma a partir deste trabalho. Para isso seria necessário um detalhamento geológico maior, e a comparação de bacias localizadas sobre a mesma geologia, que apresentassem precipitações e outras características semelhantes. Além disso, podem-se realizar outros agrupamentos geológicos para este mesmo fim. Ressalta-se que a região estudada, no caso a Bacia do Ibicuí, vem sendo alvo de recentes mapeamentos e, espera-se que a distribuição espacial das unidades venha a ser alterada.

## **6.2. Análise a partir da Tipologia de Solos**

Dentre as tipologias de solo encontradas na bacia do rio Ibicuí, grande parte possui características de baixas permeabilidade e transmissividade, com presença de argila. Solos argilosos podem apresentar uma elevada porosidade, o que mantém a água no solo, mas não tem a capacidade de transmissão dessa água, possuindo assim baixas capacidades de regularização de vazão. Na Figura 11 está apresentado o mapa de solos da bacia do Ibicuí, na Tabela 8 são apresentadas as tipologias de solo existentes em cada sub-bacia estudada.

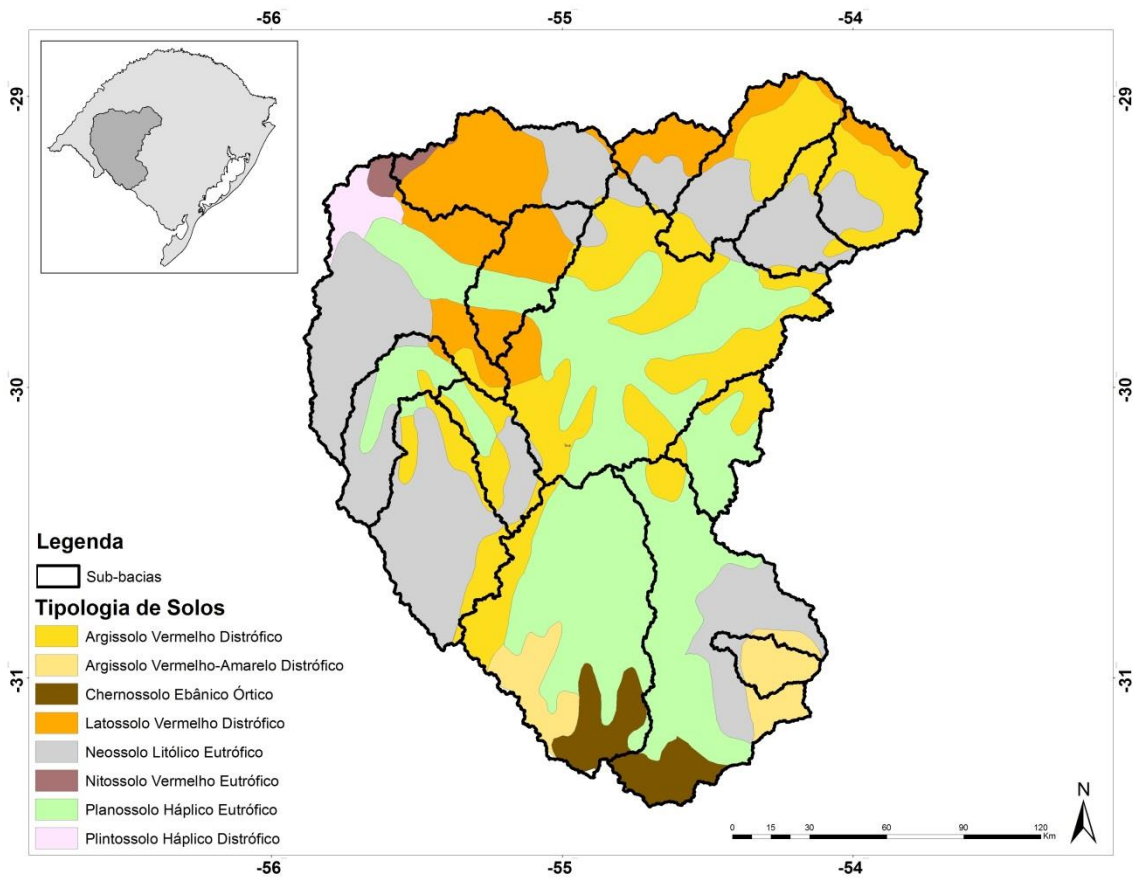


Figura 11. Mapa de Solos das Sub-bacias

Tabela 8. Tipologia de Solo nas Sub-bacias

| Sub-bacia                  | P (mm/ano) | P efe (mm/ano) | Tipo de Solo                            | Área (km <sup>2</sup> ) | % Solo |
|----------------------------|------------|----------------|---|-------------------------|--------|
| Alegrete                   | 11%        | 27%            | Argilossolo vermelho Distrófico         | 1361                    | 23%    |
|                            |            |                | Latossolo vermelho Distrófico           | 42                      | 1%     |
|                            |            |                | NeossololíticoEutrófico                 | 3623                    | 61%    |
|                            |            |                | PlanossoloháplicoEutrófico              | 939                     | 16%    |
| Azevedo Sodré              | 5%         | 17%            | Argilossolo vermelho Distrófico         | 355                     | 29%    |
|                            |            |                | PlanossoloháplicoEutrófico              | 864                     | 71%    |
| Cachoeira dos Cinco Veados | 10%        | 20%            | Argilossolo vermelho Distrófico         | 931                     | 60%    |
|                            |            |                | Latossolo vermelho Distrófico           | 198                     | 13%    |
|                            |            |                | NeossololíticoEutrófico                 | 410                     | 27%    |
| Ernesto Alves              | 17%        | 33%            | Argilossolo vermelho Distrófico         | 8                       | 1%     |
|                            |            |                | Latossolo vermelho Distrófico           | 570                     | 62%    |
|                            |            |                | NeossololíticoEutrófico                 | 345                     | 37%    |
| Jacaqua                    | 10%        | 24%            | Argilossolo vermelho Distrófico         | 7298                    | 27%    |
|                            |            |                | Argilossolo vermelho-amarelo Distrófico | 1719                    | 6%     |
|                            |            |                | ChernossoloebânicoÓrtico                | 1473                    | 5%     |
|                            |            |                | Latossolo vermelho Distrófico           | 1477                    | 5%     |
|                            |            |                | NeossololíticoEutrófico                 | 4322                    | 16%    |
|                            |            |                | PlanossoloháplicoEutrófico              | 11086                   | 40%    |
| Jaguari                    | 11%        | 25%            | Argilossolo vermelho Distrófico         | 1219                    | 52%    |
|                            |            |                | Latossolo vermelho Distrófico           | 391                     | 17%    |
|                            |            |                | NeossololíticoEutrófico                 | 716                     | 31%    |
| Manoel Viana               | 14%        | 31%            | Argilossolo vermelho Distrófico         | 7316                    | 25%    |
|                            |            |                | Argilossolo vermelho-amarelo Distrófico | 1719                    | 6%     |
|                            |            |                | ChernossoloebânicoÓrtico                | 1473                    | 5%     |
|                            |            |                | Latossolo vermelho Distrófico           | 2437                    | 8%     |
|                            |            |                | NeossololíticoEutrófico                 | 4475                    | 15%    |
|                            |            |                | PlanossoloháplicoEutrófico              | 11508                   | 40%    |
| Passo da Cachoeira         | 21%        | 47%            | Argilossolo vermelho Distrófico         | 10                      | 0%     |
|                            |            |                | Latossolo vermelho Distrófico           | 1700                    | 66%    |
|                            |            |                | NeossololíticoEutrófico                 | 739                     | 29%    |
|                            |            |                | Nitossolo vermelho Eutrófico            | 122                     | 5%     |
| Passo do Guterres          | 11%        | 19%            | Argilossolo vermelho-amarelo Distrófico | 479                     | 83%    |
|                            |            |                | NeossololíticoEutrófico                 | 95                      | 17%    |
| Passo do Osório            | 13%        | 24%            | Argilossolo vermelho Distrófico         | 511                     | 44%    |
|                            |            |                | NeossololíticoEutrófico                 | 408                     | 35%    |
|                            |            |                | PlanossoloháplicoEutrófico              | 250                     | 21%    |
| Passo dos Britos           | 6%         | 13%            | Argilossolo vermelho Distrófico         | 784                     | 24%    |
|                            |            |                | NeossololíticoEutrófico                 | 2361                    | 74%    |
|                            |            |                | PlanossoloháplicoEutrófico              | 62                      | 2%     |

|                        |     |     |   |       |     |
|------------------------|-----|-----|---|-------|-----|
| Passo Marino Pinto     | 12% | 29% | Argilossolo vermelho Distrófico         | 8829  | 21% |
|                        |     |     | Argilossolo vermelho-amarelo Distrófico | 1719  | 4%  |
|                        |     |     | ChernossoloebânicoÓrtico                | 1473  | 3%  |
|                        |     |     | Latossolo vermelho Distrofico           | 5167  | 12% |
|                        |     |     | NeossololíticoEutrófico                 | 11031 | 26% |
|                        |     |     | Nitossolo vermelho Eutrófico            | 269   | 1%  |
|                        |     |     | PlanossoloháplicoEutrófico              | 13171 | 31% |
|                        |     |     | Plintossoloháplico Distrófico           | 503   | 1%  |
| Ponte Ibicui da Armada | 11% | 30% | Argilossolo vermelho Distrófico         | 690   | 12% |
|                        |     |     | Argilossolo vermelho-amarelo Distrófico | 767   | 13% |
|                        |     |     | ChernossoloebânicoÓrtico                | 799   | 13% |
|                        |     |     | PlanossoloháplicoEutrófico              | 3734  | 62% |
| Rosário do Sul         | 11% | 27% | Argilossolo vermelho Distrófico         | 900   | 7%  |
|                        |     |     | Argilossolo vermelho-amarelo Distrófico | 1719  | 14% |
|                        |     |     | ChernossoloebânicoÓrtico                | 1473  | 12% |
|                        |     |     | NeossololíticoEutrófico                 | 1548  | 13% |
|                        |     |     | PlanossoloháplicoEutrófico              | 6440  | 53% |
| Vila Clara             | 11% | 28% | Argilossolo vermelho Distrófico         | 1242  | 44% |
|                        |     |     | Latossolo vermelho Distrofico           | 198   | 7%  |
|                        |     |     | NeossololíticoEutrófico                 | 1356  | 48% |

A análise da Tabela 8 confirma que a maior parte das bacias em estudo possuem como solo principal os argissolos, neossolos e planossolos. Entretanto, as duas bacias cuja principal tipologia de solo é o latossolo (que possui boas permeabilidades e transmissividades) são Ernesto Alves e Passo da Cachoeira, 62 e 66%, respectivamente; estas são as duas bacias com os maiores valores de recargas obtidos no presente estudo. Dessa forma, a tipologia do solo pode ser um fator explicativo para as altas recargas obtidas em ambas as bacias.

Para um estudo mais aprofundado seriam necessárias outras informações, como a espessura do solo nessa região. Também deve ser levado em consideração que estes dados foram obtidos a partir de um mapa de solo elaborado para o Brasil inteiro, o qual pode estar sujeito a imprecisões, devido a escala de realização do trabalho.



### **6.3. Análise da Variação do Nível D'Água**

Outro método utilizado para estimar a recarga aquífera é baseado no uso de medições do nível freático em piezômetros instalados na região de interesse. Este método relaciona a recarga de aquífero livre com a variação do nível freático; entretanto, pode haver uma defasagem entre os eventos de precipitação, de chegada de água até o freático e de recarga do aquífero livre. Essa defasagem ocorre em razão de diversos fatores, como intensidade da precipitação, tipo de solo e suas características, tipologia de rocha da qual é formado o aquífero, entre outros. (Lucas, Guanabara e Wendland, 2012)

A CPRM, através do Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS), vem instalando poços de monitoramento (piezômetros) em diversas regiões de interesse do RS, dentre elas, a região da bacia do Ibicuí. Esta rede de monitoramento tem como objetivo a medição horária, permanente e contínua do nível d'água no aquífero livre. Com estes dados a CPRM poderá gerar diversos produtos, pesquisas que expandam o conhecimento acerca do comportamento e da disponibilidade dos aquíferos.

Existem em torno de 9 piezômetros do RIMAS localizados na Bacia do Rio Ibicuí, sendo que dois estão localizados nas sub bacias do Passo da Cachoeira e de Azevedo Sodré (Figura 12), conforme Figura 13. Com esta disponibilidade de dados, foi realizada uma análise preliminar das medições de nível d'água dos piezômetros, e então foi feita uma comparação com os dados de vazão do rio, com a vazão de base (que foi calculada anteriormente neste trabalho) e com a precipitação total do posto pluviométrico mais próximo. Os resultados dessa análise preliminar são apresentados a seguir.

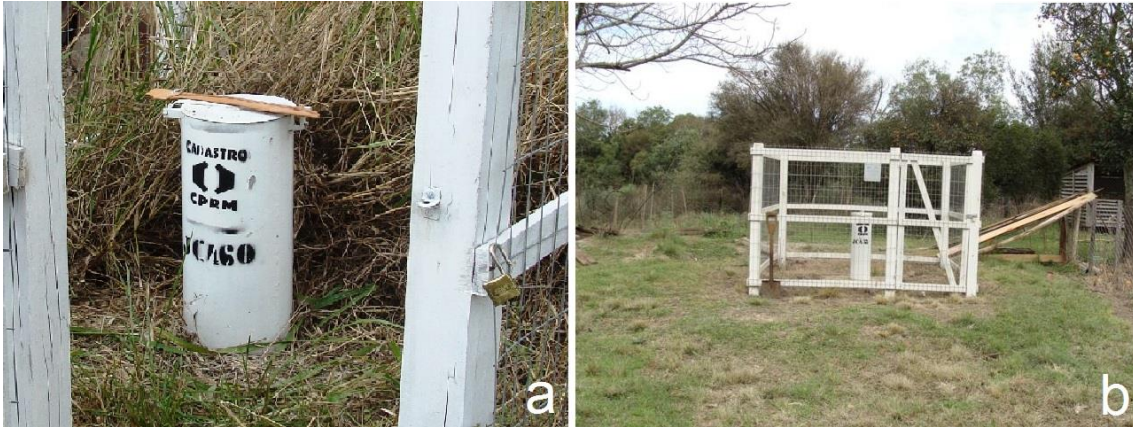


Figura 12. Imagens dos Piezômetros do RIMAS: a) Azevedo Sodré b) Passo da Cachoeira

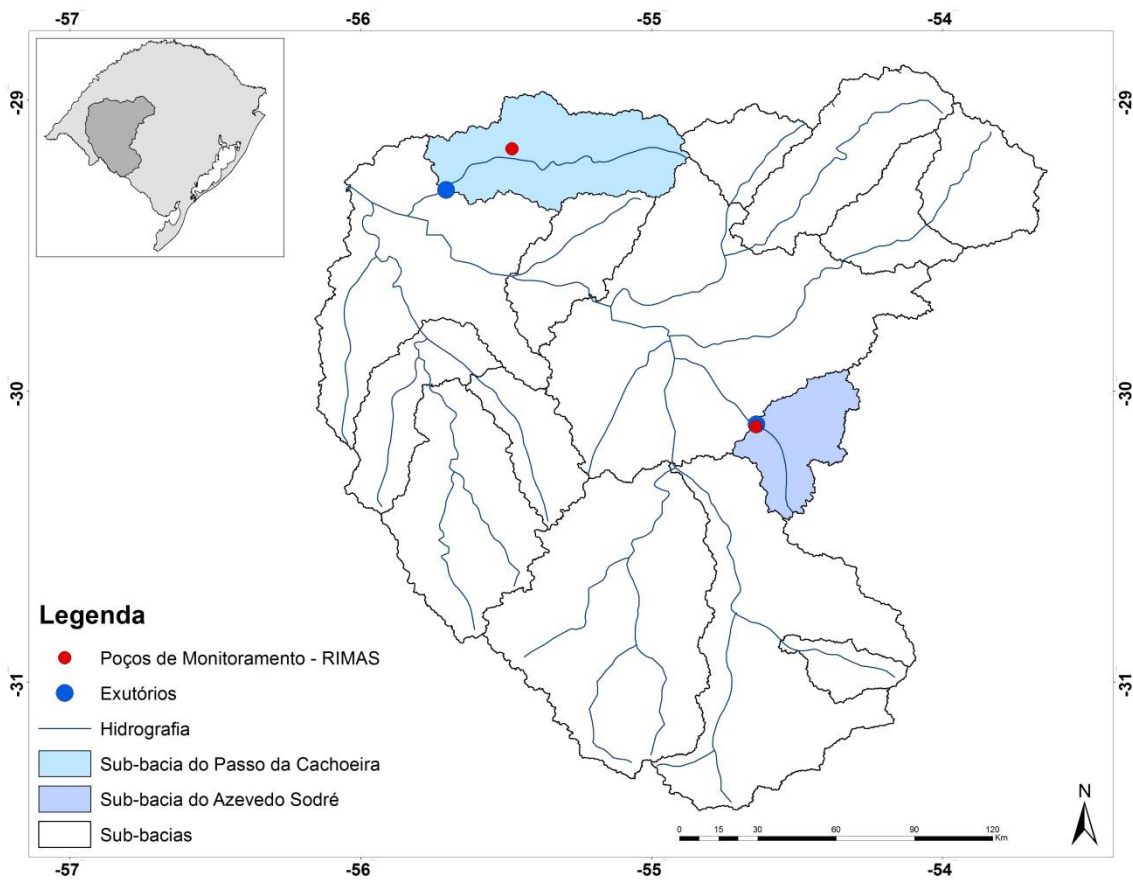


Figura 13. Localização das Sub-bacias do Passo da Cachoeira e Azevedo Sodré, poços do RIMAS e Exutórios

Na Figura 14 pode ser visto o gráfico comparando a vazão do rio ( $m^3/s$ ), a vazão de base ( $m^3/s$ ) e nível d'água, e a precipitação para a sub-bacia de Azevedo Sodré. O nível d'água é medido a partir da superfície do piezômetro, ou seja, quanto menos profundo for o NA, maior será a altura do freático. A precipitação foi obtida a partir do posto pluviométrico da ANA mais próximo, no caso o posto número 02954033.

Podemos verificar que existe uma defasagem entre os picos do NA e de vazão máxima, mas ainda assim, existe uma correlação visual. Com relação à precipitação, pode-se notar uma correlação visual e uma defasagem, na qual ocorre o evento de precipitação e posteriormente se dá o aumento do NA.

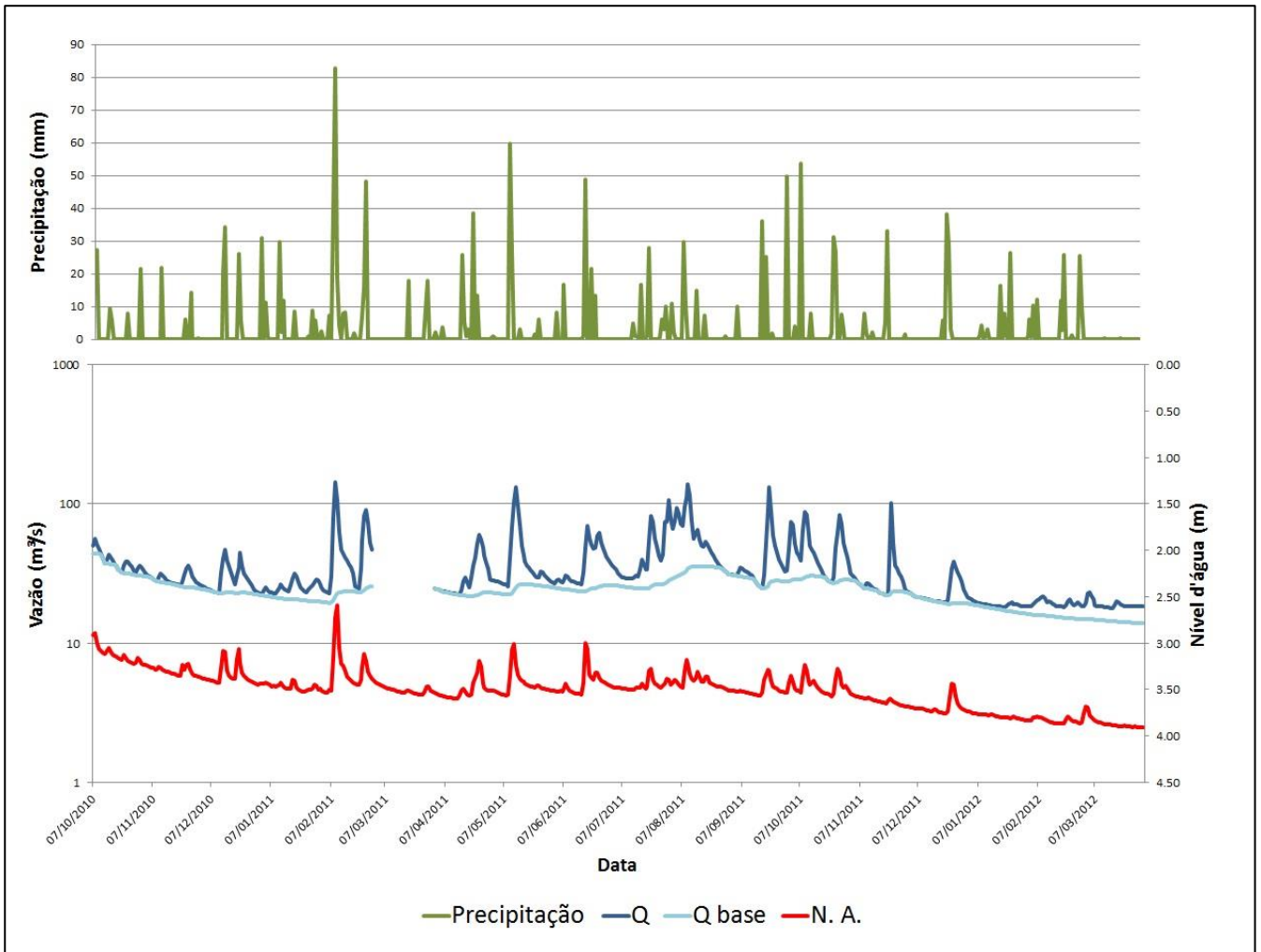


Figura 14. Comparação entre Vazão, Vazão de Base, Nível D'água e Precipitação na Sub-bacia do Azevedo Sodré

A mesma análise foi realizada para a sub-bacia do Passo da Cachoeira; o gráfico comparando as vazões do rio e de base, juntamente com as medições do NA pode ser visto na Figura 15. Visualmente pode ser observado que existe uma forte correlação entre a vazão do rio e o nível d'água medido no piezômetro, pois vários picos estão sobrepostos. Na comparação do NA com a precipitação, que foi obtida do posto 02955002 da ANA, pode-se confirmar essa correlação.

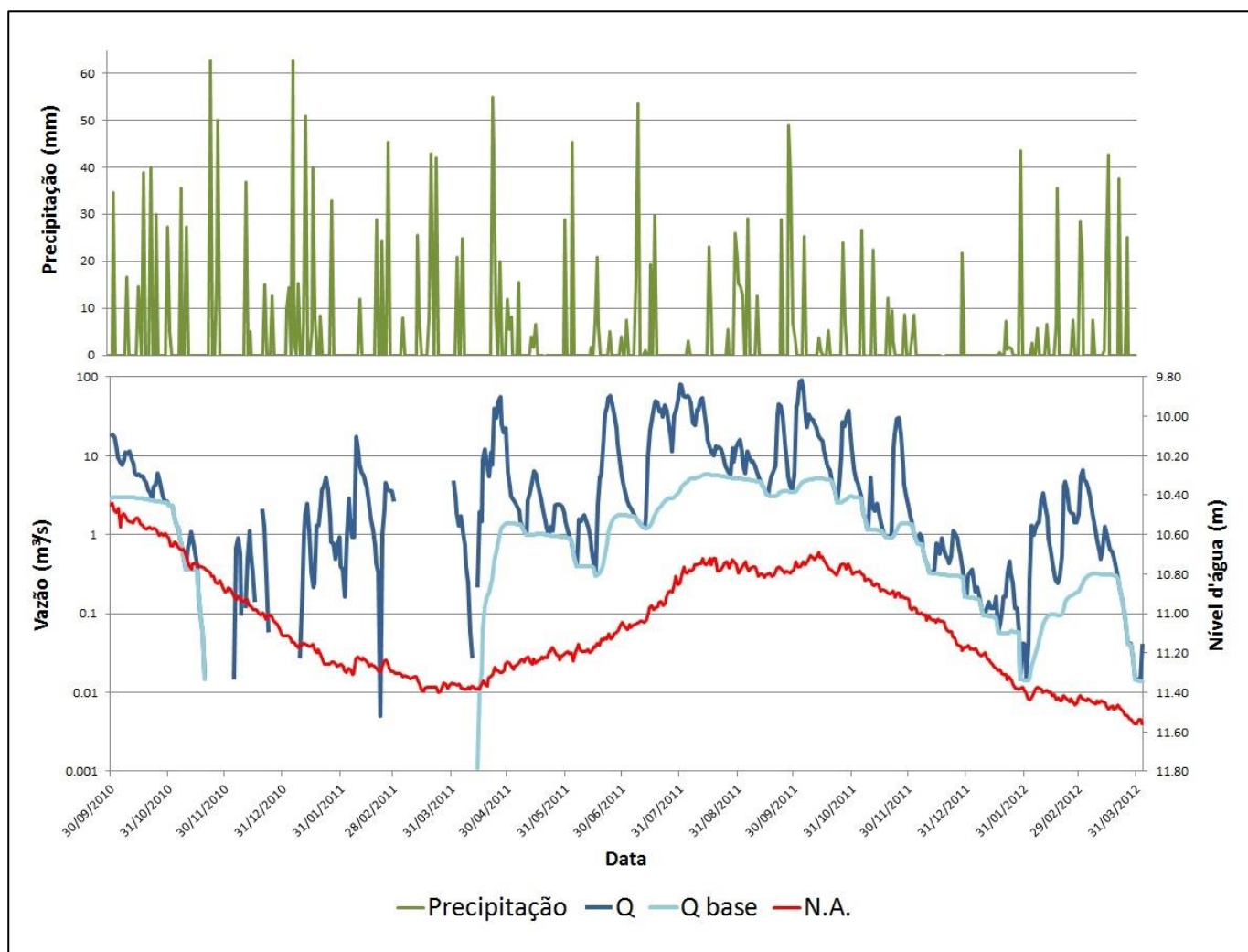


Figura 15. Comparação entre Vazão, Vazão de Base, Nível D'água e Precipitação na Sub-bacia do Passo da Cachoeira

Estes resultados, obtidos a partir de uma análise visual comparativa, estão em concordância com os resultados obtidos pelo método de recarga da separação do escoamento de base, e principalmente, estão em concordância com as características das sub-bacias. Como foi reportado anteriormente, a bacia do Passo da Cachoeira foi a que

apresentou o maior valor de recarga aquífera (47%); além disso, o arcabouço geológico da bacia é majoritariamente permeável, composta por arenitos e aluviões quaternários (78%); e ainda, a bacia possui uma tipologia de solo pouco argilosa, ou seja, muito permeável e bem drenada (66% de latossolos), conforme Figura 16. Todas essas características apontam que a bacia possui uma boa capacidade de regularização de vazão e de resposta em casos de eventos de precipitação ou recessão. Ainda assim, o comportamento da precipitação pode ser explicado pela demanda hídrica na bacia, ou seja, pelo ciclo anual da evapotranspiração,

Da mesma forma, a bacia de Azevedo Sodré apresentou a segunda menor recarga aquífera de todas as sub-bacias da BH1b (17%): embora sua constituição geológica seja majoritariamente permeável (65%), a cobertura de solo é essencialmente argilosa (29% argissolo e 71% planossolo), conforme Figura 17; dessa forma, esta sub-bacia apresenta características de baixa capacidade de regularização de vazão, e uma lenta resposta a eventos de precipitação.

É importante ressaltar que estes resultados são preliminares, e que existe um método de cálculo para a obtenção da estimativa de recarga a partir dos dados de séries de medição de nível d'água em piezômetros.

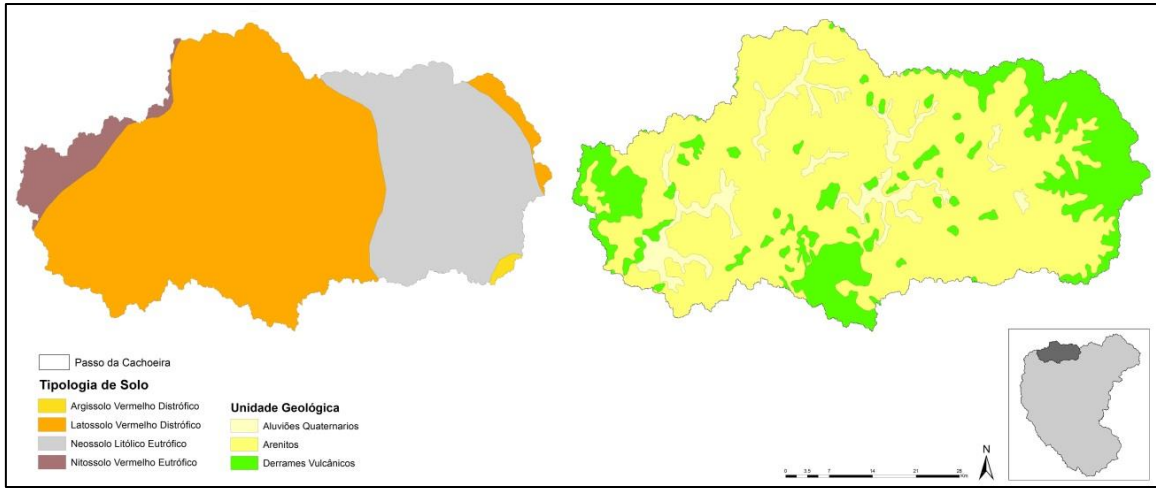


Figura 16. Unidades Geológicas e Tipologia de Solo da Sub-bacia do Passo da Cachoeira

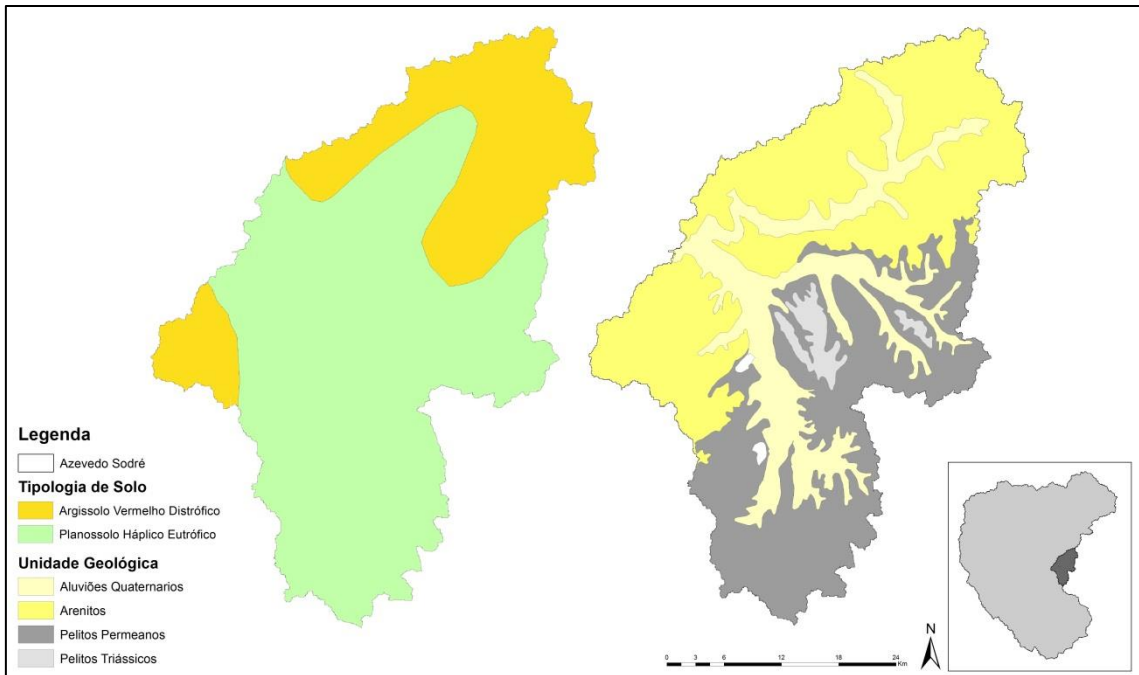


Figura 17. Unidades Geológicas e Tipologia de Solo da Sub-bacia do Azevedo Sodré

## 7. Conclusões e Recomendações

A partir da realização deste trabalho foi possível verificar que o método de separação de escoamento de base utilizando o Filtro de Eckhardt (Eckhardt, 2005) com o cálculo do parâmetro BFI<sub>max</sub> através da metodologia proposta por Collischonn & Fan (2012) é uma metodologia eficaz e rápida para o dimensionamento das taxas de recarga aquíferas. Este método necessita de informações que estão disponíveis, o que facilita a sua utilização.

Entretanto, deve-se ressaltar que diversos dados utilizados neste trabalho possuem erros e incertezas, o que afeta o resultado final obtido. Dados como vazão e precipitação possuem erros de medição e consistência, mas ainda assim são considerados de excelente qualidade, devido à ampla rede de monitoramento existente no país e o trabalho que é realizado na consistência dessas medições. Os dados geológicos, hidrogeológicos e de tipologia de solos também apresentam um erro, e estão em constantes reestruturações. Ainda assim, todos estes dados são providos por excelentes agências de pesquisa, como a ANA, a CPRM e o IBGE, que realizam um grande esforço no sentido de disponibilizar dados de qualidade para os pesquisadores.

Quanto à interpretação dos resultados, foram utilizadas informações disponíveis (como os mapas Geológicos e Hidrogeológicos da CPRM, e o mapa de Solos do Brasil, do IBGE), que auxiliaram na caracterização da área estudada. Entretanto, um conhecimento mais aprofundado, proveniente de visitas à bacia do Rio Ibicuí, certamente auxiliaria neste tipo de estudo.

A partir do presente trabalho foi possível verificar as taxas de recarga aquífera para a Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí, localizada na parte oeste do estado do Rio Grande do Sul. Foram obtidos valores de taxa de recarga que variaram entre 13 e 47%, mas que se concentraram em torno de 27%. Estes valores foram relacionados com os dados disponíveis de precipitação e distribuição das unidades geológicas e de solo. Foi possível relacionar as taxas de recarga mais elevadas com unidades geológicas mais permeáveis e solos com transmissividades mais elevadas, e também com altas precipitações médias; enquanto que as sub-bacias com pequenas taxas de recarga estavam relacionadas com unidades geológicas tanto permeáveis como cristalinas do tipo impermeáveis, solos com altos teores de argila e precipitações médias reduzidas.

É importante ressaltar que devem ser realizados estudos mais aprofundados com relação a caracterização da área de estudo, principalmente nas questões geológicas (afloramentos, características diferenciadas das unidades, etc.) e de solos (espessura e materiais presentes nas camadas de solo, etc.).

A partir da comparação preliminar dos resultados obtidos neste trabalho com os dados de medição do nível d'água do Projeto RIMAS da CPRM foi possível verificar uma correlação visual entre a precipitação na bacia, a vazão do rio, a vazão de base e as flutuações do nível d'água. Este trabalho pode ser aprofundado a partir do cálculo analítico da taxa de recarga aquífera a partir dos piezogramas.

O presente estudo tem como objetivo não somente determinar analiticamente as taxas de recarga aquífera, mas também apresentar esse método como um meio de obtenção de dados que viabilizem uma gestão adequada e integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Estes dados podem vir a auxiliar na tomada de decisão no processo de outorga de água, para que não ocorra uma superexploração dos mananciais.

Além disso, deve-se levar em consideração que ambos os mananciais, superficial e subterrâneo, não devem ser abordados separadamente, pois existe uma interferência mútua entre ambos. Assim, no processo de gestão da água na bacia hidrográfica, deve-se levar em consideração essa interação, bem como os limites de uso e recuperação de cada um deles.

Percebe-se que estas metodologias abrem novas e interessantes perspectivas de trabalhos futuros. Uma possível aplicação acadêmica é a comparação de valores de recarga resultantes deste método com valores obtidos por outros métodos (balanço hídrico tradicional, modelamento hidrogeológico, traçadores, interpretação de piezogramas, etc). Estes métodos podem ser utilizados em áreas com características geológicas e de solos distintas, ou em bacias com já reconhecida e altas taxas de regularização das vazões por parte das descargas subterrâneas (como ocorre no Aquífero Urucuia, localizado no oeste Baiano, nas sub-bacias do Rio São Francisco). Neste sentido, estas recargas poderiam imediatamente servir como dado de entrada em modelos de gestão integrada, a serem desenvolvidos e executados pelos órgãos gestores estaduais. Ainda, levando-se em consideração iniciativas recentes da CPRM, como por exemplo, a instalação de mais de 50 poços de monitoramento de nível de água subterrânea no Aquífero Urucuia e a de aplicar abordagens semelhantes às utilizadas



neste trabalho, nota-se a vanguarda do aqui apresentado. Como meta futura, consta a transformação deste trabalho em um manual metodológico de fácil uso para, distribuição interna no âmbito da CPRM.

## Referências Bibliográficas

- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. 2012. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Informe 2012**. Brasília/DF, 215p.
- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. 2013. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos**. Disponível em: < <http://www.snirh.gov.br>>. Acesso em: setembro, 2013.
- BERTOL, G. A.; CAMARGOS, C.C.; VELÁSQUEZ, L.N.M.; BRANCO, O. E. A; COTA, S.D.S. 2006. **Aplicação do Método do Cálculo do Balanço Hídrico na Avaliação da Recarga no Aquífero Bauru em Araguari - MG**. In: XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, São Paulo/SP.
- CARDOSO, F.; OLIVEIRA, F.; NASCIMENTO, F.; VARELLA NETO, P.; FLORES, P. 2008. **Poços Tubulares Construídos no Brasil**. In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Natal/RN.
- COLLISCHONN, W.; FAN, F. 2012. **Defining Parameters for Eckhardt's Digital Base Dlow Filter**. Hydrological Processes, 27 (18): 2614-1622.
- COMPANHIA DE PESQUISA EM RECURSOS MINERAIS – CPRM. 2010. **Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul**. Programa Geologia do Brasil – levantamento da geodiversidade. Porto Alegre/RS, 254p.
- COMPANHIA DE PESQUISA EM RECURSOS MINERAIS – CPRM. 2013. **Isoietas Anuais na escala 1:5.000.000**. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=1351&sid=9>>. Acesso em: setembro, 2013.
- DIAS, K. D. N. 2006. **Análise estratigráfica da Formação Pirambóia, Permiano Superior da Bacia do Paraná, leste do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geociências. Porto Alegre/RS.
- DOMENICO, P. A.; SCHWARTZ, F. W. 1990. **Physical and Chemical Hydrogeology**. John Wiley & Sons, Singapore, 824p.
- DORA, A.S. 2013. **Quantificação de Reservas Renováveis de Água Subterrânea em Bacias Hidrográficas a Partir de Séries Históricas de Vazão: Uma Ferramenta Para a Gestão e Bacias**. 84p. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS.

ECKHARDT K. 2005. **How to construct recursive digital filters for base flow separation.** *Hydrological Process*, 19: 507-515.

EILERS, V.H.M. 2004. **Estimativa de Recarga de Águas Subterrâneas Utilizando o Método do Balanço Hídrico.** *In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.* Cuiabá/MS, 20p.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. 2009. **Ferramenta Facilitadora do Trabalho com Dados Hidrológicos Disponibilizados pela ANA.** *Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão – Unipampa*, v.1, n.1.

HEALY, R.W. 2010. **Estimating Groundwater Recharge.** Cambridge University Press, Cambridge, UK. 244p.

HIDROLOGIA DE GRANDE ESCALA – HGE. Delimitação de Bacias. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/hge/>>. Acesso em: setembro 2013.

HIRATA, R.; ZOBBI, J.; OLIVEIRA, F. 2010. **Águas subterrâneas: reserva estratégica ou emergencial.** *In: Bicudo, C.; Tundisi, J; Scheuenstuhl, M. (Org.). Águas do Brasil: análises estratégicas.* 1. ed. São Paulo: Instituto de Botânica, v.1, p. 144-164.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2013. **Mapa de Solos do Brasil.** Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default\\_prod.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default_prod.shtm)>.

KIRCHHEIM, R.E.; MATTIUZI, C.D.P.; FIGUEIRA, S.V. 2013. **Uso do SIAGAS como Ferramenta para o Diagnóstico das Águas Subterrâneas na Bacia do Rio Ibicuí/RS.** *In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves/RS.*

LABORATORIO DE GEOPROCESSAMENTO – LABGEO. 2013. **Download – Dados Espaciais para uso em SIG.** Disponível em: <<http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo/>>. Acesso em: setembro, 2013.

LUCAS, M.C.; GUANABARA, R.C.; WENDLAND, E. 2012. **Estimativa de Recarga Subterrânea em Área de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani.** *Boletín Geológico y Minero*, v. 123, p. 311-323.

MARTELLI, G.V. 2012. **Monitoramento da Flutuação dos Níveis de Água em Aquíferos Freáticos para Avaliação do Potencial de Recarga em Área de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani em Cacequi – RS.** 151p. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. 2006. **Caderno da Região Hidrográfica do Rio Uruguai**. Brasília/DF, 132p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. 2007. **Águas Subterrâneas: Um Recurso a Ser Conhecido e Protegido**. Brasília/DF, 40p.

NANNI, A. S. 2008. **O Flúor em Águas do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul: Origem e Condicionamento Geológico**. 127 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, RS.

PROFIL. 2012. **Processo de Planejamento da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí, Fases A e B**. Secretaria Estadual do Meio Ambiente, Rio Grande do Sul, 93p.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; DALMOLIN, R.S.; AZEVEDO, A.C.; PEDRON, F.A. 2007. **Principais Solos da Depressão Central e Campanha do Rio Grande do Sul – Guia de Excursão**. Departamento de Solos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS. 47p.

ROBAINA, L.E.S.; TRENTIN, R.; BAZZAN, T.; RECKIEGEL, E.W.; VERDUN, R.; NARDIN, D. 2010. **Compartimentação Geomorfológica da Bacia Hidrográfica do Ibicuí, Rio Grande do Sul, Brasil: Proposta de Classificação**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v.11, n.2.

ROISENBERG, A. & VIERO, A. P. 2000. **O Vulcanismo Mesozóico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul**. In: Holz, M.; De Ros, L.F. Geologia do Rio Grande do Sul. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, p.355-374.

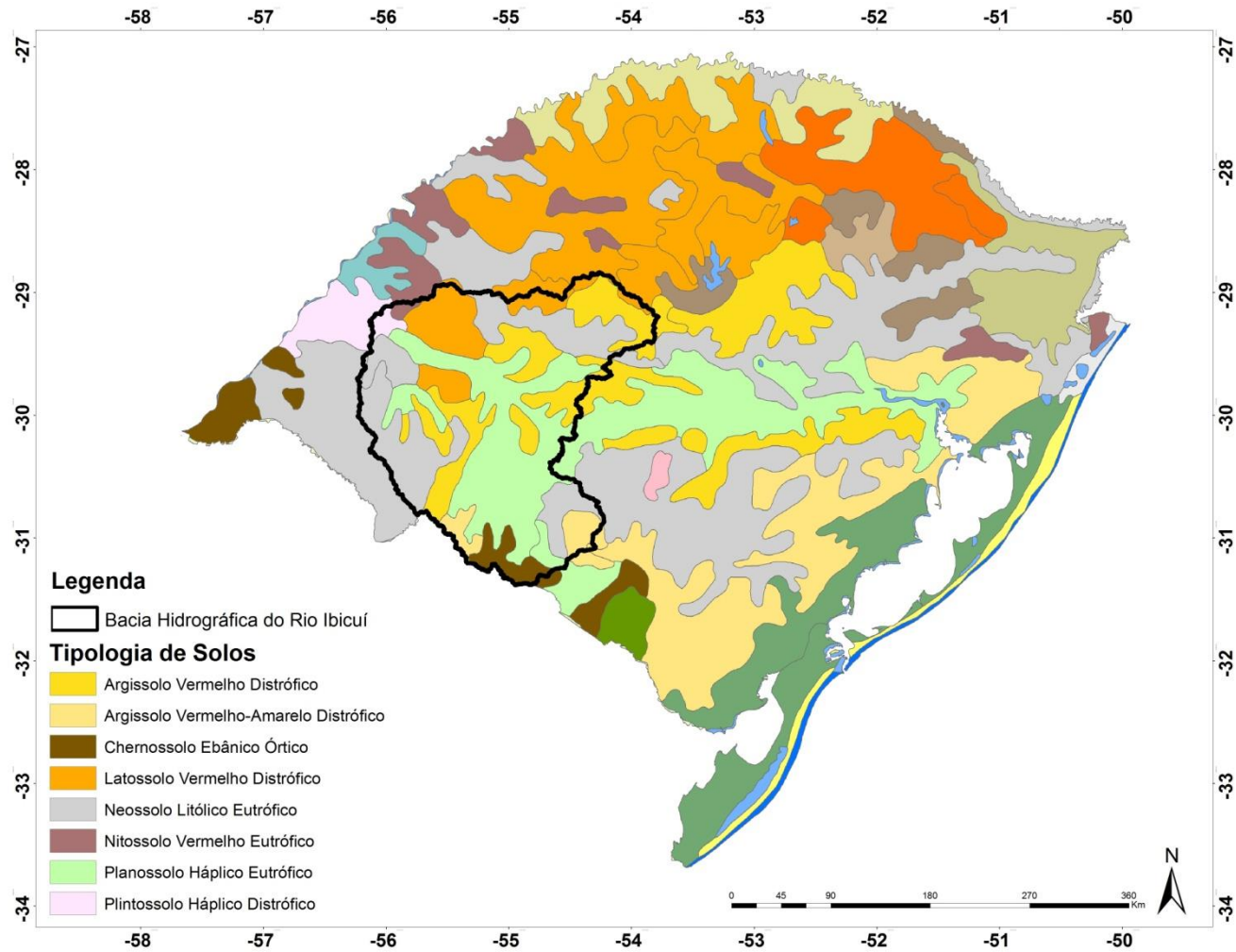
SOARES, M.N. 2009. **Proposta de Zoneamento Ecológico Econômico para o Município de Pedras Altas – RS**. 176p. Dissertação (mestrado). Programa de Pós Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande/RS.

VIEIRA, E.F. 1984. **Rio Grande do Sul; Geografia Física e Vegetação**. Ed. Sagra. Porto Alegre/RS.

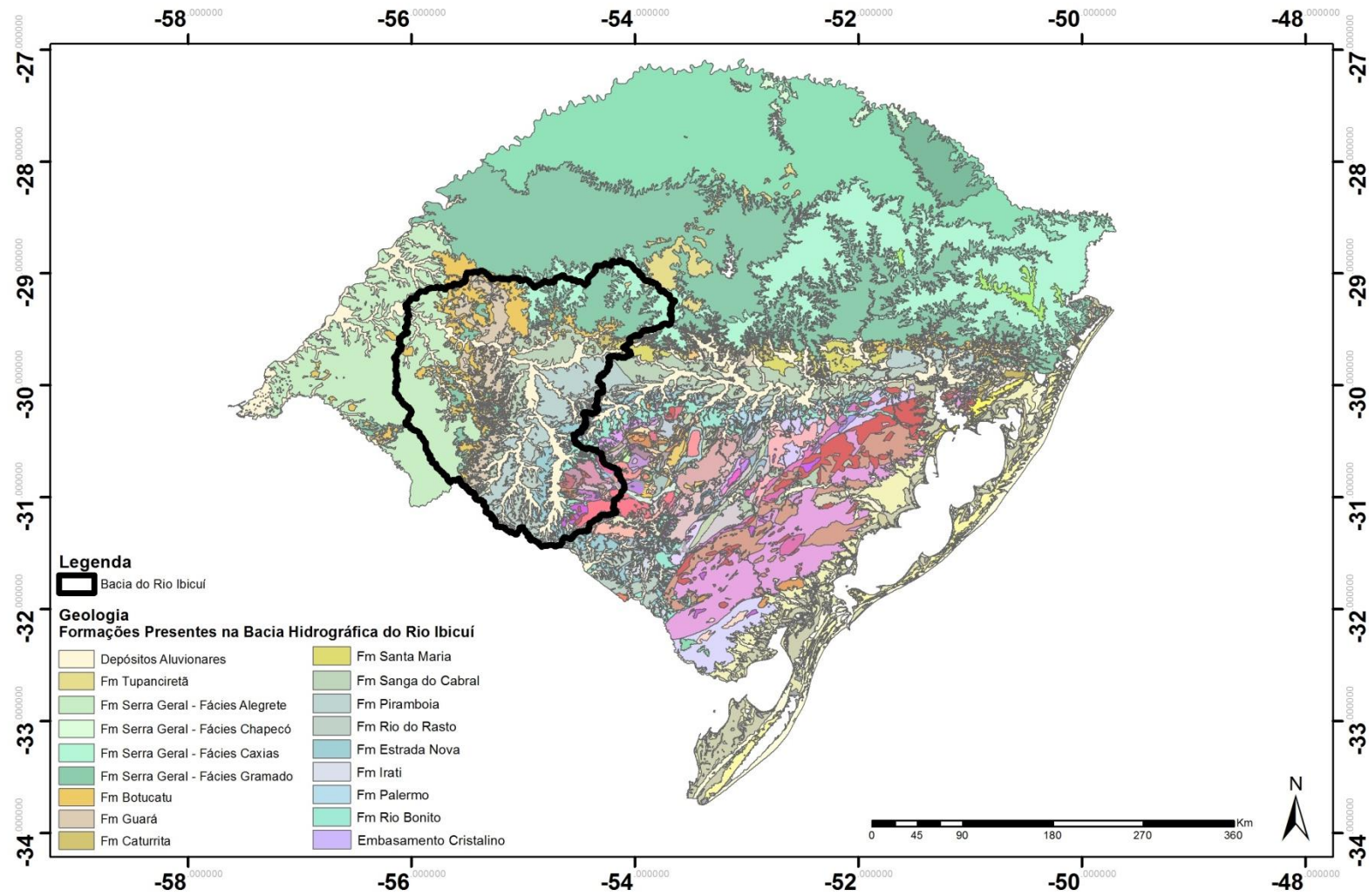
WAHNFRIED, I.; HIRATA, R. 2005. **Comparação dos Métodos de Estimativa de Recarga de Aquíferos em uma Planície Aluvionar na Bacia Hidrográfica do Alto**

**Tietê (São Paulo).**Revista Brasileira dos Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 15-25.

# ANEXO 1. Tipologias de solos no Rio Grande do Sul



## ANEXO 2. Mapa Geológico do Rio Grande do Sul



### ANEXO 3. Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul

