

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Dissertação de Mestrado

**Aplicabilidade de filtro digital para separação de escoamento em bacias
hidrográficas sob o domínio de aquíferos fraturados**

Tamiris Araújo Duarte Castro

Pelotas, 2021

Tamiris Araújo Duarte Castro

Aplicabilidade de filtro digital para separação de escoamento em bacias hidrográficas sob o domínio de aquíferos fraturados

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Beskow

Coorientadora: Prof^ª. Dra. Juliana Pertille

Pelotas, 2021

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

C355a Castro, Tamiris Araújo Duarte

Aplicabilidade de filtro digital para separação de escoamento
em bacias hidrográficas sob o domínio de aquíferos fraturados /
Tamiris Araújo Duarte Castro ; Samuel Beskow, orientador ;
Juliana Pertille, coorientadora.

— Pelotas, 2021.

107 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em
Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico,
Universidade Federal de Pelotas, 2021.

1. Escoamento de base. 2. Filtro de Eckhardt. 3. Análise de
lineamentos. 4. Aquíferos basálticos. I. Beskow, Samuel, orient. II.
Pertille, Juliana, coorient. III. Título.

CDD : 627

Tamiris Araújo Duarte Castro

Aplicabilidade de filtro digital para separação de escoamento em bacias hidrográficas sob o domínio de aquíferos fraturados

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 05/03/2021

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Samuel Beskow (Orientador)

Doutor em Engenharia Agrícola/Engenharia de Água e Solo pela Universidade Federal de Lavras (UFLA).



Prof.ª Dra. Juliana Pertille (Coorientadora)

Doutora em Geociências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).



Prof.ª Dra. Maria Cândida Moitinho Nunes

Doutora em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).



Prof. Dr. Matheus Fonseca Durães

Doutor em Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Agradecimentos

Ao professor Doutor Samuel Beskow, pela constante orientação. À professora Doutora Juliana Pertille pela orientação e troca de conhecimento. Aos meus pais Mariane e Sebastião, pelo apoio incondicional. Aos meus irmãos Lívia e Renan pela parceria. E meus afilhados, Murilo e Miguel, por serem motivação para meu crescimento.

Aos colegas do Laboratório em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas que contribuíram em todo o processo. Aos colegas das geociências pelas ideias, contribuições e discussões, em especial ao Doutor Áquila Mesquita e a professora Doutora Paola Arab e o pesquisador em geociências Renato Mendonça. Aos colegas do Laboratório de Geociências (UFPEl) pelo apoio e incentivo.

Aos colegas do Serviço Geológico do Brasil (SUREG-GO) pelo incentivo e parceria. À Universidade Federal de Pelotas e ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos.

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

Resumo

CASTRO, Tamiris Araújo Duarte. **Aplicabilidade de filtro digital para separação de escoamento em bacias hidrográficas sob o domínio de aquíferos fraturados**. Orientador: Samuel Beskow. Coorientadora: Juliana Pertille. 2021. 107 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

Um dos maiores desafios de planejamento e gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas é a quantificação dos diferentes escoamentos que compõem a vazão dos rios. Filtros digitais foram desenvolvidos para realizar a separação do escoamento de base. O filtro de Eckhardt foi selecionado para ser utilizado neste estudo por ser amplamente utilizado e apresentar bons resultados. O filtro utiliza dois parâmetros, o BFI_{max} (*maximum baseflow index*) e o coeficiente de recessão em seus cálculos. Neste estudo utilizou-se três metodologias para determinação do parâmetro BFI_{max}, sendo a Proposta 1 o valor definido pelo próprio autor do filtro, a Proposta 2, que utiliza um filtro inverso e a Proposta 3 utiliza as vazões características. A separação do escoamento foi realizada em duas propostas de avaliação da série histórica. A primeira utilizou-se toda a série histórica disponível para as bacias, cerca de 40 anos de dados, enquanto que a segunda utilizou-se apenas um período de 5 anos. Os cálculos foram realizados para quatro bacias hidrográficas situadas no Rio Grande do Sul, duas situadas na Escudo Sul-rio-grandense e duas no Planalto Setentrional. Observou-se a necessidade de avaliação dos resultados de determinação do BFI_{max} e da contribuição do escoamento de base segundo características geológicas, hidrogeológicas e estruturais das bacias. Essas características não são consideradas quando da aplicação do filtro e definem o comportamento do fluxo de água subterrânea, principalmente quando se trata de aquíferos fraturados, como é o caso das bacias estudadas. A análise dos lineamentos é considerada uma ferramenta eficiente e prática na caracterização das discontinuidades em aquíferos fraturados. Através da observação dos hidrogramas de escoamento de base, observou-se que os valores de BFI_{max} definidos (Proposta 1) produziram resultados abaixo dos valores observados, mesmo durante os períodos de recessão, indicando uma subestimação do escoamento de base. As propostas 2 e 3 produziram valores semelhantes entre si. Apenas uma das bacias, localizada no Planalto Setentrional, apresentou resultados de contribuição de escoamento de base bem abaixo das demais. Isso indica que a bacia deve possuir alguma característica que dificulte o escoamento de base.

Palavras-chave: Escoamento de base. Filtro de Eckhardt. Análise de lineamentos. Aquíferos basálticos.

Abstract

CASTRO, Tamiris Araújo Duarte. **Applicability of a digital filter for runoff separation in watersheds under the domain of fractured aquifers**. advisor: Samuel Beskow. Co-advisor: Juliana Pertille. 2021. 107 f. Dissertation Project (Master Science in Water Resources) - Graduate Program in Water Resources, Center for Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2021.

One of the biggest challenges in planning and managing water resources in watersheds is the quantification of the different runoff components that make up streamflows in rivers. Digital filters were developed to separate the base flow component. The Eckhardt's filter was selected to be used in this study because it is widely used and presents good results. This filter uses two parameters, the BFI_{max} (maximum baseflow index) and the recession coefficient. In this study, three methodologies were used to determine the BFI_{max} parameter. The Proposal 1 considers the default values defined by the author of the filter, while Proposal 2 uses an inverse filter and Proposal 3 takes into account the characteristics of streamflows. The runoff separation was carried out according to two proposals for the evaluation of the historical series of data: i) the entire historical series available for the watersheds, corresponding to about 40 years of data; and ii) only 5 years were applied. The calculations were made for four watersheds located in Rio Grande do Sul State. Two of them are located in the Escudo Sul-rio-grandense, and two in the Planalto Setentrional. The results of BFI_{max} and the contribution of base flow to streamflow were assessed in the context of the geological, hydrogeological and structural characteristics of the watersheds. These characteristics are not considered when applying the filter to define the behavior of the base flow, especially in the case of fractured aquifers, which are found the studied watersheds. The analysis of lineaments is considered an efficient and practical tool in the characterization of discontinuities in fractured aquifers. By observing the base flow hydrographs, it was observed that the defined BFI_{max} values (Proposal 1) produced results below the observed values, even during the recession periods, indicating an underestimation of the base flow. Proposals 2 and 3 resulted in similar values. Only one of the watersheds, located in the Northern Plateau, presented results of contribution of baseflow greatly different from the others. This indicates that the watershed must have some characteristic that hinders the occurrence of baseflow.

Keywords: Base flow. Eckhardt filter. Lineament analysis. Basaltic aquifers.

Lista de Figuras

Figura 1	Representação esquemática de um hidrograma a partir de um evento isolado de precipitação, evidenciando o comportamento variável da vazão ao longo do tempo	20
Figura 2	Representação esquemática de um hidrograma para um evento isolado de precipitação, apresentando a contribuição do escoamento superficial direto e de base. Modificado de Tucci (2001)...	22
Figura 3	Hidrograma esquemático para um evento isolado de precipitação, apresentando a separação do escoamento pelos três métodos apresentados por Chow; Maidment; Larry (1988). Modificado De Chow; Maidment; Larry (1988)	24
Figura 4	Blocos esquemáticos evidenciando a persistência das fraturas e falhas (a) estruturas persistentes; (b) estruturas não persistentes. Modificado de Pinotti; Carneiro (2013)	30
Figura 5	Bloco diagrama esquemático mostrando o comportamento variado dos lineamentos em relação às suas direções e mergulhos. Modificado de Lisboa et al. (1997)	31
Figura 6	Coluna esquemática de um derrame basáltico evidenciando suas diferentes texturas e estruturas. Modificado de Leinz (1949)	32
Figura 7	Imagem esquemática identificando as possíveis áreas propícias à circulação de água. Modificada de Leinz (1949)	33
Figura 8	Mapa do Brasil identificando as divisões por bacias hidrográficas feita pelo DNAEE. Modificado de ANA (2019b)	38
Figura 9	Localização das bacias hidrográficas principais presentes no Rio Grande do Sul de acordo com a classificação do DNAEE, suas sub-bacias e em destaque a localização das bacias hidrográficas selecionadas para este estudo, sendo: bacia hidrográfica do arroio Fragata – estação Passo dos Carros (Bhaf-PC), bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato (Bhab-CC), bacia hidrográfica do rio Piratinim – estação Passo dos Dias (Bhrp-PD) e bacia hidrográfica do rio Icamaqua – estação Passo das Turmas (Bhri-PT). Fonte: Modificado de ANA (2019b)	39
Figura 10	Mapa climático do estado do Rio Grande do Sul segundo classificação de Köppen (Adaptado de Alvares et al., 2013) e em destaque as bacias hidrográficas estudadas: bacia hidrográfica do Arroio Fragata – estação Passo dos Carros (Bhaf-PC), bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato (Bhab-CC), bacia hidrográfica do rio Piratinim – estação Passo dos Dias (Bhrp-PD) e bacia hidrográfica do rio Icamaqua – estação Passo das Turmas (Bhri-PT). Fonte: Adaptado de Alvares et al. (2013)	42
Figura 11	Mapa do estado do Rio Grande do Sul com a localização das estações meteorológicas e as bacias de estudo, sendo: sendo: bacia hidrográfica do arroio Fragata – estação Passo dos Carros (Bhaf-PC), bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato (Bhab-CC), bacia hidrográfica do rio Piratinim – estação Passo dos Dias (Bhrp-PD) e bacia hidrográfica do rio Icamaqua – estação Passo das Turmas (Bhri-PT)	43
Figura 12	Bacia hidrográfica do arroio Fragata (Bhaf-PC). (a) Mapa geológico com as unidades litoestratigráficas. (b) Mapa hidrogeológico evidenciando os sistemas aquíferos. (a) Modificado das cartas geológicas Pelotas SH.22-Y-D-IV (CRUZ, 2018a) e Pedro Osório SH.22-Y-C-VI (CRUZ, 2018b). (b) Modificado de CPRM (2005)	50

Figura 13	Bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato (BHAB-CC). (a) Mapa geológico com as unidades litoestratigráficas. (b) Mapa hidrogeológico evidenciando os sistemas aquíferos. Fontes: (a) Modificado das cartas geológicas Passo São Diogo SH.22-Y-C-IV (IGLESIAS; KLEIN; CAMOZZATO, 2014) e Pinheiro Machado SH.22-Y-C-V (CRUZ, 2018c). (b) modificado de CPRM (2005)	52
Figura 14	Bacia hidrográfica do rio Piratinim – Passo dos Dias. (a) Mapa geológico com as unidades litoestratigráficas. (b) Mapa hidrogeológico com os sistemas aquíferos. Fontes: (a) modificado de IBGE (2003a). (b) modificado de CPRM (2005)	55
Figura 15	Bacia hidrográfica do rio Icamaqua – estação Passo da Turma. a) Mapa geológico com as unidades litoestratigráficas, modificado das Folhas Santo Ângelo e Santiago, publicadas por IBGE (2003a, 2003b). (b) Mapa hidrogeológico com os sistemas aquíferos, modificado de CPRM (2005)...	56
Figura 16	Hidrogramas apresentando as vazões observadas com destaque para o período utilizado na determinação do coeficiente de recessão para cada bacia hidrográfica estudada: (a) bacia hidrográfica do arroio Fragata – estação Passo dos Carros; (b) bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato; (c) bacia hidrográfica do rio Piratinim – estação Passo dos Dias; (d) bacia hidrográfica do rio Icamaqua – estação Passo das Turmas	59
Figura 17	Gráficos de BFImax para cada uma das propostas avaliadas de acordo com os dois períodos de avaliação da série histórica propostos, para cada bacia de estudo. (a) BFImax de acordo com a Proposta 1, proposto por Eckhardt (2005). (b) BFImax de acordo com a Proposta 2, filtro inverso proposto com Collischonn; Fan (2013). (c) BFImax de acordo com a Proposta 3, vazões características proposto por Collischonn; Fan (2013)	64
Figura 18	Trechos dos hidrogramas apresentando as vazões observadas e as vazões decorrentes do escoamento de base calculadas de acordo com cada uma das três propostas para a bacia hidrográfica do arroio Fragata – estação Passo dos Carros	65
Figura 19	Trechos dos hidrogramas apresentando as vazões observadas e as vazões decorrentes do escoamento de base calculadas de acordo com cada uma das propostas para a bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato	66
Figura 20	Trechos dos hidrogramas apresentando as vazões observadas e as vazões decorrentes do escoamento de base calculadas de acordo com cada uma das propostas para a bacia hidrográfica do rio Piratinim – estação Passo dos Dias	67
Figura 21	Trechos dos hidrogramas apresentando as vazões observadas e as vazões decorrentes do escoamento de base calculadas de acordo com cada uma das propostas para a bacia hidrográfica do rio Icamaqua – estação Passo das Turmas	67
Figura 22	Gráficos de contribuição do escoamento de base para cada uma das propostas avaliadas de acordo com os dois períodos de avaliação da série histórica propostos, para cada bacia de estudo (bacia hidrográfica do arroio Fragata – estação Passo dos Carros; bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato; bacia hidrográfica do rio Piratinim – estação Passo dos Dias; bacia hidrográfica do rio Icamaqua – estação Passo das Turmas). (a) de acordo com a Proposta 1, proposto por Eckhardt (2005). (b) de acordo com a Proposta 2, filtro inverso proposto com Collischonn; Fan (2013). (c) de acordo com a Proposta 3, vazões características proposto por Collischonn; Fan (2013)	70

Figura 23	Mapa de lineamentos e diagramas de rosetas de frequência e comprimento dos lineamentos da bacia hidrográfica do arroio Fragata – estação Passo dos Carros	72
Figura 24	Mapa de lineamentos e diagramas de rosetas de frequência e comprimento dos lineamentos da bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato	73
Figura 25	Mapa de lineamentos e diagramas de rosetas de frequência e comprimento dos lineamentos da bacia hidrográfica do rio Piratinim – estação Passo dos Dias	74
Figura 26	Mapa de lineamentos e diagramas de rosetas de frequência e comprimento dos lineamentos da bacia hidrográfica do rio Icamagua – estação Passo da Turma	75
Figura 27	Mapas de densidade de lineamentos da bacia hidrográfica do arroio Fragata- estação Passo dos Carros e da bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato.....	77
Figura 28	Mapas de densidade de lineamentos da bacia hidrográfica do rio Piratinim- estação Passo dos Dias e da bacia hidrográfica do rio Icamaguã - estação Passo da Turma	78

Lista de Tabelas

Tabela 1	Principais dados morfológicos, geológicos e hidrogeológicos das bacias estudadas	41
Tabela 2	Dados de localização das estações meteorológicas, bem como de precipitação acumulada anual média da normal climatológica 1981-2010	43
Tabela 3	Dados extraídos do Portal Hidroweb das bacias selecionadas para análise, observando que as informações foram obtidas em 2019.....	44
Tabela 4	Período da série histórica utilizada para o cálculo do coeficiente de recessão e do BFI _{max} para cada bacia	59
Tabela 5	Resultados da determinação do coeficiente de recessão, das vazões características Q_{90} e Q_{50} e a relação entre elas e o parâmetro BFI _{max} , para cada proposta, para cada uma das bacias de estudo	60
Tabela 6	Escoamento de base médio (em lâmina) e porcentagem de contribuição do escoamento de base em relação ao escoamento total para cada bacia estudada de acordo com as diferentes propostas de determinação do BFI _{max} , utilizando dados de toda a série histórica disponível	61
Tabela 7	Período da série histórica utilizada para o cálculo do BFI _{max} , as vazões características Q_{90} e Q_{50} , e os resultados de BFI _{max} calculado para cada bacia no período entre 2010 e 2015	63
Tabela 8	Escoamento de base médio (em lâmina) e porcentagem de contribuição do escoamento de base em relação ao escoamento total para cada bacia estudada de acordo com as diferentes propostas de determinação do BFI _{max} , utilizando dados da série histórica no período entre 2010 e 2015	68
Tabela 9	Síntese descritiva das características geológicas, hidrogeológicas e dos lineamentos de cada uma das bacias do estudo. As informações completas de geologia e hidrogeologia estão disponíveis no item “3.4. Caracterização fisiográfica” deste estudo. As informações dos lineamentos estão disponíveis no item “4.1. Resultados”	79

Sumário

1. INTRODUÇÃO	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1. Ciclo hidrológico	16
2.2. Características morfométricas de uma bacia hidrográfica	17
2.3. Escoamento total de um curso d'água e hidrogramas	19
2.4. A separação do escoamento e gestão dos recursos hídricos	21
2.5. Métodos de separação do escoamento	23
2.6. Características relevantes à caracterização de um aquífero fraturado	27
2.7. Recarga, armazenamento e descarga de aquíferos	34
3. MATERIAL E MÉTODOS	37
3.1. Bacias hidrográficas de estudo	37
3.1.1. Análise morfométrica das bacias	40
3.1.2. Clima	41
3.2. Dados hidrológicos	44
3.3. Separação de escoamento usando o filtro digital recursivo de eckhardt	45
3.4. Caracterização fisiográfica	49
3.4.1. Caracterização geológica e hidrogeológica	49
3.4.2. Lineamentos	57
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1. Resultados	59
4.2. Discussões	79
5. CONCLUSÕES	94
REFERÊNCIAS	97

1. INTRODUÇÃO

A água é indispensável à vida no planeta, sendo utilizada em processos industriais, agrícolas e para consumo humano em diferentes vertentes, como abastecimento público e recreação. De acordo com a Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, conhecida como Lei das Águas e que institui a Política Nacional dos Recursos Hídricos, a água é um recurso natural limitado, público, dotado de valor econômico e sua gestão deve sempre priorizar os usos múltiplos. Um dos maiores desafios de planejamento e gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas é a quantificação dos escoamentos superficial direto, subsuperficial e de base que compõem a vazão dos rios. A quantificação adequada de cada escoamento auxilia no desenvolvimento de políticas adequadas de gestão territorial estratégica, compreendendo o planejamento de uso e exploração de recursos hídricos.

O escoamento superficial direto está rigorosamente relacionado à parcela da precipitação que escoar sobre a superfície quando não é possível a infiltração. O escoamento subsuperficial corresponde ao fluxo de água logo abaixo da superfície do solo, acima da zona saturada dos aquíferos. Já o escoamento de base (ou subterrâneo) refere-se à drenagem dos aquíferos.

Devido à complexidade da interação entre esses componentes nas bacias hidrográficas, uma série de metodologias pode ser aplicada para a separação dos escoamentos (BARNES, 1939; PETTYJOHN; HENNING, 1979; CHOW; MAIDMENT; LARRY, 1988; WITTENBERG, 1994; ECKHARDT, 2005). Os modelos de separação de escoamento foram desenvolvidos como métodos manuais que utilizam o hidrograma para estimar a contribuição do escoamento de base (BARNES, 1939; CHOW; MAIDMENT; LARRY 1988). Com a ampliação do monitoramento e a constituição de séries históricas mais longas, filtros digitais foram criados (PETTYJOHN; HENNING, 1979; WITTENBERG, 1994; ECKHARDT, 2005). Em função da ampla aplicabilidade, os filtros digitais têm sido comumente utilizados em todos os tipos de bacias hidrográficas, inclusive naquelas localizadas em distintos contextos geológicos (aquíferos porosos, fraturados, cársticos).

Um dos métodos de separação de escoamentos muito aplicado é o filtro desenvolvido por Eckhardt (2005), que utiliza um filtro digital recursivo de dois parâmetros, o coeficiente de recessão α e o BFI_{max} (*maximum baseflow index*) que é o índice máximo do escoamento de base. O método pode ser aplicado apenas com dados de vazão, mas não considera as características fisiográficas específicas de

cada bacia hidrográfica, considerando apenas duas características bastante generalizadas. A primeira é a perenidade do curso d'água principal (perene ou efêmero) e a segunda é o tipo de aquífero predominante na área (fraturado ou granular). Em outros métodos, as características fisiográficas também não são consideradas (BARNES, 1939; PETTYJOHN; HENNING, 1979; CHOW; MAIDMENT; LARRY 1988). Quando comparados com métodos gráficos, o filtro de Eckhardt (2005) representou com mais coerência o comportamento hidrológico na maioria das bacias estudadas por Xie et al., (2020), que utilizou a proposta do filtro inverso para definição do BFImax segundo proposta de Collischonn; Fan (2013).

Cabe salientar que o escoamento de base desempenha um importante papel na manutenção da vazão dos rios perenes, que é dada pelo fluxo de água dos aquíferos em períodos de ausência de eventos de precipitação (COELHO et al., 2015). A determinação do escoamento de base também é uma importante ferramenta utilizada para quantificação da recarga dos aquíferos (MATTIUZI et al., 2015; BORGES et al. 2017; BORTOLIN et al., 2018).

Desta forma, observa-se a necessidade do desenvolvimento e aprimoramento das técnicas de separação do escoamento, incluindo, nas análises, fatores estruturais e litológicos das rochas presentes na região de interesse. No caso de aquíferos fraturados, essa avaliação é significativa, pois o movimento da água subterrânea na bacia está vinculado às descontinuidades. As descontinuidades são frequentemente relacionadas aos esforços tectônicos, mas também podem estar vinculadas a processos de formação da própria rocha (rochas vulcânicas) ou ainda a processos de intemperismo físico (alívio de pressão). Cada aquífero fraturado irá apresentar um conjunto específico dessas descontinuidades em determinado arranjo tridimensional que, junto com outras características, condicionam o fluxo de água (FEITOSA et al. 2008).

A identificação e caracterização das descontinuidades pode ser realizada por métodos indiretos através da análise de lineamentos em fotografias aéreas e imagens de satélite, ou mesmo levantamentos aerogeofísicos e geofísica de poços (FERNANDES, 2008). A análise de lineamentos de aquífero fraturado é considerada uma ferramenta eficiente na caracterização das descontinuidades e áreas de recarga, além de apresentarem baixo custo. Um exemplo dessa aplicação, pode ser observado em Betiollo (2006) que utilizou a análise de mais de mil e seiscentos lineamentos em

uma área, definindo assim padrões estruturais que condicionam o movimento das águas subterrâneas e suas características hidroquímicas.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a aplicabilidade do filtro de Eckhardt (2005) em quatro bacias em domínios fraturados através de três etapas. A primeira compreende a comparação entre os valores fixos de BFI_{max} propostos por Eckhardt (2005) com os valores de BFI_{max} calculados por filtro inverso e vazões características sugeridos por Collischonn; Fan (2013). Além disso, serão comparados os resultados do cálculo do escoamento de base para cada determinação de BFI_{max}, nomeados aqui como Proposta 1 (ECKHARDT, 2005), Proposta 2 e Proposta 3 (COLLISCHONN; FAN, 2013), tendo como dados, toda a série histórica de vazões disponível para cada bacia hidrográfica.

A segunda etapa apresenta a comparação dos valores calculados para os mesmos parâmetros e os resultados de escoamento de base utilizando o filtro de Eckhardt (2005) para as três propostas, mas utilizando apenas um período da série histórica igual para todas as bacias. Cabe salientar, que a própria utilização desses dos filtros nas condições de clima, geologia e solos brasileiros ainda são escassos. Este aspecto é importante, haja vista que a metodologia foi desenvolvida e testada em bacias de outros países, podendo não apresentar resultados compatíveis quando aplicados no Brasil.

A terceira etapa avalia os resultados com base nas características geológicas e hidrogeológicas das quatro bacias estudadas. Duas bacias hidrográficas encontram-se no contexto hidrogeológico do Sistema Aquífero Serra Geral (MACHADO; FREITAS, 2005), a bacia hidrográfica do rio Piratinim – estação Passo dos Dias (BHRP-PD) e a bacia hidrográfica do rio Icamagua – estação Passo das Turmas (BHRI-PT), enquanto que as outras duas encontram-se no Sistema Aquífero Embasamento Cristalino (MACHADO; FREITAS, 2005), sendo estas a bacia hidrográfica do arroio Fragata – estação Passo dos Carros (Bhaf-PC) e a bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato (BHAB-CC). A avaliação é complementada pela análise dos lineamentos em cada bacia.

A integração dos resultados das três etapas constitui um avanço significativo na compreensão da influência das águas subterrâneas nas vazões dos rios, particularmente na análise de bacias sob o domínio de aquíferos fraturados. Estudos dos métodos de separação dos escoamentos podem apresentar necessidade de adaptação para contextos geológicos específicos do território brasileiro.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda alguns dos principais tópicos e conceitos relevantes para o desenvolvimento e a justificativa do presente trabalho. São apresentados trabalhos técnicos e científicos que serviram de embasamento para a construção deste.

Tópicos como ciclo hidrológico, características morfométricas de bacias hidrográficas, componentes do escoamento superficial em um curso d'água e as relações entre os diferentes tipos de escoamento, além de informações sobre hidrogramas, estão descritos. Foram compiladas também informações sobre a importância da separação do escoamento e apresentados alguns métodos de separação do escoamento considerados relevantes, desde os primeiros a serem desenvolvidos, até alguns mais atuais.

A descrição de alguns aspectos geológicos e estruturais relevantes para a caracterização de aquíferos fraturados sob diferentes sistemas aquíferos também é abordada neste capítulo.

2.1. Ciclo hidrológico

A compreensão do ciclo hidrológico significa reconhecer os processos de circulação de água no planeta e suas interações com o meio no qual está inserida. Impulsionado pela energia térmica advinda do sol, o ciclo tem início quando a água muda de estado físico se transformando em vapor e ocupando as camadas da atmosfera, sendo transportada pelas forças dos ventos até os continentes (TUNDISI, 2003). Teixeira (2007) afirma que com o aumento da altitude, há uma queda na temperatura por se tratar de uma camada com comportamento adiabático. Esse decréscimo da temperatura propicia a condensação do vapor d'água disperso que se concentra em pequenas gotas que formam as nuvens.

Quando as gotículas de água atingem tamanho e peso suficientes, dão origem à precipitação, que pode ocorrer sob a forma líquida, gelo ou neve. Quando do evento de precipitação, há uma parcela da água que fica retida em algumas superfícies e não chegam ao solo, esse processo é denominado interceptação. A partir da precipitação, existem dois caminhos que a água pode percorrer ao atingir o solo. Um deles é a infiltração no solo, que depende principalmente das características do material de superfície e engendra o escoamento subterrâneo e é responsável pela recarga de um aquífero. O escoamento subsuperficial também está presente neste contexto e é a porção da água que infiltra, mas não é responsável pela recarga dos aquíferos, ficando restrita à porção mais rasa do solo. Outro caminho é quando a capacidade de

infiltração do solo é superada e acarreta o escoamento superficial direto, que converge para a rede de drenagem.

Outro importante processo que faz parte do ciclo hidrológico é a evapotranspiração. Esse processo ocorre quando a água retorna para a atmosfera em forma de vapor, sendo tanto a água no solo e na superfície quanto as moléculas liberadas pela transpiração de plantas e animais, reiniciando o ciclo.

O ciclo hidrológico pode ser avaliado na escala de bacia hidrográfica. De acordo com Tucci (2001), bacia hidrográfica é um território delimitado por divisores de água e que apresenta uma rede de drenagem comum e que converge para um único ponto de saída, o exutório. Trajano et al. (2012) indicam que a rede de drenagem é a resposta das condições da paisagem e das alterações sofridas ao longo do tempo dentro daquele território.

É interessante entender como o ciclo hidrológico ocorre e quais condicionantes geomorfológicos da bacia hidrográfica são mais significativos, principalmente quando o interesse está relacionado à gestão de bacias. Na tentativa de tornar o processo da descrição quantitativa dos componentes presentes no ciclo hidrológico mais simples, foram sendo desenvolvidos métodos de medição, monitoramento, além de estimação dos componentes, entre eles, modelos matemáticos para estimar a separação do escoamento. Mas a quantificação desses componentes é um processo que muitas vezes exige esforço e que carrega consigo muitas incertezas e aproximações.

2.2. Características morfométricas de uma bacia hidrográfica

Uma caracterização morfométrica de bacias é importante para se conhecer seus atributos e permitir definir parâmetros de comparação entre elas. Um dos precursores de alguns conceitos morfométricos foi Zernitz (1932), que apresentou uma classificação mais detalhada dos padrões de drenagem, tendo em vista que estes padrões são reflexo tanto da inclinação e das estruturas quando da formação das drenagens, quanto da adaptação delas através das mudanças de inclinação, depressões, dobras, falhas, relacionando mudanças geológicas e geomorfológicas. O autor relata que os padrões de drenagem são respostas de um acúmulo de fatores e acabam sendo uma fonte de informação da história geológica da região a que pertence (ZERNITZ, 1932). Horton (1945) estabeleceu leis para o desenvolvimento dos cursos d'água e informa que o sistema formado por eles pode ser expresso

quantitativamente pela ordem dos cursos d'água, densidade de drenagens da bacia e a razão de comprimento entre cursos d'água de diferentes ordens.

A partir da década de 50, novos conceitos e parâmetros de morfometria de bacias hidrográficas foram sendo estudados. Diversos autores começaram a observar e tentar estabelecer relações entre as características morfométricas de uma bacia, a resposta em seus cursos d'água, as relações com o substrato rochoso e outros fatores de influência, além de aplicar os conceitos em estudos com diferentes objetivos. Entre eles pode-se citar Freitas (1952), Strahler (1952, 1956, 1957), Santos; Sobreira (2008), Cardoso et al. (2006), Tonello et al. (2006) e Pissarra et al. (2006).

Para Villela; Mattos (1975) existe uma estreita relação entre as características morfométricas da bacia hidrográfica e seu regime hidrológico, tornando o conhecimento destas características de grande utilidade prática, pois, a partir de dados conhecidos, é possível se determinar indiretamente os valores para locais onde não há dados. Muitos trabalhos científicos ainda realizam apenas caracterizações qualitativas de bacias hidrográficas, muitas vezes sendo insuficiente para efeitos de comparação, sendo necessário então uma caracterização quantitativa das bacias, quando se trata de fatores que influenciam o relevo (ALVES; CASTRO, 2003).

Características das bacias como tipo de relevo, declividade das encostas, tipo de solo, além do seu uso e ocupação e práticas de manejo, estão intimamente relacionadas com o comportamento dos escoamentos em uma bacia hidrográfica. Por exemplo, um relevo íngreme é menos propício a permitir a infiltração de água, sendo mais favorável ao escoamento superficial direto.

O fator de forma (K_f) é um índice que indica maior ou menor suscetibilidade de uma bacia a sofrer enchentes. Valores maiores de fator de forma indicam que a bacia é sujeita a enchentes, enquanto valores baixos indicam menos tendência ao fenômeno (VILLELA; MATTOS, 1975). Já o coeficiente de compacidade (K_c) é um parâmetro que, independentemente do tamanho da bacia, é sensível à forma dela, assumindo valores de coeficiente de compacidade próximos à unidade (mínimo) quanto mais próxima da uma bacia circular, e esta seria mais propensa a eventos de enchente (VILLELA; MATTOS, 1975). Essas características estão relacionadas com uma maior distribuição do escoamento superficial direto no tempo e permitindo que este escoamento tenha uma maior contribuição nas vazões da bacia hidrográfica (DE ALMEIDA et al., 2019).

As características do relevo são sistematicamente classificadas através de estudos geomorfológicos. O estudo da geomorfologia traz consigo uma análise do relevo, buscando entender a sua gênese, materiais que o compõem e os processos que atuaram e que deram origem às feições morfológicas atuais (FLORENZANO, 2008). Para se entender a evolução das feições morfológicas, é necessário considerar as características naturais geológicas, climáticas, hidrológicas, pedológicas e biológicas da região, além da influência antrópica sobre o meio (MENEZES et al., 2013).

Alguns autores citam como estudos pioneiros da geomorfologia do estado do Rio Grande do Sul o trabalho desenvolvido por Nogueira (1948) que dividiu em 4 regiões marcadas, sendo até hoje muito utilizadas: Litoral, Escudo Sul-rio-grandense, Sedimentos Gondwânicos e Planalto (ROBAINA et al., 2010; MENESES et al., 2013; ROBAINA et al., 2016; ROBAINA; TRENTIN, 2018).

Em uma revisão de trabalhos publicados sobre a geomorfologia do Rio Grande do Sul, com base em critérios morfoestruturais e topográficos, uma boa classificação seria: Escudo Sul-rio-grandense, Depressão Central, Planalto Setentrional e Planícies Costeiras (GONÇALVES; SANTOS, 1985). O presente trabalho adotou essa nomenclatura para as unidades geomorfológicas do Estado.

2.3. Escoamento total de um curso d'água e hidrogramas

Os cursos d'água que compõem uma bacia hidrográfica são descritos, dentre outros fatores, pelo comportamento de suas vazões. A vazão total de um curso d'água, componente importante do balanço hídrico, é o volume de água que passa por uma seção de um rio em um dado intervalo de tempo e é consequência da interação entre a precipitação e diversos outros processos hidrológicos da bacia hidrográfica, como a interceptação, infiltração, diferentes componentes do escoamento, evapotranspiração e armazenamento de água. O comportamento variável da vazão ao longo do tempo define uma série hidrológica para cada seção transversal de um curso d'água, de modo que tal comportamento pode ser representado por um hidrograma. O hidrograma é um gráfico que representa a variação da vazão de um curso d'água em função do tempo que reflete a interação dos componentes do ciclo hidrológico (TUCCI, 2001). A Figura 1 é uma representação esquemática de um hidrograma, apresentando a variação da vazão de um curso d'água originado a partir de um evento isolado de precipitação.

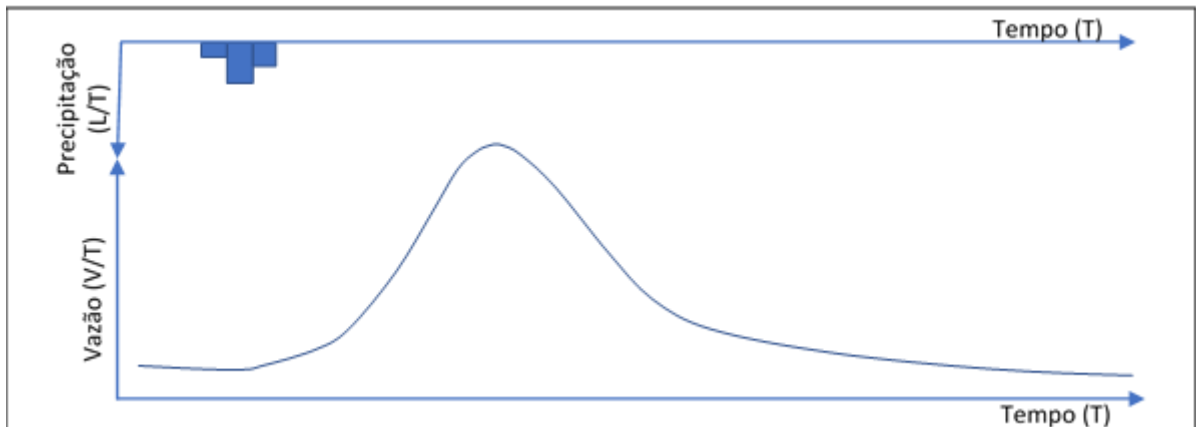


Figura 1: Representação esquemática de um hidrograma a partir de um evento isolado de precipitação, evidenciando o comportamento variável da vazão ao longo do tempo.

Para a determinação do comportamento das vazões ao longo do tempo e a caracterização dos hidrogramas de um curso d'água, se faz necessário a observação de dados reais de vazão. A disponibilidade desses dados para trabalhos em hidrologia é fundamental para realização dos cálculos e modelagens. Os dados de vazão de um rio podem ser utilizados em variados estudos hidrológicos, com objetivos diferenciados e que necessitam de uma distribuição temporal específica para cada um.

A confiabilidade e a consistência dos dados também são fatores determinantes no desenvolvimento de estudos hidrológicos. Em escala nacional, no Brasil existe uma rede de monitoramento mantida e disponibilizada pela ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico através do Portal HidroWeb (HIDROWEB, 2018). O Portal faz parte do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e reúne dados de níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimentos. Essas informações são coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), consistidos e liberados de forma gratuita a toda população.

O início do monitoramento de águas no Brasil data do séc. XIX. Desde então a rede de monitoramento vem crescendo, tendo a responsabilidade de coordenação efetivamente atribuída à ANA no ano de 2000 (HIDROWEB, 2018). Uma boa malha de distribuição dos pontos de coleta de dados é importante para o desenvolvimento de estudos hidrológicos, no sentido de que esses dados alimentam os modelos hidrológicos que estão sendo desenvolvidos e testados, além de servir de base a qualquer estudo hidrológico e ser importante para a gestão dos recursos hídricos. Segundo o site do HidroWeb (2018), a Rede Hidrometeorológica Nacional, no último

levantamento realizado em 03 de abril de 2018, possuía 4.641 pontos de monitoramento espalhados pelo país. Estes pontos podem ser divididos em: 1.874 estações que monitoram parâmetros relacionados aos cursos d'água (como vazões e sedimentos) e outras 2.767 estações que monitoram parâmetros relacionados à chuva (HIDROWEB, 2018).

Nos últimos 20 anos, os recursos hídricos receberam grande atenção de engenheiros, que criaram ferramentas para facilitar o manejo de bacias hidrográficas, mas em países em desenvolvimento, assim como o Brasil, existe uma limitação no que tange à quantidade de pontos com monitoramento fluviométrico para bacias de médio e pequeno porte (BESKOW; NORTON; MELLO, 2013). Uma outra grande dificuldade encontrada por profissionais que possuem interesse em utilizar os dados disponibilizados pela ANA é que, apesar de serem um grande avanço, muitos pontos de monitoramento não estão ativos ou possuem sequências longas de falhas.

2.4. A separação do escoamento e gestão dos recursos hídricos

A vazão de um curso d'água também é reflexo do comportamento do escoamento de água, que caracteriza a dinâmica do fluxo da água dentro da bacia hidrográfica. O escoamento pode ser dividido em três componentes de acordo com as características do meio em que ocorrem. O escoamento superficial direto é aquele que ocorre sobre a superfície, de forma livre. É importante em casos de chuvas intensas, pois são responsáveis pelos picos de vazão e as cheias dos cursos d'água. O escoamento subsuperficial se trata da parcela da precipitação que infiltra, mas segue seu fluxo em pequena profundidade. O escoamento de base ou subterrâneo é a contribuição do lençol freático, possui um fluxo lento, com menores variações temporais do que o escoamento superficial direto e é responsável por manter a vazão de um rio em períodos em que não há precipitação (COELHO et al., 2015). É importante ressaltar que o escoamento subterrâneo está relacionado com a água presente nos aquíferos e assim, a água que infiltra e chega ao nível freático, faz parte da recarga do aquífero.

A Figura 2 apresenta um hidrograma onde há determinados pontos característicos. São estes: A: início do escoamento superficial direto; B: pico do hidrograma; C: fim da contribuição do escoamento superficial direto. Os trechos do hidrograma definidos como de recessão, são aqueles em que apenas o escoamento subterrâneo está contribuindo com a vazão do rio e que apresentam um

comportamento decrescente seguindo uma função exponencial (FAGUNDES, 2014). Esse aporte de água subterrânea nos cursos d'água é reconhecido como descarga do aquífero. Na Figura 2 esse comportamento de recessão é aparente na curva anterior ao ponto A e posterior ao ponto C.

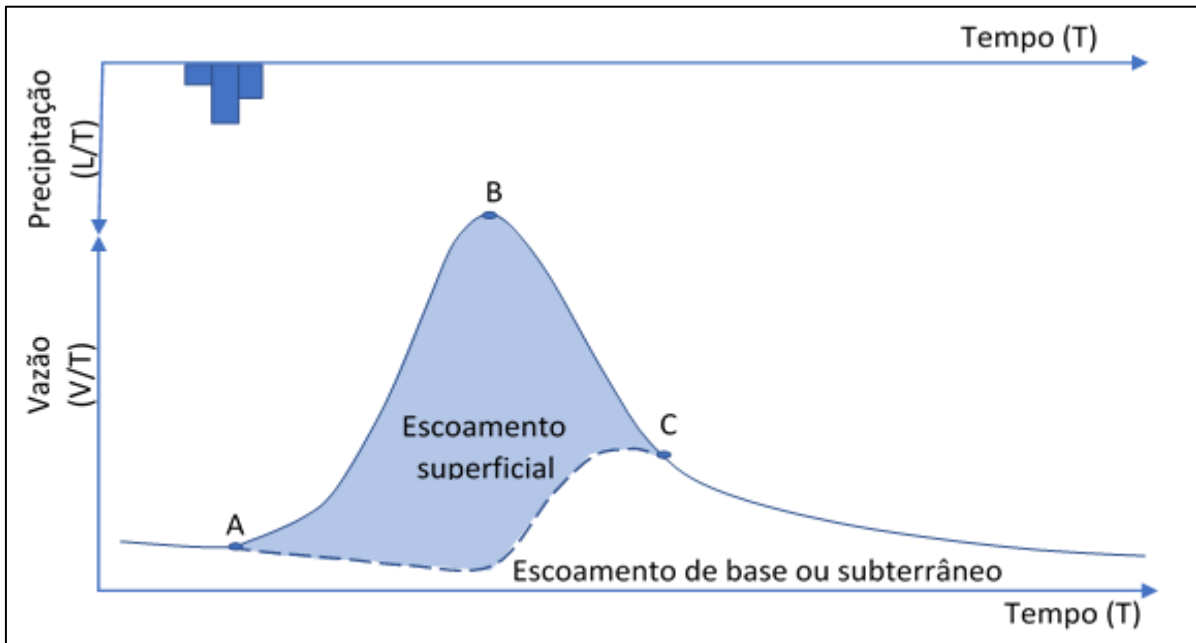


Figura 2: Representação esquemática de um hidrograma para um evento isolado de precipitação, apresentando a contribuição do escoamento superficial direto e de base. Fonte: Modificado de Tucci (2001).

Quando há eventos de precipitação e a formação de escoamento superficial direto, esse fica evidenciado no hidrograma a partir do ponto de inflexão, onde a curva altera seu comportamento decrescente das vazões e passa a ser crescente pelo incremento da chegada de volume de escoamento superficial direto e atingem o seu máximo, tornando a decrescer após o encerramento da precipitação até o momento em que não há mais contribuição do escoamento superficial direto e a vazão será mantida novamente apenas pelo escoamento subterrâneo (TUCCI, 2001).

Utilizando o hidrograma como ferramenta base, métodos de separação de escoamento foram sendo desenvolvidos ao longo dos anos. A diferenciação da contribuição dos escoamentos é importante em estudos das características hidrológicas da bacia e quando se trata do gerenciamento de bacias hidrográficas, tanto na gestão de recursos hídricos propriamente, quanto na gestão territorial estratégica.

A gestão territorial é um importante instrumento de planejamento, implantação e acompanhamento de políticas públicas e privadas, destinando investimentos na

busca de atender à crescente demanda dos recursos naturais (SPADOTTO, 2012). A gestão dos recursos hídricos deve fazer parte da gestão territorial, buscando garantir um melhor aproveitamento desse recurso visando um desenvolvimento sustentável, tendo em vista que a água é um bem de domínio público de acordo com a Lei Federal nº. 9.433 de 08/01/1997.

Dentro da gestão dos recursos hídricos, a exploração sustentável e racional da água, tanto superficial quanto subterrânea deve ser planejada, sempre com o intuito de garantir o abastecimento e suprir as demandas de água em uma bacia (BORTOLIN et al. 2018). Se faz então necessário o desenvolvimento de estudos para estimar a recarga do aquífero dominante no território. Um exemplo da aplicação desses dados pode ser encontrado no trabalho de Huang e Zhang (2004), que realizaram uma análise do comportamento dos fluxos subterrâneo e superficial sob a influência de algumas práticas de conservação da água e do solo adotados na bacia hidrográfica do rio Jialuhe, na China. Os autores concluíram que houve significativas alterações no regime hidrológico da bacia devido às alterações implementadas, com aumento do escoamento de base e tendência de diminuição do escoamento superficial direto.

Estudos relacionados com alertas de enchentes, mapeamentos de áreas de risco, descrição de comportamentos erosivos de encostas e disponibilidade hídrica também são exemplos de aplicações diretas da contribuição e caracterização do escoamento superficial direto em uma bacia hidrográfica (VENDRAME; LOPES, 2005; BARROS; MENDIONDO; WENDLAND, 2007; SILVA et al., 2009; FERNANDES; NOLASCO; MORTATTI, 2010).

2.5. Métodos de separação do escoamento

No caminho da evolução do conhecimento da ciência hidrológica e como uma importante ferramenta para o desenvolvimento da gestão integrada dos recursos hídricos, a modelagem hidrológica se faz presente e necessária (PONTES et al., 2015). Neste cenário, muitos métodos de separação de escoamento vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos, cada um deles apresentando vantagens e desvantagens em suas metodologias (KOSKELO et al., 2012). Modelos que requerem dados de eventos isolados de precipitação foram os primeiros a serem desenvolvidos. Ao longo dos anos, esses modelos deram origem aos métodos mais robustos e que permitem a separação do escoamento utilizando como base observações de longo termo.

Segundo Correa; Mello (2014), um dos métodos de separação de escoamentos mais recomendados pela literatura é o método de Barnes (1939). Trata-se de um modelo manual e subjetivo, desenvolvido para bacias onde se tem séries longas de dados diários de vazão e considera a recessão em um comportamento linear. Barnes (1939) indica que quando plotados os valores do hidrograma em papel semi-logarítmico, é possível ajustar uma reta que intercepte a maioria das bases dos períodos de recessão. A porção inferior à reta é considerada o escoamento de base. O autor concluiu que por conta das baixas temperaturas durante o inverno nas bacias norte-americanas testadas para o desenvolvimento do modelo, os resultados durante o inverno não foram satisfatórios. O congelamento e o aumento da viscosidade da água no solo nesse período são apontados como possível causa da diferença entre os outros meses do ano (BARNES, 1939).

Chow; Maidment; Larry (1988) descrevem três métodos manuais de separação de escoamento utilizando hidrogramas: a) o método da linha reta, b) o método de comprimento de base fixo, e c) o método da inclinação variável. A Figura 3 ilustra simplificada o comportamento de cada um dos três métodos descritos por Chow; Maidment; Larry (1988).

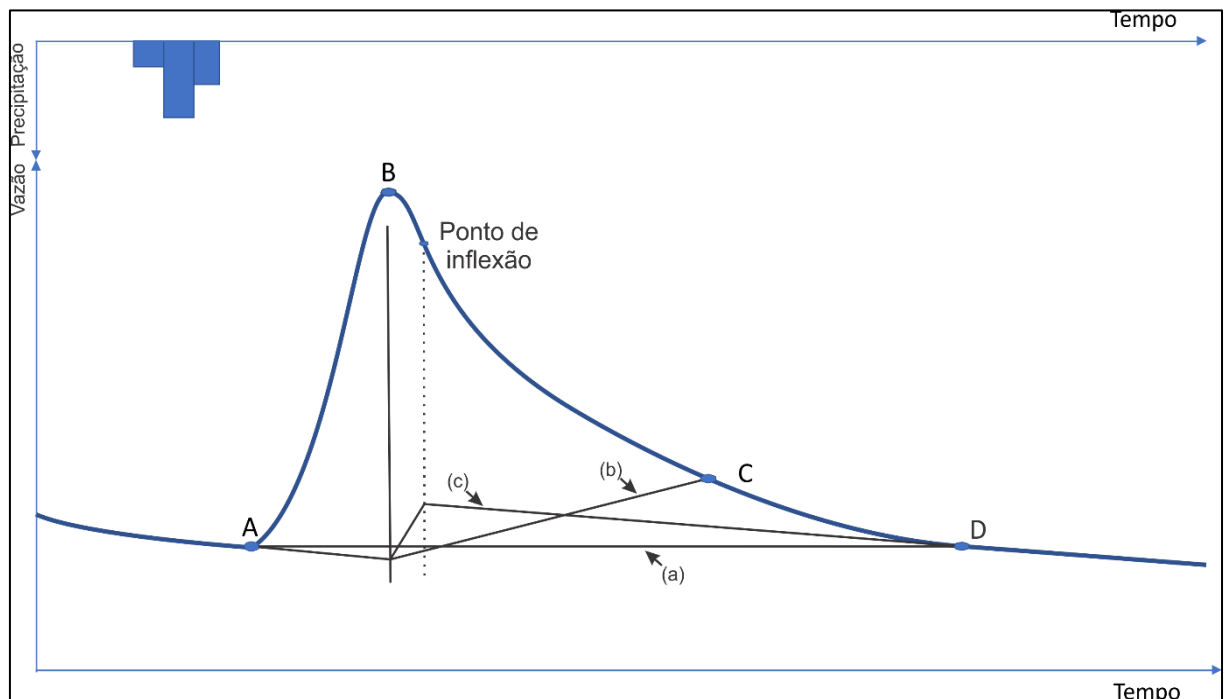


Figura 3: Hidrograma esquemático para um evento isolado de precipitação, apresentando a separação do escoamento pelos três métodos apresentados por Chow; Maidment; Larry (1988) onde a) o método da linha reta, b) o método de comprimento de base fixo, e c) o método da inclinação variável.

Fonte: Modificado de Chow; Maidment; Larry (1988).

Os pontos A, B, C e D em destaque na Figura 3 marcam respectivamente: ponto de inflexão, início do escoamento superficial direto; pico de cheia, ou seja, o ponto mais alto do hidrograma; fim do escoamento superficial direto; e ponto de inflexão da recessão do hidrograma.

O método da linha reta (a) consiste em delimitar uma linha horizontal a partir do ponto de inflexão que marca o início do escoamento superficial direto (A) até um ponto de recessão do hidrograma (D). Este método é indicado por Chow; Maidment; Larry (1988) para ser utilizado para drenagens caracterizadas como efêmeras. Outro método, conhecido como de comprimento de base fixo (b), consiste em extrapolar uma reta simulando a continuação da declinação da recessão anterior ao início do escoamento superficial direto. Essa reta é projetada até uma reta vertical que passa pelo pico do hidrograma (B). Neste método, assume-se um tempo determinado entre o pico do hidrograma e o final do escoamento superficial direto. O terceiro método sugerido por Chow; Maidment; Larry (1988) é o método da inclinação variável. O início da superfície de separação do escoamento de base é semelhante ao método descrito anteriormente e a curva de recessão após o fim do escoamento superficial direto (D) é extrapolada para um tempo anterior. Uma reta vertical que passa pelo ponto de inflexão superior é utilizada para conectar as duas retas extrapoladas conforme pode ser visto na Figura 3.

A separação manual dos escoamentos se torna inviável quando se trata de hidrogramas de longo termo. Foram desenvolvidos então filtros automáticos de separação, visando à diminuição do tempo de cálculo e minimização de inconsistências e subjetividades. Os métodos de Intervalo Fixo, Intervalo Móvel e Mínimo Local, desenvolvidos por Pettyjohn; Henning (1979), utilizam filtros digitais com baixa complexidade de aplicação para separação de escoamento superficial direto e de base e suas utilizações não envolvem limitações práticas (MIRANDA, 2012).

Os métodos Intervalo Fixo, Intervalo Móvel e Mínimo Local foram incorporados no software HYSEP da U.S. Geological Survey (SLOTO; CROUSE, 1996). O programa utiliza dados de vazão diários como entrada, apresentando como resultados tabelas, gráficos e arquivos de dados com os cálculos de escoamento superficial direto, a frequência e a duração dos diferentes componentes da vazão total. A versão do HYSEP descrita no relatório de Sloto; Crouse (1996) foi desenvolvida para a fácil inclusão de outros métodos de separação de escoamentos.

Wittenberg (1994) afirma que a recessão ou descarga do aquífero apresenta um comportamento não-linear. O autor desenvolveu um modelo de separação de escoamento baseado nessa característica. A equação desenvolvida exibe os parâmetros a e b , calibrados computacionalmente de maneira iterativa. O autor encontrou um valor próximo de 0,4 para o parâmetro exponencial do modelo na maioria das 21 estações de monitoramento testadas. Concluiu-se que os valores encontrados para este parâmetro estão longe de um fator linear (próximo de 1) e que os ajustes entre a equação do modelo e os dados reais são muito bons em comparação aos modelos que consideram um comportamento linear.

Chapman (1999) testou modelos de um, dois e três parâmetros para calcular o escoamento de base com base em dados hidrológicos de 13 estações de monitoramento na Austrália e concluiu que os modelos de dois parâmetros apresentaram resultados mais plausíveis para a determinação do índice de escoamento de base (BFI) do que os outros dois. Esse índice diz respeito à relação entre o escoamento de base e o escoamento total do curso d'água, indicando que, quanto mais próximo de 1,00 (valor máximo possível), maior a contribuição do escoamento de base. Sobre a caracterização da vazão de um curso d'água, o autor concluiu que, para períodos de recessão maiores que 10 dias, o modelo linear apresenta uma aproximação muito boa (CHAPMAN, 1999).

Eckhardt (2005) desenvolveu um filtro digital recursivo utilizando de equações com um, dois ou três parâmetros para chegar no resultado com um modelo geral de dois parâmetros. Este modelo apresenta na sua equação geral o índice máximo do escoamento de base (BFImax), que é um caso particular do índice BFI, indica a máxima relação entre o escoamento de base e o escoamento total do curso d'água. O autor propõe valores fixos para o BFImax, considerando algumas características do aquífero que contribui para a vazão do curso d'água em análise (ECKHARDT, 2005). O parâmetro BFImax pode sofrer influências dos controles geológicos e hidrogeológicos das áreas sob ação nos cursos d'água (BORTOLIN et al. 2018).

Os filtros digitais retiram muito a subjetividade no processo de separação de escoamento, quando comparado com as abordagens manuais, produzindo resultados consistentes e que podem ser reproduzidos (MELATI; FAN; ATHAYDE, 2017). Os filtros são técnicas passíveis de serem automatizadas de forma simples, pois necessitam apenas de dados diários de vazão para a realização da separação do escoamento (BORTOLIN et al., 2018).

Collischonn; Fan (2013) propuseram uma metodologia para se estimar valores para o parâmetro BFI_{max} presente no filtro de Eckhardt, através da análise do hidrograma e utilizando um filtro inverso. Após testá-la em 15 bacias hidrográficas localizadas no sul e centro-oeste brasileiros, os autores indicaram uma equação para a determinação do parâmetro BFI_{max} utilizando uma relação entre as vazões características Q_{90} e Q_{50} . Tanto o filtro de Eckhardt (2005) quanto a proposta metodológica de determinação do BFI_{max} proposta por Collischonn; Fan (2013) tratam o período de recessão como sendo uma função linear quando logaritmizada.

Kostelo et al. (2012) desenvolveram um método de separação de escoamento para bacias pequenas, menores que 50 km², conhecido como SARR (*Sliding Average with Rain Record*). O método utiliza dados diários de vazão e é um dos poucos que associa os valores diários de precipitação, sendo simples e apresentando uma forte base física. Os autores concluíram que o método, apesar da restrição de utilizar apenas vazões pequenas, apresentou bons resultados em tempos de estiagem, não estimando volumes de escoamento superficial direto.

Novos métodos vêm sendo desenvolvidos e testados continuamente, na busca por alcançar resultados cada vez mais próximos dos reais. Mas esses métodos hidrológicos por vezes apresentam uma limitação no tocante à geologia da bacia a ser considerada. Muitas vezes essa caracterização geológica e hidrogeológica não é levada em consideração ou até, quando faz parte do método, é utilizada de maneira superficial. Sabendo-se que as características geológicas da área são importantes no comportamento hidrológico e hidrogeológico em uma bacia, esses parâmetros deveriam ser mais explorados.

2.6. Características relevantes à caracterização de um aquífero fraturado

Duas características são muito relevantes quando tratamos de água subterrânea, trata-se da porosidade e da permeabilidade da rocha. A porosidade é intrínseca ao volume de vazios na rocha e está relacionada hidrogeologicamente com a capacidade de armazenamento de água na rocha. Já a permeabilidade está relacionada com a capacidade de fluxo da água subterrânea, e está presente quando há interconectividade entre os poros da rocha (FEITOSA et al. 2008).

A porosidade de uma rocha pode ser classificada de acordo com a sua formação. Pode ser primária ou deposicional, quando a formação dos poros é concomitante ao processo de formação da rocha. Também pode ser secundária ou

pós-deposicional, quando o processo geológico que origina os poros acontece subsequentes à formação da rocha, como por exemplo fraturas e dissolução (ARAÚJO, 2018).

Segundo Feitosa et al. (2008), as rochas sedimentares são as que normalmente apresentam porosidade primária, apesar de elas também poderem apresentar porosidade secundária devido a processos tectônicos, mas há algumas rochas cristalinas que também apresentam esse tipo de porosidade na sua formação. Vieira (2016) indica que importantes processos primários são responsáveis pela formação de porosidade primária em rochas vulcânicas, como a exsolução de gases que tem a capacidade de gerar vesículas. O autor relata diferentes estudos que mostram a importância da porosidade em rochas vulcânicas, podendo estas serem classificadas como rochas reservatório, com grandes possibilidades de armazenar fluidos como água, hidrocarbonetos ou gás.

Zou et al. (2013) apresentam uma tabela evidenciando os tipos de porosidade (primária ou secundária), relacionando os processos geológicos com os tipos de poros gerados nos processos. Por exemplo, o processo primário de “brechamento”, que permite a geração de espaços vazios e o processo de escape de gases, que produz vesículas. O autor também apresenta processos secundários de formação de porosidade, como por exemplo dissolução de minerais como em cavernas e grutas, processos tectônicos que permitem a formação de fraturas e falhas ou o resfriamento brusco do material que também pode gerar fraturas de resfriamento.

O comportamento hidrogeológico de um aquífero está intimamente relacionado com a presença de poros das rochas, mas também com a condição em que estes se encontram, se estão preenchidos, se há conectividade entre eles e até tamanho, pois em poros muito pequenos, a água pode ficar retida por adsorção. No caso de um aquífero fraturado, as características de porosidade e permeabilidade são diferenciadas em relação a aquíferos com porosidade intergranular. Feitosa et al. (2008) apresentam que aquíferos fraturados não apresentam uma homogeneidade em relação às estruturas porosas presentes, sendo possível em um mesmo aquífero, regiões com distintas concentrações dessas estruturas. Assim, estudos hidrogeológicos conduzidos nesses tipos de rochas fraturadas devem considerar as condições de formação das fraturas, a orientação espacial, o tamanho e a interconexão entre elas (BETIOLLO, 2006).

Segundo Lisboa et al. (2004), quatro fatores geológicos principais exercem influência na formação dos aquíferos. Seriam eles as características do material rochoso (textura, composição), a organização estratigráfica (variações laterais e verticais das fácies), as estruturas geológicas (fraturas, falhas, dobras, diaclases, entre outros) e também a geomorfologia da região em que está inserido (dissecação do relevo, graus de intemperismo, posição altimétrica) (LISBOA et al., 2004). A combinação diferenciada dessas características acaba gerando aquíferos singulares.

Apesar das rochas ígneas apresentarem semelhanças quanto a sua formação, as especificidades presentes em cada uma delas permite que apresentem estruturas diferentes entre si. As rochas graníticas normalmente apresentam-se como maciços rochosos e podem eventualmente conter fraturas e falhas, enquanto as rochas basálticas são formadas por sobreposição de derrames e cada um deles apresenta feições sub-horizontais características do resfriamento e que podem ser permeáveis, apresentando assim zonas com características próprias em relação à textura e estruturas, sendo um litotipo que apresenta boas propriedades aquíferas, independentemente da presença de fraturas (LISBOA et al., 2004; FERNANDES, 2008).

No caso de rochas cristalinas, a presença de fraturas e falhas é indispensável à formação de um aquífero. Mas não somente a presença dessas estruturas, a persistência e a interconectividade entre elas são fundamentais para a circulação da água subterrânea no sistema. A Figura 4 mostra dois modelos esquemáticos apresentados por Pinotti; Carneiro (2013), e evidenciam a diferença na persistência das estruturas. No bloco (a) as fraturas e falhas são persistentes e estão interconectadas, permitindo que haja circulação de água por entre elas; já o outro modelo (b) evidencia o exemplo de um bloco de rocha fraturado, mas não há interconectividade entre elas, não desenvolvendo um fluxo de água contínuo, portanto não sendo possível o desenvolvimento de um sistema aquífero.

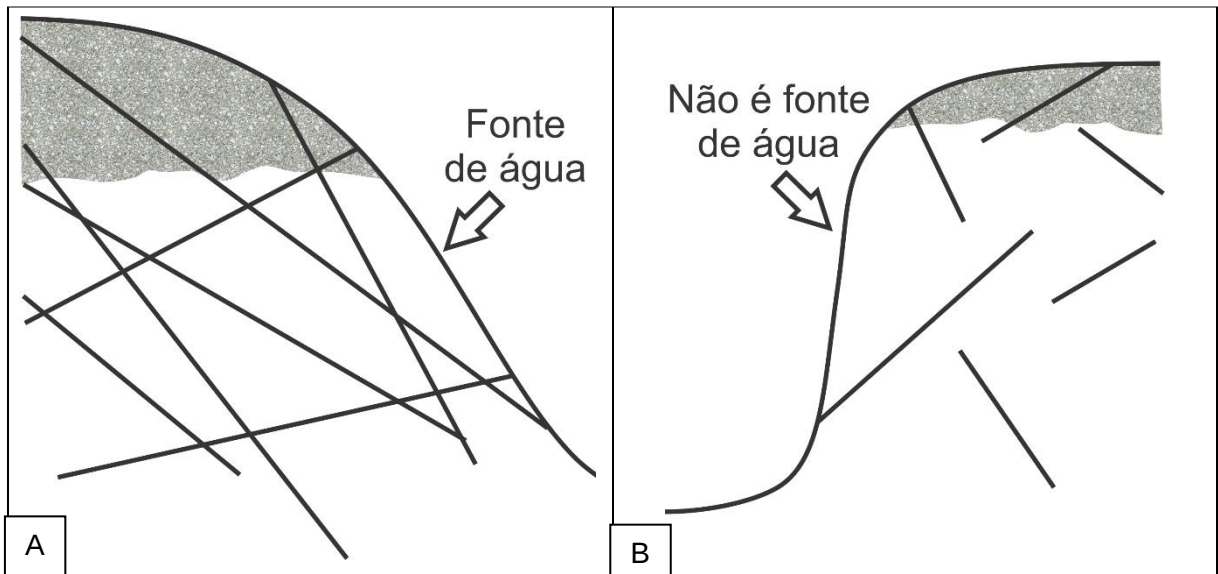


Figura 4: Blocos esquemáticos evidenciando a persistência das fraturas e falhas (a) estruturas persistentes; (b) estruturas não persistentes.

Fonte: Modificado de Pinotti; Carneiro (2013).

Para trabalhos que envolvem análises de aquíferos fraturados, é importante analisar os lineamentos da área de estudo. Segundo Andrades Filho; Fonseca (2009), lineamentos são estruturas mapeáveis em superfície importantes para o reconhecimento tectônico de uma área. Os autores dizem que os lineamentos são usados para identificar e caracterizar movimentos tectônicos, pois refletem fenômenos de subsuperfície. Cruz (2018) indica que, via de regra, os lineamentos são observáveis por sensoriamento remoto e a extração desses dados são usualmente realizados a partir de mapas de sombras de relevo, conhecidos como *hillshades*. A partir da identificação dos lineamentos, diagramas de rosetas são utilizados para representar as orientações principais e sua relação com o comprimento dos lineamentos.

Os lineamentos, portanto, marcam estruturas presentes nas rochas responsáveis pelo fluxo de água subterrânea, rochas muitas vezes com porosidade intergranular baixa ou quase inexistente. O padrão estrutural dos aquíferos fraturados é um dos principais fatores avaliados em estudos hidrogeológicos de aquíferos fraturados. Alguns exemplos de trabalhos nessa área são De Matos; Reginato; Athayde (2018) que utilizaram os dados de lineamentos morfoestruturais em diferentes escalas em conjunto com informações de vários poços tubulares para realizar a compartimentação do Sistema Aquífero Guarani (SAG), na Escarpa da Serra Geral no nordeste do RS. Também há o estudo de Peterlini (2017) que desenvolveu um trabalho de identificação e mapeamento de lineamentos na bacia do ribeirão

Cambé em Londrina (PR), a fim de identificar a influência deles na produtividade dos poços tubulares presentes.

Tão importante quanto reconhecer os lineamentos em superfície, é o reconhecimento de seus comportamentos em profundidade, na tentativa de se estabelecer se estão interconectados e se são favoráveis à circulação de água no sistema. A Figura 5 apresenta um bloco diagrama esquemático apresentado por Lisboa et al. (2004) e é possível notar a variabilidade nos comportamentos das fraturas e falhas em subsuperfície. Essa variabilidade está relacionada inclusive com a quantidade de fases de deformação rúptil que a rocha pode ter sofrido. Essa caracterização em profundidade é realizada em etapas de mapeamento, com descrição de pontos de interesse e tomadas as medidas de direção e mergulho das fraturas e falhas.

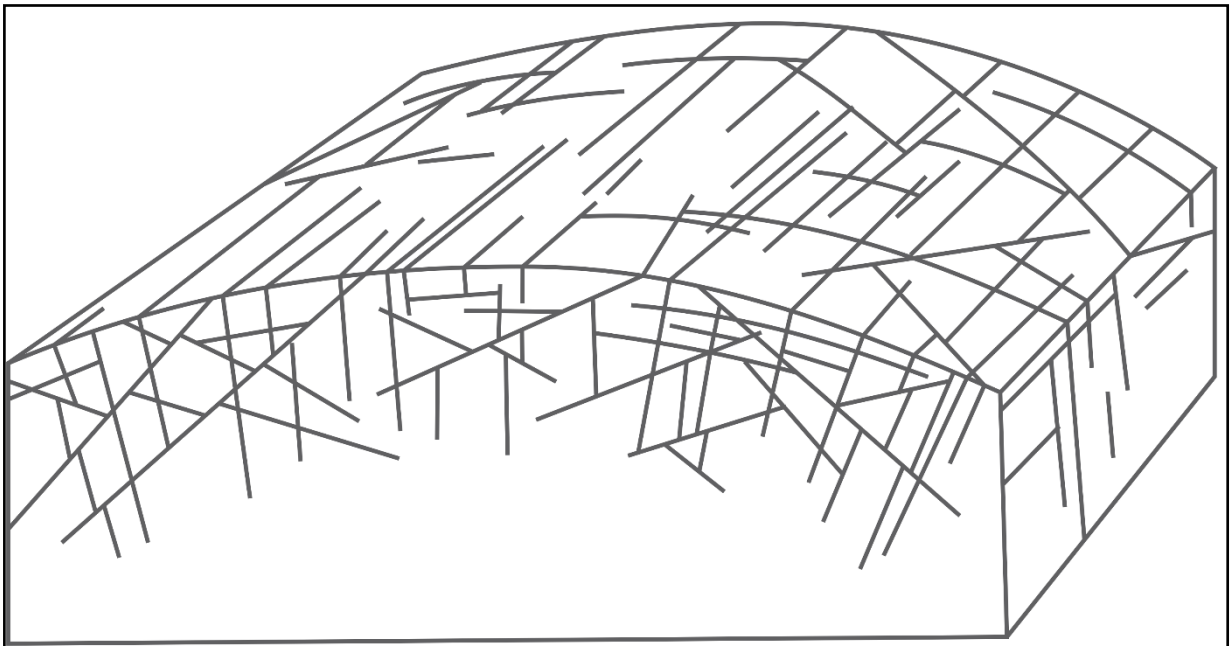


Figura 5: Bloco diagrama esquemático mostrando o comportamento variado dos lineamentos em relação às suas direções e mergulhos.
Fonte: Modificado de Lisboa et al. (2004).

A tectônica rúptil, responsável pela formação das fraturas, é determinante no padrão de fluxo das águas subterrâneas, principalmente em aquíferos fraturados, sendo assim, em uma mesma região, podem ocorrer aquíferos com segmentos diferentes do ponto de vista da geologia estrutural (BETIOLLO, 2006).

A Figura 6 apresenta um perfil esquemático que evidencia a variação de texturas e estruturas em um derrame basáltico segundo Leinz (1949). No topo do derrame é caracterizada uma zona amigdaloidal ou vesicular. Abaixo há a zona de disjunção horizontal, seguida pela disjunção vertical e outra disjunção vertical. Essas

zonas apresentam um resfriamento mais lento por estarem mais ao centro do derrame. Na base ocorre a presença de uma zona vítrea, marcada pelo resfriamento rápido da lava em contato com a superfície (LEINZ, 1949).

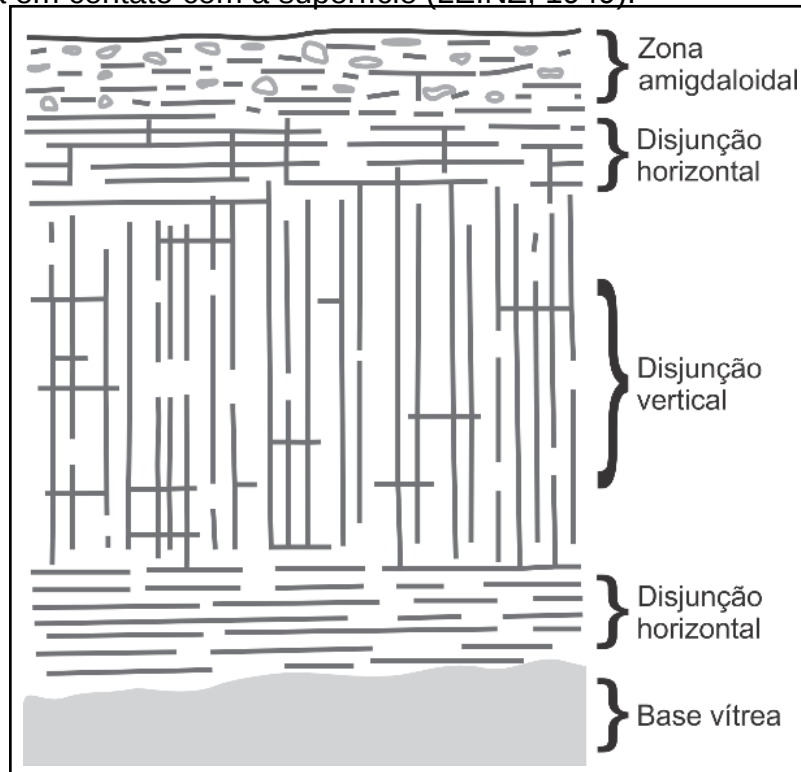


Figura 6: Coluna esquemática de um derrame basáltico evidenciando suas diferentes texturas e estruturas.

Fonte: Modificado de Leinz (1949).

É importante ressaltar que a Figura 6 apresenta um modelo geral e que nem todo o derrame apresenta todas essas zonas bem diferenciadas. Tendo em vista as características texturais e estruturais em um mesmo derrame, é possível verificar que a circulação de água nessas rochas ocorre de maneira diferenciada. Segundo Lisboa et al. (2004), essas estruturas internas favorecem, em parte, o fluxo de água por entre a rocha. A porosidade gerada pelas vesículas no topo do derrame torna esta zona propícia ao fluxo de água e suscetível ao intemperismo. As zonas de disjunção apresentam alguma capacidade de permitir o armazenamento e circulação de água. Já a zona vítrea é caracterizada como um aquíclode, onde a circulação da água é muito lenta (LISBOA et al., 2004).

A Figura 7 apresenta um perfil esquemático de um vale marcado pela sobreposição de dois derrames, onde é possível determinar as zonas propícias à circulação de água e, portanto, possíveis fontes de água.

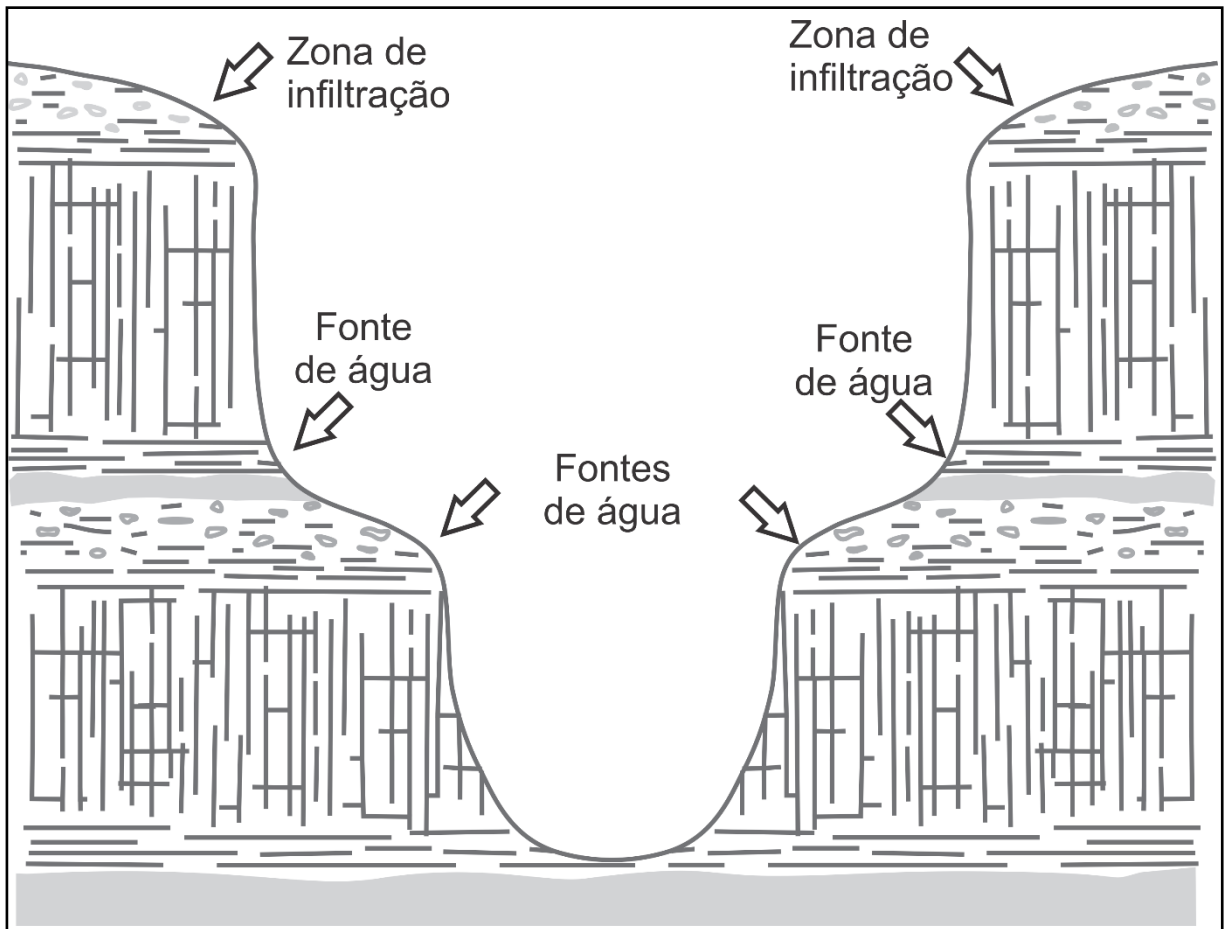


Figura 7: Imagem esquemática identificando as possíveis áreas propícias à circulação de água.

Fonte: Modificada de Leinz (1949).

Essa característica diferenciada dos derrames basálticos faz acreditar que há uma possível relação entre o fluxo de água de uma drenagem e o entalhamento de seu leito pois, quanto mais sucessivos derrames estiverem presentes em suas vertentes, maior contribuição e abastecimento de água dessas fontes chegarão ao curso d'água.

Além dos lineamentos que condicionam a circulação da água subterrânea, também podem influenciar a química dessa água. Em rochas fraturadas, a interação da água com a rocha pode aumentar o grau de alteração de rocha, proporcional à densidade de fraturas, favorecendo a troca iônica. Em algumas situações onde as fraturas são persistentes e profundas, podendo atravessar diversas formações geológicas, pode ocorrer uma interação entre aquíferos distintos, ocasionando uma mistura de águas (BETIOLLO, 2006).

O estado do Rio Grande do Sul apresenta duas grandes regiões geomorfológicas que compreendem aquíferos fraturados. As rochas vulcânicas da Formação Serra Geral que compõem a região de planalto e as rochas ígneas

principalmente intrusivas que fazem parte do Escudo Sul-rio-grandense (ESRG). Exemplos de bacias representantes dessas duas unidades foram selecionadas para o atual estudo, permitindo assim um critério de comparação.

A Unidade do Escudo Sul-rio-grandense (ESRG) está presente na região centro-sul do Estado, onde afloram as rochas consideradas mais antigas do estado. O ESRG é a porção meridional da Província Mantiqueira e é composta por rochas ígneas, metamórficas e sedimentares ligadas aos ciclos orogênicos do Ciclo Transamazônico e o Ciclo Brasileiro (ALMEIDA et al., 1976)

A porção ocidental do ESRG apresenta principalmente rochas graníticas e gnaisses de idade predominantemente Paleoproterozóicas correspondentes ao Batólito Pelotas (PHILIPP, 1998). A porção oriental do ESRG apresenta uma associação de rochas granitóides e, localmente, fragmentos de rochas metamórficas de variado grau de metamorfismo (PHILIPP, 1998). Do ponto de vista hidrogeológico, a região do ESRG foi classificada como Sistemas Aquíferos Embasamento Cristalino, descritos como aquíferos limitados e de baixa possibilidade para água ou praticamente improdutivos (MACHADO; FREITAS, 2005).

A Unidade do Planalto Setentrional situa-se na porção norte e oeste do estado e faz parte do Planalto Meridional Brasileiro (GONÇALVES; SANTOS, 1985). As rochas que compõem a região do Planalto Setentrional do Rio Grande do Sul encerram o ciclo da Bacia do Paraná (MILANI, 1998). A região é formada por arenitos eólicos da Formação Botucatu recobertos por rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (MILANI, 1998). Essa associação ocorre desde o sul de Goiás, São Paulo, Paraná, Santa Catarina, até o Rio Grande do Sul (BECKER; NUNES, 2012) e estão relacionados com a quebra do Continente Gondwana.

A caracterização dos sistemas aquíferos do domínio do Planalto Setentrional do Rio Grande do Sul indica a presença de aquíferos predominantemente fraturados e com variada possibilidade de água subterrânea (MACHADO; FREITAS, 2005).

2.7. Recarga, armazenamento e descarga de aquíferos

De forma geral a recarga de um aquífero pode ser entendida como a água que infiltra no solo e permeia a zona não saturada até alcançar o nível freático e se somar ao reservatório subterrâneo (BORTOLIN et al., 2018). Segundo Feitosa et al. (2008), um aquífero pode desempenhar várias funções quando se trata de gestão integrada de recursos hídricos, entre elas podem-se citar as funções de produção,

correspondente à extração de água através de poços, a função de transporte, quando se pensa no movimento da água desde a área de recarga até zonas onde há superexploração, pode exercer também a função estratégica no manejo e uso consciente e estratégico das águas, função de filtro e função energética com o objetivo de se reduzir custos com tratamento de água para consumo ou a energia geotérmica de fontes quentes e por último, os autores citam a função de estocagem-regularização dos aquíferos, muito utilizada em regiões áridas e que se utiliza de injeção das águas excedentes em enchentes como reserva para amenizar efeitos da sazonalidade. Com todas essas funções de um aquífero, o entendimento dos processos inerentes se faz cada vez mais necessários. A recarga, o armazenamento e a descarga são processos primordiais em um aquífero.

A recarga dos aquíferos está relacionada com a entrada de água no aquífero e, segundo Reginatto (2004) podem ocorrer principalmente de duas maneiras: em regiões com relevo mais dissecado, onde há um favorecimento da circulação vertical das águas, ou por meio da infiltração de águas pluviais através do manto de alteração. As características dos solos e o tempo de permanência podem influenciar a quantidade de recarga, bem como as características químicas das águas subterrâneas. O tipo de porosidade do arcabouço geológico define o aquífero como granular ou poroso, fraturado ou fissural e cárstico.

Um aquífero fraturado, por exemplo, é condicionado principalmente por suas estruturas. Um sistema de fraturas, representados por lineamentos, quando conectados, promovem a circulação da água subterrânea. A interação das fraturas pode permitir a circulação da água subterrânea entre aquíferos distintos e até favorecer a mistura de águas (REGINATTO, 2004). A recarga de um aquífero fraturado também está diretamente relacionada com as fraturas que o compõem. Em um aquífero granular livre a recarga ocorre por toda área do aquífero.

Do mesmo modo, a descarga desses diferentes tipos de aquíferos ocorrem condicionados às litologias, estratigrafias e estruturas das formações geológicas que compõem o ambiente. A descarga de um aquífero ocorre pelo escoamento de base, influenciando na entrada de água em um curso d'água. Quando o rio recebe água do aquífero, ele é chamado de efluente (descarga do aquífero) e quando o rio fornece água ao aquífero, ele é chamado de influente (recarga do aquífero).

Segundo Fernandes (2010), o conhecimento dos condicionantes geológicos que definem a circulação da água subterrânea permite selecionar locais para a

realização de testes e amostragens e, de posse desses resultados, alimentar modelos teóricos que permitem inferir as condições de fluxo em locais onde não haja monitoramento, economizando recursos financeiros e tempo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Bacias hidrográficas de estudo

A área de estudo inclui quatro bacias hidrográficas localizadas no Estado do Rio Grande do Sul – Brasil. Para a seleção das áreas, foram considerados critérios como área e geologia. As bacias hidrográficas do arroio Fragata – estação Passo dos Carros (BHAF-PC) e do arroio Basílio – estação Cerro Chato (BHAB-CC) localizam-se na região sul, incluídas na região do ESRG e apresentam principalmente rochas graníticas. As bacias hidrográficas do rio Piratinim – estação Passo dos Dias (BHRP-PD) e do rio Icamagua – estação Passo das Turmas (BHRI-PT) localizam-se na região noroeste do estado, na região do Planalto Setentrional, e que apresentam principalmente rochas dos derrames da Formação Serra Geral. Buscou-se encontrar bacias hidrográficas que, mesmo apresentando contextos geológicos diferentes, fossem caracterizadas predominantemente por aquíferos fraturados.

As bacias hidrográficas selecionadas são monitoradas pela ANA. Portanto, foi escolhida a seção de monitoramento (estação fluviométrica) de cada bacia como exutório. Neste sentido, as estações fluviométricas com códigos 88750000, 88575000, 75600000 e 75400000 foram consideradas neste estudo. Segundo o controle de dados da ANA (ANA, 2007), são atribuídos códigos numéricos às estações fluviométricas brasileiras com o intuito de identificação e que, para facilidade de localização, os números iniciais indicam respectivamente a bacia hidrográfica e a sub-bacia à que pertencem. Essa divisão territorial foi definida pelo extinto órgão Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) que, em meados da década de 70 era responsável pelas atribuições ligadas à hidrologia do país. O DNAEE, em parceria com pesquisadores americanos do *United States Geological Survey - Water Resources Division*, foram responsáveis por dividir o Brasil em oito grandes bacias hidrográficas (ANA, 2007) e estas receberam numeração de código de 1 a 8. A Figura 8 apresenta um mapa do Brasil evidenciando as bacias hidrográficas estabelecidas pelo DNAEE.

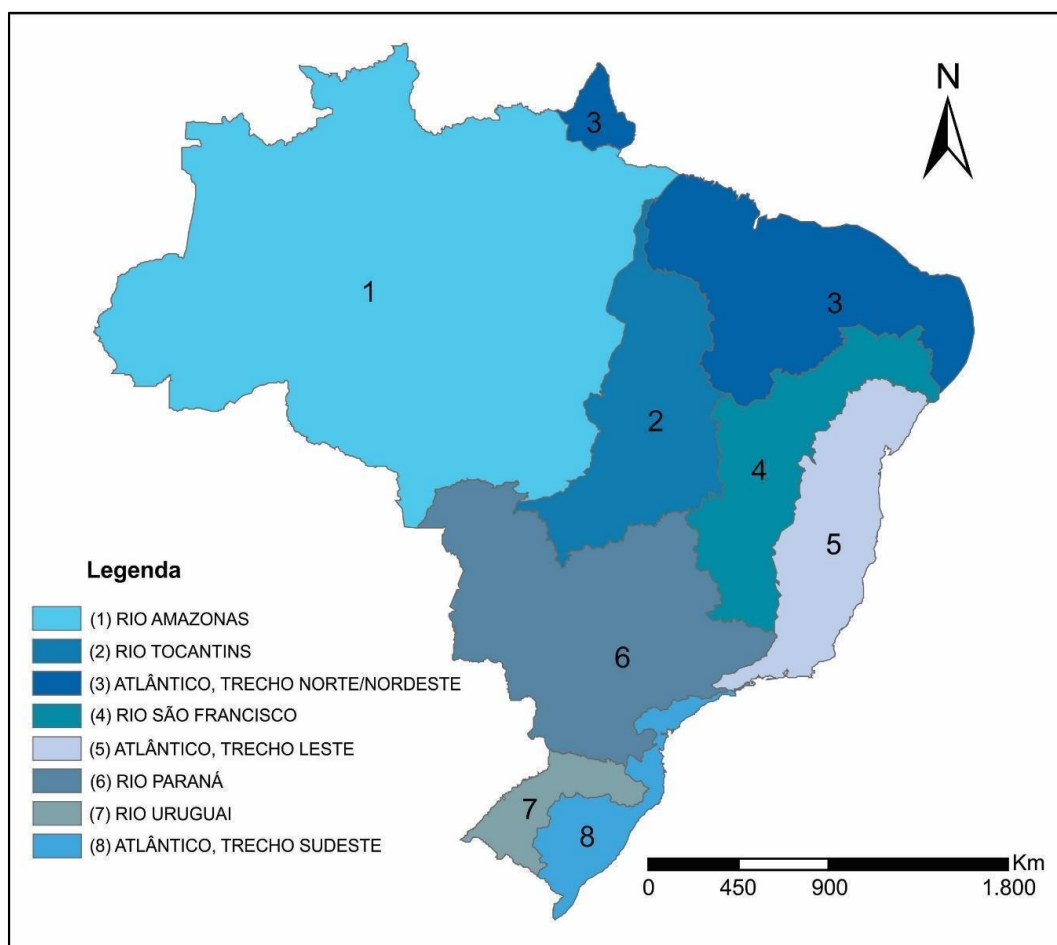


Figura 8: Mapa do Brasil identificando as divisões por bacias hidrográficas feita pelo DNAEE. Fonte: Modificado de ANA (2019b).

Definidas as oito principais bacias hidrográficas, foi necessário realizar a subdivisão delas a fim de se detalhar as áreas em que estas estão inseridas. As divisões em bacias menores seguiram a designação de numeração conforme estabelecido para as principais. A bacia hidrográfica de código 88750000, neste trabalho recebe a denominação de bacia hidrográfica do arroio Fragata – estação Passo dos Carros (BHAF-PC) e está inserida nos municípios de Pelotas, Morro Redondo e Capão do Leão. A bacia sob o código 88575000 é identificada como bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato (BHAB-CC) e sua área está inserida nos municípios de Pinheiro Machado, Pedras Altas, Herval e Piratini. A bacia sob o código 75400000 é identificada como bacia hidrográfica do rio Piratinim – estação Passo dos Dias (BHRP-PD) e engloba áreas dos municípios de Jóia, São Miguel das Missões, Eugênio de Castro e Entre-Ijuís. A bacia sob o código 75600000, designada de bacia hidrográfica do rio Icamagua – estação Passo das Turmas (BHRI-PT) tem área de drenagem nos municípios de Santiago, Capão do Cipó e Bossoroca.

O mapa da Figura 9 mostra a divisão das bacias principais e suas sub-bacias no Estado do Rio Grande do Sul de acordo com a classificação do DNAEE e a localização das bacias deste estudo.

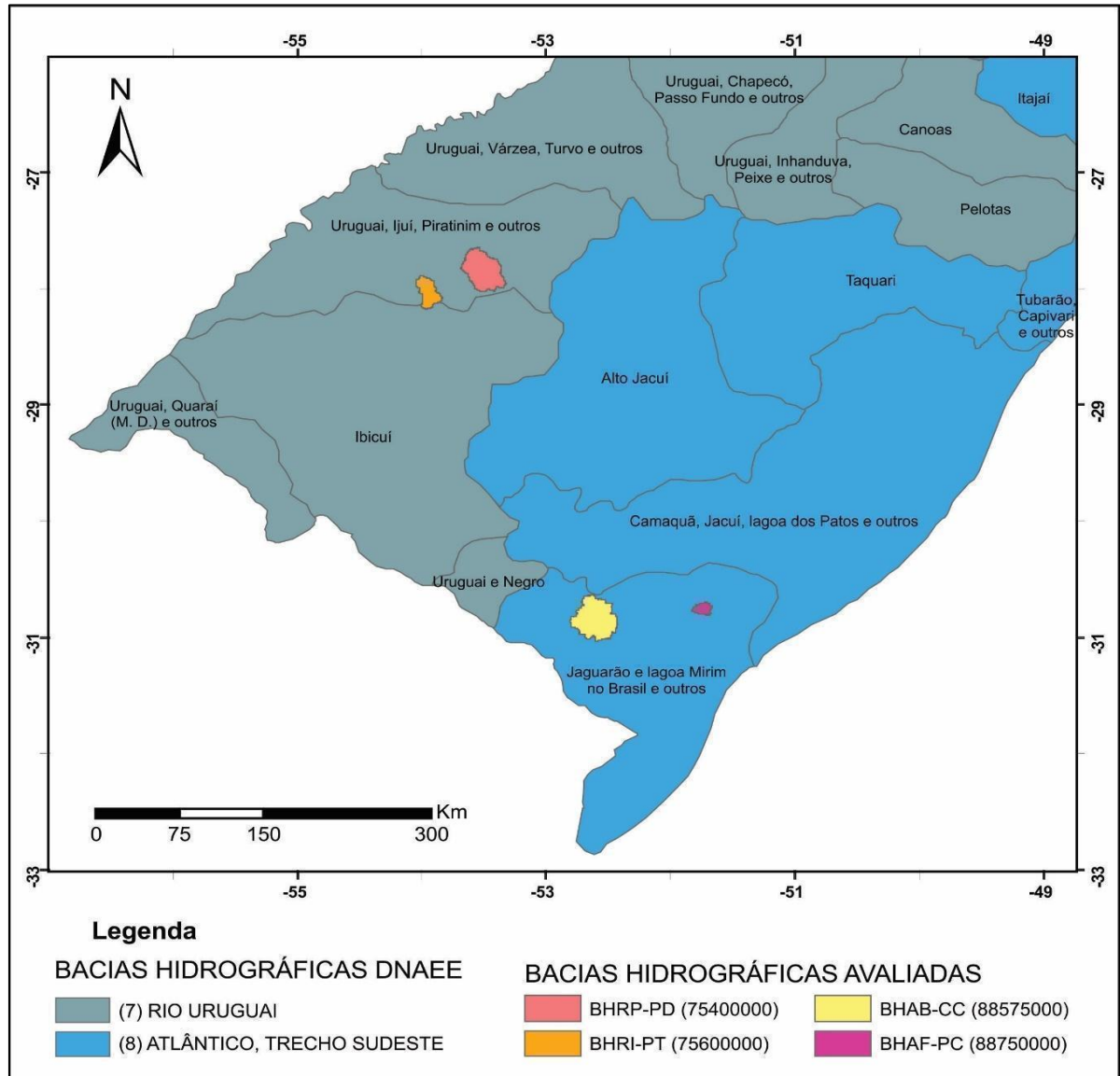


Figura 9: Localização das bacias hidrográficas principais presentes no Rio Grande do Sul de acordo com a classificação do DNAEE, suas sub-bacias e em destaque a localização das bacias hidrográficas selecionadas para este estudo, sendo: bacia hidrográfica do arroio Fragata – estação Passo dos Carros (BHAF-PC), bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato (BHAB-CC), bacia hidrográfica do rio Piratinim – estação Passo dos Dias (BHRP-PD) e bacia hidrográfica do rio Icamagua – estação Passo das Turmas (BHRI-PT). Fonte: Modificado de ANA (2019b).

Observando os códigos atribuídos às bacias selecionadas no estudo, nota-se que duas pertencem à bacia Atlântico, trecho sudeste e à sub-bacia da Lagoa Mirim (códigos 88750000 e 88575000). As outras duas, situadas a noroeste do Estado do

Rio Grande do Sul (códigos 75400000 e 75600000) estão localizadas na região da bacia hidrográfica do rio Uruguai e sub-bacias dos rios Uruguai, Ijuí e Outros.

3.1.1. Análise morfométrica das bacias

Cada uma das bacias hidrográficas deste estudo foi descrita em relação a alguns parâmetros morfométricos, com o objetivo de obter uma descrição mais detalhada delas e dar subsídio à discussão em relação ao comportamento do escoamento de base do curso d'água. Os parâmetros descritos foram a área e o perímetro da bacia; a declividade, seguindo a classificação do relevo de Embrapa (1979); comprimento da bacia; fator de forma; coeficiente de compacidade; comprimento total do curso d'água; ordenamento de cursos d'água e densidade de drenagem. Os valores calculados para cada parâmetro estão apresentados em uma única tabela (Tabela 1) com o objetivo de facilitar a visualização e a comparação entre as bacias.

O fator de forma (K_f) é um índice obtido através da relação entre a área e o comprimento da bacia ao quadrado, desde a desembocadura até o ponto mais distante (VILLELA; MATTOS, 1975). O coeficiente de compacidade (K_c) é um parâmetro que relaciona o perímetro da bacia com o perímetro de um círculo da mesma área da bacia. Villela; Mattos (1975) indicam que o coeficiente é um valor adimensional que, independentemente do tamanho da bacia, é sensível à forma dela, assumindo valores maiores quanto mais irregular ou alongada for a bacia e esta seria menos propensa a enchentes. A ordem dos cursos d'água foi estabelecida seguindo a orientação de Strahler (1957). A ordem do curso d'água principal reflete o grau de ramificação das drenagens dentro da bacia (VILLELA; MATTOS, 1975). A densidade de drenagem (D_d) é estabelecida pela relação entre o comprimento total de todos os cursos d'água e a área da bacia.

Para o processamento da base de dados, foi utilizado o software de geoprocessamento ArcGIS 10.1 (ESRI, 2014). As imagens de radar foram obtidas no banco de dados do *United States Geological Survey* (USGS), da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (USGS EROS, 2019), com resolução espacial de 30m, para compor o Modelo Digital de Elevação (MDE) das áreas de estudo. As folhas s29_w055, s30_w055, s32_w054 e s32_w053 foram utilizadas para contemplar a região das bacias deste estudo.

Tabela 1: Principais dados morfométricos, geológicos e hidrogeológicos das bacias estudadas.

Atributos	Bacias hidrográficas			
	BHAF-PC	BHAB-CC	BHRP-PD	BHRI-PT
Área (km ²)	125	1052	933	377
Perímetro (km)	73	232	212	149
Declividade	Plano a forte ondulado (maior parte ondulado)	Ondulado a forte ondulado	Suave ondulado e ondulado	Suave ondulado e ondulado
Comprimento da bacia (km)	15	41	40	29
Fator de forma (ad.)	0,55	0,62	0,58	0,45
Coefficiente de compacidade (ad.)	1,83	2,00	1,94	2,15
Maior ordem de curso d'água	5	6	6	6
Comprimento total dos cursos d'água (km)	150,99	1275,87	1290,51	530,91
Densidade de drenagem (km.km ⁻²)	1,21	1,21	1,38	1,41

3.1.2. Clima

O mapa climático para todo o Brasil, confeccionado por Alvares et al. (2013), seguindo as regras de classificação de Köppen, serviu de base para a classificação climática das bacias analisadas neste trabalho. Segundo os autores, o estado do Rio Grande do Sul apresenta duas classes climáticas: **Cfa** – clima subtropical úmido com verão quente e **Cfb** – clima subtropical úmido com verão ameno. Outros autores também descreveram as mesmas classes para o Estado (WREGE, 2011; JORGE, 2015). O clima Cfa é descrito como apresentando chuvas bem distribuídas com médias mensais entre 100 e 170 mm, enquanto que o clima Cfb é caracterizado como clima temperado com verão ameno, chuvas uniformes, sem estação bem definida (ALVARES et al., 2013), podendo apresentar geadas severas e frequentes (JORGE, 2015).

A Figura 10 é uma adaptação do mapa climático proposto por Alvares et al. (2013) e apresenta a localização de cada uma das classes para o estado do Rio Grande do Sul e a localização das bacias hidrográficas selecionadas para este estudo,

evidenciando que todas estão sob o mesmo domínio climático, ou seja, o subtropical úmido com verão quente (Cfa).

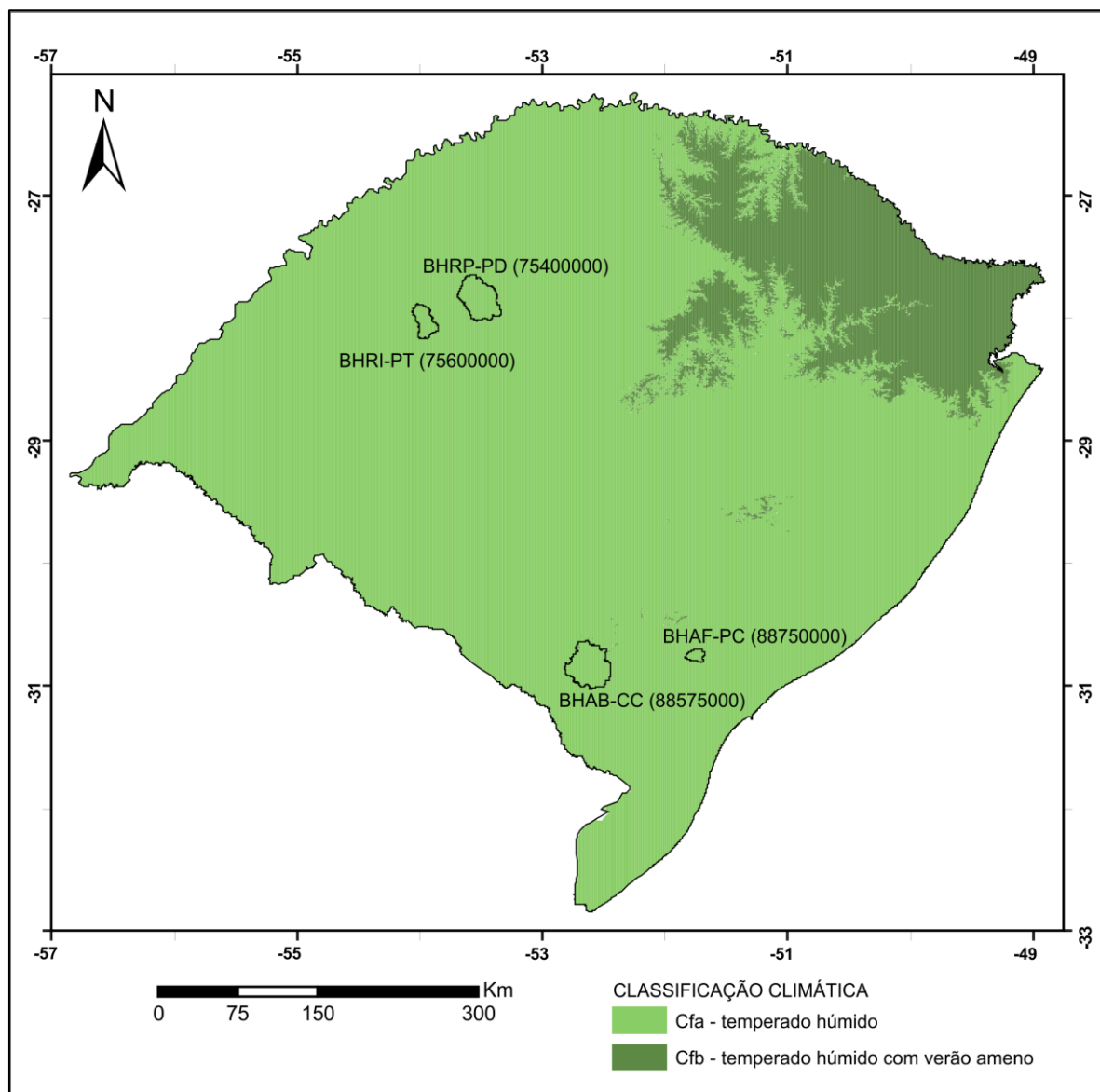


Figura 10: Mapa climático do estado do Rio Grande do Sul segundo classificação de Köppen (Adaptado de Alvares et al., 2013) e em destaque as bacias hidrográficas estudadas: bacia hidrográfica do Arroio Fragata – estação Passo dos Carros (BHAF-PC), bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato (BHAB-CC), bacia hidrográfica do rio Piratinim – estação Passo dos Dias (BHRP-PD) e bacia hidrográfica do rio Icamagua – estação Passo das Turmas (BHRI-PT).

Fonte: Adaptado de ALVARES et al. (2013).

Visando uma boa caracterização das áreas, foram obtidos do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019) dados de precipitação acumulada anual de quatro estações meteorológicas próximas às bacias de estudo (Figura 11): São Luiz Gonzaga, Cruz Alta, Pelotas e Bagé. A normal climatológica foi determinada entre os anos de 1981 e 2010. A Tabela 2 apresenta as informações de localização e

precipitação acumulada anual coletadas no site do INMET (2019) e indicam que as bacias localizadas mais a Norte do Estado apresentam maiores volumes de precipitação do que as localizadas na região Sul.

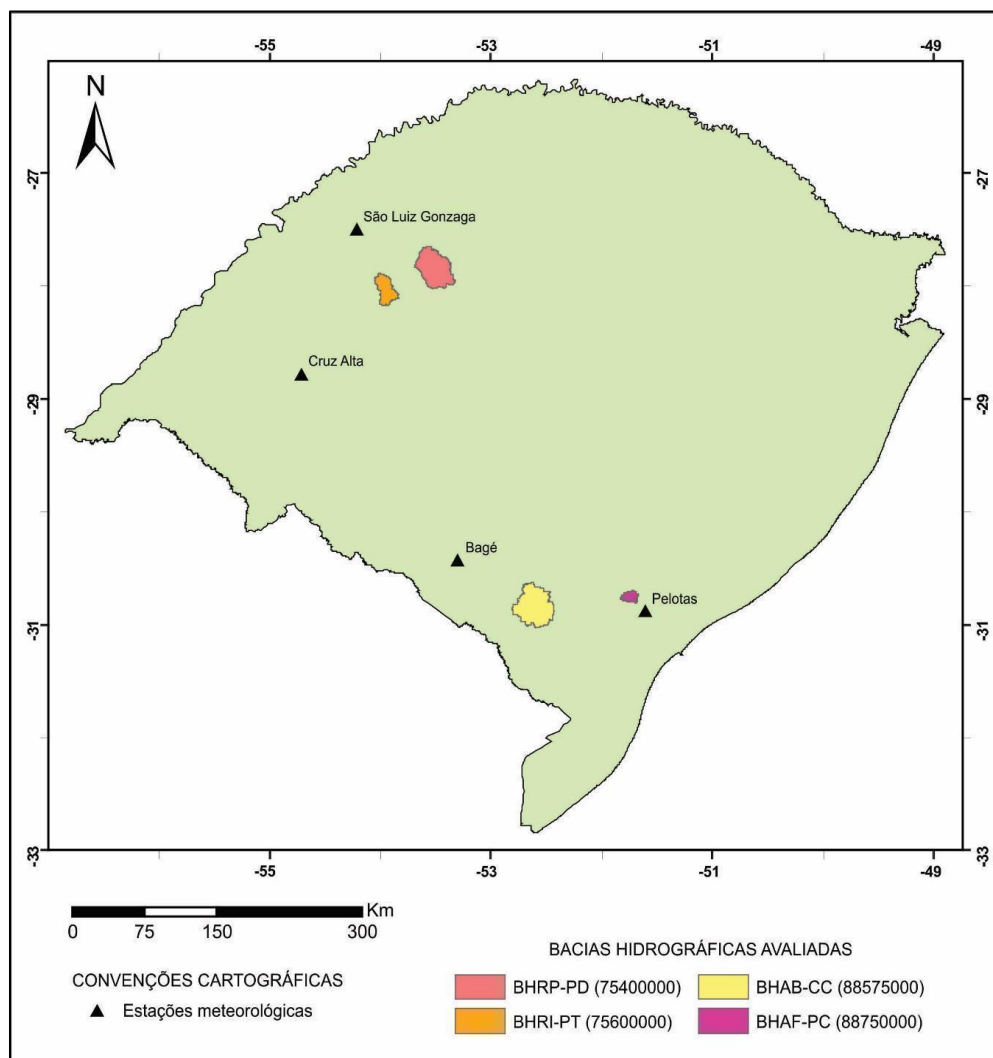


Figura 11: Mapa do estado do Rio Grande do Sul com a localização das estações meteorológicas e as bacias de estudo, sendo: sendo: bacia hidrográfica do arroio Fragata – estação Passo dos Carros (BHAF-PC), bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato (BHAB-CC), bacia hidrográfica do rio Piratinim – estação Passo dos Dias (BHRP-PD) e bacia hidrográfica do rio Icamagua – estação Passo das Turmas (BHRI-PT).

Tabela 2: Dados de localização das estações meteorológicas, bem como de precipitação acumulada anual média da normal climatológica 1981-2010.

Estação climatológica	Localização		Precipitação anual média (mm)
	Latitude	Longitude	
São Luiz Gonzaga	28°24'S	55°01'W	1912,9
Cruz Alta	28°38'S	53°36'W	1898,4
Pelotas	31°47'S	52°25'W	1402,7
Bagé	31°20'S	54°06'W	1513,6

3.2. Dados hidrológicos

Os dados hidrológicos foram obtidos no Portal Hidroweb (ANA, 2019a), site mantido pela ANA e que contém informações fluviométricas e pluviométricas de várias estações espalhadas por todo território nacional. Em relação aos dados fluviométricos, foi utilizada a série histórica de vazão média diária disponibilizada pela ANA para cada uma das quatro estações fluviométricas citadas.

Cada bacia hidrográfica possui um código no portal e algumas informações específicas como nome da estação, bacia e sub-bacia, estado e município, além de coordenadas da estação, o responsável e a operadora. Esses dados estão apresentados na Tabela 3, juntamente com as datas de início e fim dos dados de vazão de cada série histórica analisada neste trabalho. Buscou-se encontrar bacias que possuísem série histórica relativamente longa, com no mínimo 30 anos de dados e que não houvesse barramentos e açudes à montante das estações ou alguma intervenção hidrológica que pudesse alterar o regime de vazões do rio.

Tabela 3: Dados extraídos do Portal Hidroweb das bacias selecionadas para análise, observando que as informações foram obtidas em 2019.

Código	88750000	88575000	75400000	75600000
Nome estação	Passo dos Carros	Cerro Chato	Passo do Dias	Passo das Turmas
Bacia	8 - Atlântico, Trecho Sudeste	8 - Atlântico, Trecho Sudeste	7 - Rio Uruguai	7 - Rio Uruguai
Sub-bacia	88 - Lagoa Mirim	88 - Lagoa Mirim	75 - Rios Uruguai, Ijuí e Outros	75 - Rios Uruguai, Ijuí e Outros
Curso d'água principal	Arroio Fragata	Arroio Basílio	Rio Piratinim	Rio Icamagua
Município	Pelotas	Herval	São Miguel das Missões	Santiago
Área (km²)	125	1052	933	377
Responsável	ANA	ANA	ANA	ANA
Operadora	CPRM	CPRM	CPRM	CPRM
Latitude	S 31° 42' 50.04"	S 31° 51' 52.92"	S 28° 39' 24.84"	S 28° 50' 13.92"
Longitude	W 52°28' 36.12"	W 53° 16' 5.88"	W 54°27' 32.04"	W 54°51' 18.00"
Início da série histórica	01/01/1965	01/08/1976	18/11/1941	01/01/1976
Extremo da série utilizada	31/12/2018	31/12/2018	30/09/2018	31/10/2018

É possível notar que as estações possuem mais de 40 anos de observações, o que é positivo para estudos que fazem uso de hidrogramas de longo termo. As bacias

75400000 e 88575000 apresentam mais de mil dias de falhas nos dados e as bacias 75600000 e 88750000 apresentam menos de 400 dias, considerando todo o período da série histórica indicada na Tabela 3. A bacia código 75400000 apresenta falhas entre os anos de 1995 e 1998, num total de 840 dias, sendo este o maior período contínuo sem dados entre todas as bacias utilizadas, e a 88750000 não apresenta nenhum dado no ano de 2007, sendo este seu único período de falhas. Toda a série de dados disponível para cada bacia foi utilizada no método de separação de escoamento e para os métodos de definição do parâmetro BFI_{max}. Uma segunda análise utilizando um menor período de dados, apenas cinco anos de dados, e comum a todas as bacias foi realizada, com o objetivo de verificar uma possível influência no volume de dados para a realização dos cálculos.

3.3. Separação de escoamento usando o filtro digital recursivo de Eckhardt

Como apresentado, diferentes metodologias de separação de escoamento vêm sendo desenvolvidas ao longo dos anos. O filtro digital proposto por Eckhardt (2005) é o método avaliado no presente trabalho. O hidrograma de longo termo possui as principais informações necessárias para avaliação de tal filtro. Todos os cálculos e determinações dos parâmetros foram realizados utilizando programa editor de planilha de dados.

Eckhardt (2005) propôs um filtro digital recursivo que considera o comportamento de decaimento da vazão do rio como apresentando um comportamento linear. O método inicia separando a vazão do rio em dois componentes - vazão proveniente do escoamento de base e vazão derivada do escoamento superficial direto, empregando a equação geral de filtros (1):

$$b_t = Ab_{t-1} + By_t \quad (1)$$

Em que,

b_t é a vazão correspondente ao escoamento de base no tempo t ($L^3 T^{-1}$),

b_{t-1} refere-se à vazão de escoamento de base no tempo $t-1$ ($L^3 T^{-1}$);

y_t é a vazão do rio na seção de controle analisada no tempo t ($L^3 T^{-1}$),

t é o intervalo de tempo e,

A e B são parâmetros adimensionais da equação geral.

O autor demonstrou que os parâmetros A e B podem ser expressos em relação ao coeficiente de recessão α e ao BFI_{max} que corresponde ao índice máximo de escoamento de base. Esse último apresenta a relação máxima, a longo prazo, entre

o escoamento de base e o escoamento total (ECKHARDT, 2012), enquanto o coeficiente de recessão a representa o comportamento do declínio da vazão quando em períodos de recessão. As equações (2) e (3) demonstram a relação entre os parâmetros, conforme recomendado por Eckhardt (2012):

$$A = \frac{(1-BFI_{max})}{1-a.BFI_{max}} a \quad (2)$$

$$B = \frac{(1-a).BFI_{max}}{1-a.BFI_{max}} \quad (3)$$

O filtro desenvolvido pelo autor (equação 4), que ficou conhecido como “filtro de Eckhardt” (ECKHARDT, 2012), apresenta uma equação dependente dos valores observados de vazão total y no curso d’água no tempo t :

$$b_t = \frac{(1-BFI_{max})a.b_{t-1} + (1-a)BFI_{max}.y_t}{1-aBFI_{max}} \quad (4)$$

Hoffmann (2017) define que o coeficiente de recessão a é característica do comportamento hidrológico particular de cada bacia. Por se tratar de um parâmetro que define o comportamento de recessão do hidrograma em períodos onde não há precipitação, sendo então a recarga igual a zero, o parâmetro reflete o comportamento de descarga do aquífero. Para o cálculo do parâmetro a deve-se primeiramente identificar os períodos de recessão do hidrograma. Os dados dos períodos de recessão são utilizados no cálculo de uma constante k de acordo com a equação (5), a qual vem utilizada por diversos autores (MATTIUZI, 2013; MATTIUZI et al., 2015; BORTOLIN et al, 2018; BORTOLIN; REGINATO, 2018; FAGUNDES, 2019).

$$k = \frac{-\Delta t}{\ln\left(\frac{Q_{(t+\Delta t)}}{Q_t}\right)} \quad (5)$$

E, a partir dessa constante, calcula-se o parâmetro a através da equação (6):

$$a = e^{\left(\frac{-\Delta t}{k}\right)} \quad (6)$$

Onde Q_t é a vazão total do curso d’água no instante t e Δt é o intervalo de tempo entre os instantes t e $t + \Delta t$. O parâmetro a é adimensional, enquanto que k é uma variável que tem unidade tempo e a vazão tem unidade de volume por tempo.

Partindo da premissa que as recessões de um hidrograma são periódicas (MATTIUZI, 2013), neste trabalho foi escolhido um período de recessão característico para cada bacia com mais de quinze dias consecutivos de recessão a fim de se determinar o parâmetro a . Os períodos escolhidos seguem a conclusão de Chapmann (1999), o qual diz que, para períodos de recessão acima de 10 dias, os modelos de recessão linear apresentam uma boa aproximação com os dados reais.

Para este trabalho foram analisadas três propostas para definição do parâmetro BFI_{max}, onde cada um deles requer diferentes dados de entrada.

Proposta 1

A Proposta 1 deste estudo foi baseado nos seus estudos de Eckhardt (2005), o qual propõe valores definidos para o BFI_{max} a depender das características das rochas em que o curso d'água está inserido e a classificação do mesmo segundo a frequência com que a água ocupa o leito, sendo BFI_{max} = 0,80 para rios perenes sob influência de aquíferos porosos; BFI_{max} = 0,50 para rios efêmeros sob influência de aquíferos porosos; BFI_{max} = 0,25 para rios perenes sob influência de aquíferos fraturados. Neste trabalho, de acordo com as características das bacias escolhidas, o valor de BFI_{max} de 0,25 foi utilizado para a Proposta 1.

Proposta 2

A Proposta 2 foi fundamentada no estudo de Collischonn; Fan (2013), os quais propuseram algumas modificações para a determinação do BFI_{max} utilizado no filtro de Eckhardt após empregá-lo em algumas bacias hidrográficas brasileiras. Os autores sugeriram um método para a estimativa do BFI_{max}, utilizando um filtro inverso. O procedimento tem início identificando o último dia de recessão da série analisada, significando que este valor de vazão seja contribuição apenas do escoamento de base e assumindo-se que $y_n = b_n$. A partir deste ponto, aplica-se a equação (7) no tempo anterior para toda a série histórica analisada, finalizando o cálculo na primeira observação de vazão considerada como pertencente a uma recessão. Portanto, o filtro inverso é aplicado para toda a série histórica com início e fim em dados observados de recessão:

$$b_{i-1} = \frac{b_i}{a} \quad (7)$$

O parâmetro BFI_{max} é calculado pela equação (8):

$$BFI_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \quad (8)$$

Onde b_i é o valor de vazão originada do escoamento de base (com unidade igual à de vazão), b_{i-1} corresponde à vazão de escoamento de base no tempo anterior e a é o coeficiente de recessão do hidrograma, que é adimensional.

A partir da determinação do BFI_{max}, de acordo com a equação (8), procede-se a determinação das vazões de base de acordo com filtro digital recursivo de Eckhardt (2005) utilizando a equação (4) em programa editor de planilha de dados.

Proposta 3

A Proposta 3 foi definida a partir da equação (9), desenvolvida por Collischonn; Fan (2013) para o cálculo do BFI_{max} e se utiliza as vazões características Q₉₀ e Q₅₀ da bacia. Esses parâmetros são os valores em que a vazão é igualada ou superada em 90% do tempo e em 50% do tempo, respectivamente, ao longo da série histórica. Q₉₀ é um indicador das vazões mínimas (ou de estiagem) do curso d'água e Q₅₀ que corresponde à mediana das vazões, ambas derivadas da curva de permanência.

A proposta foi desenvolvida baseada em estudos de bacias localizadas na região central e sul do Brasil. Tendo em vista que as bacias hidrográficas trabalhadas neste estudo estão localizadas na área indicada pelos autores, este método, aqui nomeado de Proposta 3, também foi escolhido.

$$BFI_{max} = 0,8344 \frac{Q_{90}}{Q_{50}} + 0,2146 \quad (9)$$

As vazões características de uma série histórica, tais como a Q₉₀ e a Q₅₀, podem ser determinadas a partir da curva de permanência de vazões. Para cada bacia hidrográfica, as séries de vazões médias diárias foram adquiridas junto à ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico através do Portal HidroWeb (HIDROWEB, 2018). Para a confecção da curva de permanência, foi empregada a metodologia descrita em Naghettini; Pinto (2007), a qual consiste primeiramente em ordenar os valores de vazão de maneira decrescente e cada valor de vazão recebe um número a partir do 1 até o número de observações na série histórica. O número recebido por cada valor de vazão é dividido pelo valor total de observações. Assim, com essa ordenação, é possível determinar a curva de permanência e identificar as vazões características de uma série histórica de vazões. A curva de permanência foi elaborada através de planilhas eletrônicas, e usada função para encontrar os valores dos quantis de 1 a 99%. A vazão Q₉₀ é aquela igualada ou superada 90% do tempo. Já a Q₅₀ é a vazão que é igualada ou superada 50% do tempo. Neste estudo as vazões características Q₉₀ e Q₅₀ são utilizadas apenas para calcular o BFI_{max} (Equação 9) para a Proposta 3.

A fim de se verificar uma possível influência do tamanho da série histórica de vazões, e se haveria uma diferença significativa nos resultados de determinação do parâmetro BFI_{max} e da contribuição do escoamento de base através do filtro digital, a metodologia foi aplicada para apenas um período da série histórica. Foi selecionado

o período entre os anos de 2010 e 2015, por não haver falhas de observações em nenhuma das bacias observadas.

Foi realizado também a determinação da contribuição do escoamento de base médio em lâmina d'água, permitindo assim fornecer uma interpretação de volume de água gerado pelo escoamento de base em cada bacia hidrográfica. Esse cálculo foi realizado a partir da vazão média do escoamento de base ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), ajustando o valor para um tempo anual ($\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$). A razão entre o volume médio anual e a área da bacia permite que seja determinado o valor em lâmina, do escoamento de base.

3.4. Caracterização fisiográfica

3.4.1. Caracterização geológica e hidrogeológica

Uma descrição da geologia e da hidrogeologia de cada uma das bacias é apresentada neste capítulo, servindo como base para as discussões dos resultados. Esses dados foram extraídos de literatura técnica e científica.

Bacia hidrográfica do arroio Fragata – estação Passo dos Carros

A bacia hidrográfica BHAF-PC está localizada nos municípios de Pelotas, Morro Redondo e Capão do Leão e faz parte do Escudo Sul-rio-grandense. A Figura 12(a) ilustra o mapa geológico da bacia hidrográfica do arroio Fragata - Passo dos Carros, extraído de Cruz (2018a, 2018b). Segundo as cartas geológicas de Pelotas SH.22-Y-D-IV (CRUZ, 2018a) e Pedro Osório SH.22-Y-C-VI (CRUZ, 2018b), 58,4% da área afloram rochas da Suíte Pinheiro Machado, 38,1% da área da bacia se encontra sobre o Granito Monte Bonito, 1,9% afloram rochas do Granito Capão do Leão e apenas 1,6% apresenta coberturas sedimentares. Na Figura 12 (b) percebe-se que na área da bacia podem ser encontrados dois sistemas aquíferos descritos por Machado; Freitas (2005): o Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II (ec2), que abrange praticamente toda a área da bacia, e subordinadamente o Sistema Aquífero Quaternário Costeiro II (qc2).

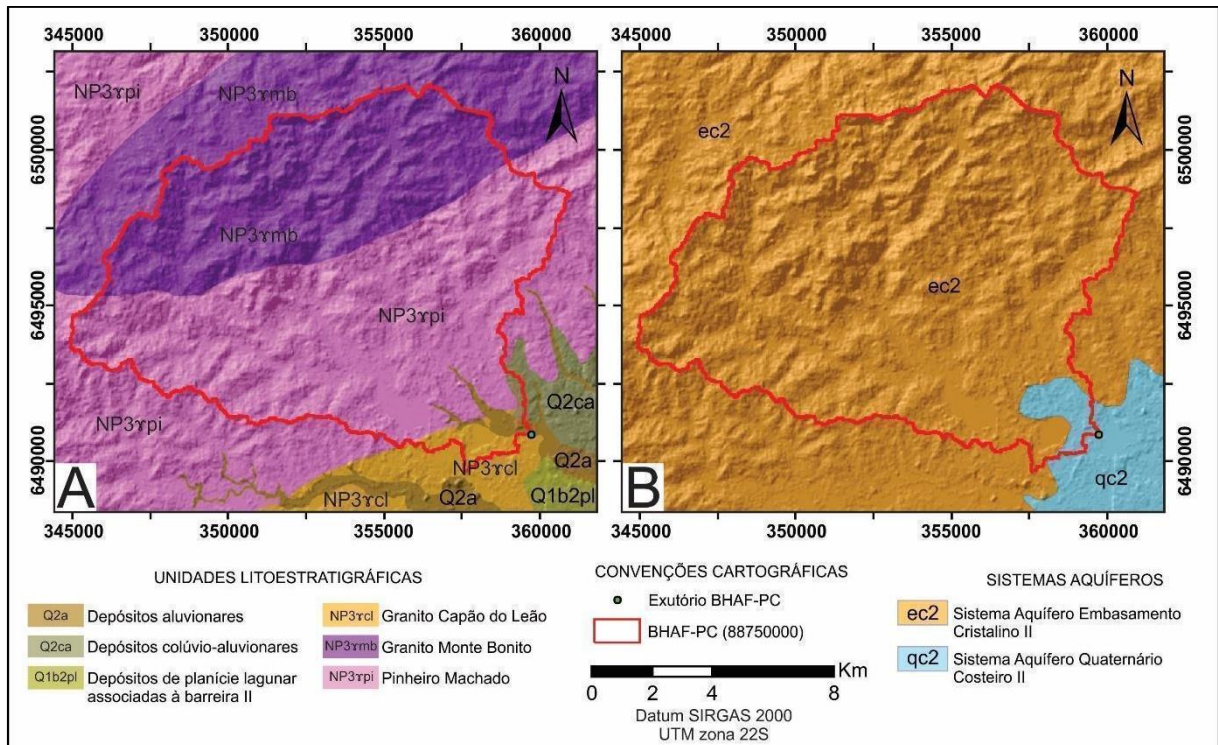


Figura 12: Bacia hidrográfica do arroio Fragata (BHAF-PC). (a) Mapa geológico com as unidades litoestratigráficas. (b) Mapa hidrogeológico evidenciando os sistemas aquíferos. Fontes: (a) Modificado das cartas geológicas Pelotas SH.22-Y-D-IV (CRUZ, 2018a) e Pedro Osório SH.22-Y-C-VI (CRUZ, 2018b). (b) Modificado de CPRM (2005).

O Batólito Pelotas é composto quase que totalmente por suítes multi-intrusivas e polifásicas de rochas granitóides e possui seus contatos delimitados por zonas de cisalhamento de subverticais com movimento predominantemente sinistral e orientação preferencial NE-SW (PHILIPP; MACHADO, 2001). Estas zonas de cisalhamento estão relacionadas com o Ciclo Brasileiro e foram responsáveis pelo formato alongado do batólito e pelas deformações internas das suítes granitóides (PHILIPP, 1998).

A Suíte Pinheiro Machado é a suíte mais antiga do Batólito Pelotas e apresenta-se de forma alongada com direção NE-SW na porção central do batólito (PHILIPP et al, 2008). Engloba uma grande variedade de granitos, enclaves máficos e xenólitos, muitos dos quais só podem ser individualizados em escala de semi-detalhe (PHILIPP, 1998).

O Granito Monte Bonito é um corpo de textura porfirítica média a grossa com composição monzogranítica (PHILIPP, 1998). O corpo apresenta xenólitos em seu interior, além de enclaves (PHILIPP, 1998; CRUZ, 2019). O granito é cortado por diques e bolsões sin a tardi-magmáticos de sienogranitos além da presença de

foliação primária de origem magmática e deformação de cisalhamento encontrada principalmente nas bordas do corpo (CRUZ, 2019).

O Granito Capão do Leão foi mapeado apenas na região extremo sul da bacia BHAF-PC como pode ser observado na Figura 12 (a). No geral, pode ser descrito como um leucogranito de coloração rósea a avermelhada, maciço e homogêneo estruturalmente, apresentando localmente foliação primária (CRUZ, 2019).

Os depósitos sedimentares mapeados na área foram separados por Cruz (2018a) como Depósito Aluviais com sedimentos originados de canais e de planícies de inundações e Depósitos Colúvio-aluvionares com sedimentos mal selecionados originados por movimentos de encostas.

A caracterização hidrogeológica realizada por Machado; Freitas (2005) descreveu dois sistemas aquíferos na área da bacia, como pode ser percebido na Figura 12 (b). O Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II (ec2) representa um sistema aquífero pouco fraturado, podendo apresentar-se como aquíferos ou aquícludes (MACHADO; FREITAS, 2005). Essas unidades são definidas por concentrarem água, mas com fluxo ou a transmissividade restrita (POLAND; LOFGREN; RILEY, 1972).

O Sistema Aquífero Quaternário Costeiro II (qc2) foi categorizado como pertencente ao grupo dos aquíferos porosos do estado do Rio Grande do Sul (MACHADO; FREITAS, 2005). Apresenta litologias relacionadas com sedimentos da planície costeira com camadas de areias finas esbranquiçadas intercaladas com camadas de silte e argila com de cor predominantemente cinza (VIERO; SILVA, 2010). Oferecem baixa possibilidade de água subterrânea por apresentarem baixos valores de porosidade e permeabilidade das suas unidades (MACHADO; FREITAS, 2005).

Bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato

A BHAB-CC também está localizada no Domínio Escudo Sul-rio-grandense e sua área abrange os municípios de Pinheiro Machado, Pedras Altas, Herval e Piratini. Figura 13 (a) apresenta as unidades litoestratigráficas mapeadas nas proximidades da bacia hidrográfica e a Figura 13 (b) apresenta o mapa hidrogeológico com os sistemas aquíferos identificados por Machado; Freitas (2005).

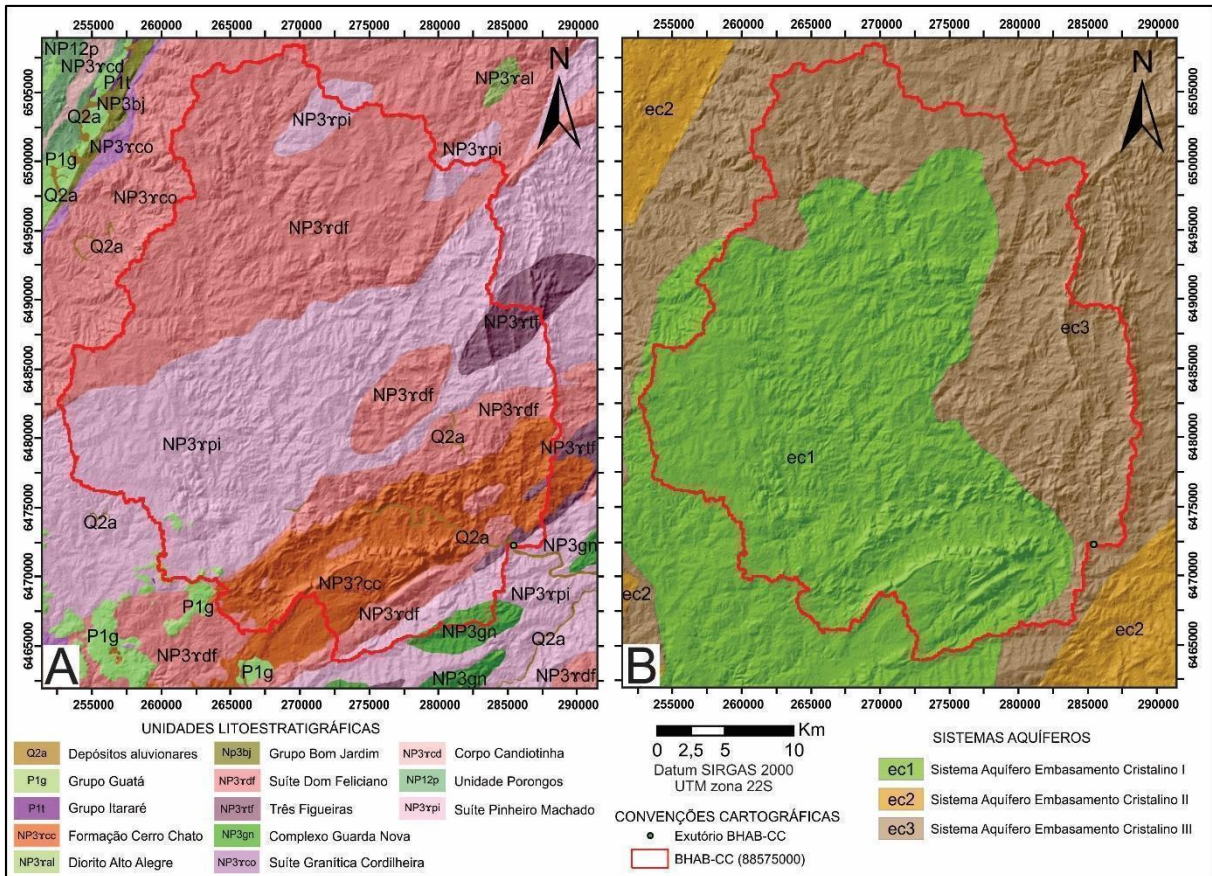


Figura 13: Bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato (BHAB-CC). (a) Mapa geológico com as unidades litoestratigráficas. (b) Mapa hidrogeológico evidenciando os sistemas aquíferos.

Fontes: (a) Modificado das cartas geológicas Passo São Diogo SH.22-Y-C-IV (IGLESIAS; KLEIN; CAMOZZATO, 2014) e Pinheiro Machado SH.22-Y-C-V (CRUZ, 2018c). (b) modificado de CPRM (2005).

A região da BHAB-CC apresenta uma variedade de unidades geológicas, mas em sua área ocorrem predominantemente a Suíte Pinheiro Machado, o Complexo Guarda Nova e Três Figueiras, além da suíte Dom Feliciano, ocorre a Formação Cerro Chato e pequenas áreas recobertas por sedimentos aluvionares. Como já foi descrito anteriormente, a Suíte Pinheiro Machado apresenta uma variedade de rochas granitóides é a mais antiga suíte relacionada com o Batólito Pelotas.

O Complexo Guarda Nova é descrito por Cruz (2018c) como sendo composto por quartzitos micáceos e ferruginosos. Apresentam fino bandamento por níveis avermelhados pela presença do óxido de ferro e lâminas quartzosas. Também fazem parte deste Complexo leucogranitos protomiloníticos cuja deformação está relacionada com os eventos de cisalhamento dúctil de médio a alto grau (CRUZ, 2018c). A Suíte Três Figueiras é descrita como granitóides finos a grossos, com cores variando de róseos a esbranquiçados e de composição sienogranítica a

monzogranítica. Suas rochas apresentam formas normalmente alongadas e foliação milonítica bem marcada concordantes com a zonas de cisalhamento (CRUZ, 2018c).

A Suíte Dom Feliciano é a suíte granítica mais jovem do Batólito Pelotas e é composta por sieno a monzogranitos de textura equigranular média a grossa (CRUZ, 2018c). Suas unidades são alongadas na direção NE-SW e posteriores ao evento cisalhante D2 (cisalhamento dúctil de alto ângulo) (PHILIPP, 1998). O autor descreve a presença de enxames de diques de rochas riolíticas associados aos granitos tardios característicos da Suíte Dom Feliciano.

A área delimitada como Formação Cerro Chato na Folha Passo São Diogo compreende coberturas vulcano-sedimentares com plutonismo associado (IGLESIAS; KLEIN; CAMOZZATO, 2014). A Formação Cerro Chato pode ser dividida em duas fácies, uma particulada, composta por depósitos de fluxo piroclástico (explosivo) e uma fácies coerente, composta por derrames riolíticos e riodacitos, de caráter efusivo (IGLESIAS; KLEIN; CAMOZZATO, 2014). Noll Filho (2014) descreve a estratigrafia da base com depósitos piroclásticos, e sobrepostos por derrames efusivos.

Finamor et al. (2018) vinculam a presença do sistema vulcânico que originou as rochas da Formação Cerro Chato com o final dos processos Orogênicos do Brasileiro. Os autores reconheceram e descreveram os depósitos piroclásticos de composição ácida compondo depósitos particulados caracterizados como ignimbritos com presença de cristais e dispostos segundo a foliação do fluxo piroclástico. Além dos ignimbritos, descrevem também depósitos piroclásticos de queda. Os depósitos efusivos são descritos como sendo principalmente riolitos porfiríticos com presença de estruturas de fluxo (NOLL FILHO, 2014).

Dentro da área da bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato, são encontrados também alguns depósitos aluvionares quaternários próximos a cursos d'água.

A hidrogeologia da bacia compreende os Sistemas Aquíferos Embasamento Cristalino I (ec1) e III (ec3) (CPRM, 2005), conforme pode ser observado na Figura 13 (b). O Sistema Aquífero Embasamento Cristalino I (ec1) é descrito como apresentando rochas graníticas e basálticas muito fraturadas, com média a baixa possibilidade para água subterrânea e baixa capacidade específica (MACHADO; FREITAS, 2005).

Outro sistema descrito na área é o Sistema Aquífero Embasamento Cristalino III (ec3), que é caracterizado principalmente por rochas graníticas maciças, pouco alteradas e com poucas ou quase nenhuma fraturas ou falhas interconectadas, o que

lhes confere baixa permeabilidade, fazendo com que este sistema fosse inserido na categoria dos aquíferos praticamente improdutivos (MACHADO; FREITAS, 2005).

Bacia hidrográfica do rio Piratinim – estação Passo dos Dias

A BHRP-PD está localizada na área pertencente ao Planalto Setentrional e se encontra na Folha Santo Ângelo SH.21-X-B (IBGE, 2003a) sob o domínio principal da Formação Serra Geral e uma pequena área onde aflora a Formação Tupanciretã, como pode ser observado na Figura 14 (a). Os limites da bacia estão inseridos nos municípios de Jóia, São Miguel das Missões, Eugênio de Castro e Entre-Ijuís, no Estado do Rio Grande do Sul. A Figura 14 (b) apresenta o mapa hidrogeológico com os sistemas aquíferos predominantes na bacia, descritos por Machado; Freitas (2005).

A Formação Serra Geral é uma província magmática caracterizada por rochas vulcânicas básicas a ácidas, geradas por uma série de episódios de vulcanismo fissural que ocorreu entre o Mesozóico e Cenozóico (MACHADO et al., 2009). Rochas basálticas são as mais comuns, localmente intercaladas com camadas de arenitos do tipo intertrap (REGINATO, 2003).

Estratigraficamente acima da Formação Serra Geral, e de ocorrência restrita ao Estado do Rio Grande do Sul (GASS; MASSOLA; MONTARDO, 2009), se encontram rochas da Formação Tupanciretã, que apresenta conglomerados, arenitos, siltitos e argilas, com predominância de arenitos finos a muito finos (MENEGOTTO, 1980; MACHADO, 2011; GASS; MASSOLA; MONTARDO, 2009).

Hidrogeologicamente a bacia se encontra totalmente sob o domínio do Sistema Aquífero Serra Geral I (sg1), na porção centro-oeste do Planalto Setentrional do Rio Grande do Sul e, de modo geral, dominado por rochas basálticas, com presença de amígdalas e fraturas, capeadas por espesso solo avermelhado (VIERO; SILVA, 2010). O sistema aquífero exibe porosidade relacionada às fraturas das rochas, com capacidades específicas muito variadas, categorizando o sistema aquífero como sendo de média a alta possibilidade de água subterrânea (MACHADO; FREITAS, 2005). Por geralmente apresentar boa produtividade, o sistema aquífero sg1 é muito utilizado para abastecimento público (VIERO; SILVA, 2010).

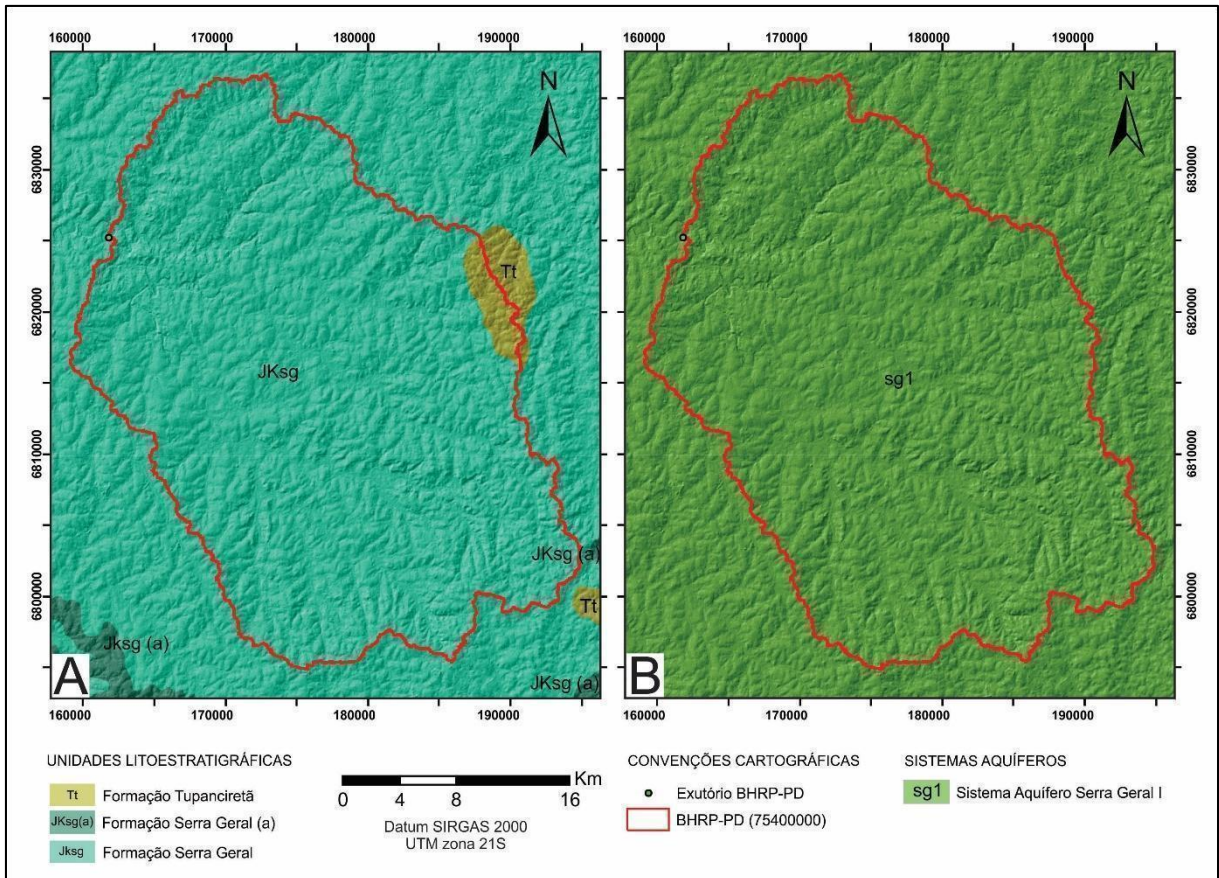


Figura 14: Bacia hidrográfica do rio Piratinim – Passo dos Dias. (a) Mapa geológico com as unidades litoestratigráficas. (b) Mapa hidrogeológico com os sistemas aquíferos. Fontes: (a) modificado de IBGE (2003a). (b) modificado de CPRM (2005).

Bacia hidrográfica do rio Icamauca – estação Passo da Turma

A BHRI-PT está localizada na área pertencente ao Planalto Setentrional e seus limites estão incluídos nos territórios dos municípios de Santiago, Capão do Cipó e Bossoroca. Se encontra entre as Folhas Santo Ângelo SH.21-X-B (IBGE, 2003a) e Santiago SH.21-X-D (IBGE, 2003b) sob o domínio principal da Formação Serra Geral e Serra Geral (a), além de uma área menor sob o domínio da Formação Tupanciretã, como pode ser observado na Figura 15 (a). A Figura 15 (b) apresenta o mapa de sistemas aquíferos da bacia hidrográfica e evidencia que ela é dominada por dois sistemas distintos, o Sistema Aquífero Serra Geral 1 (sg1) e o Sistema Aquífero Serra Geral II (sg2) (MACHADO; FREITAS, 2005; CPRM, 2005).

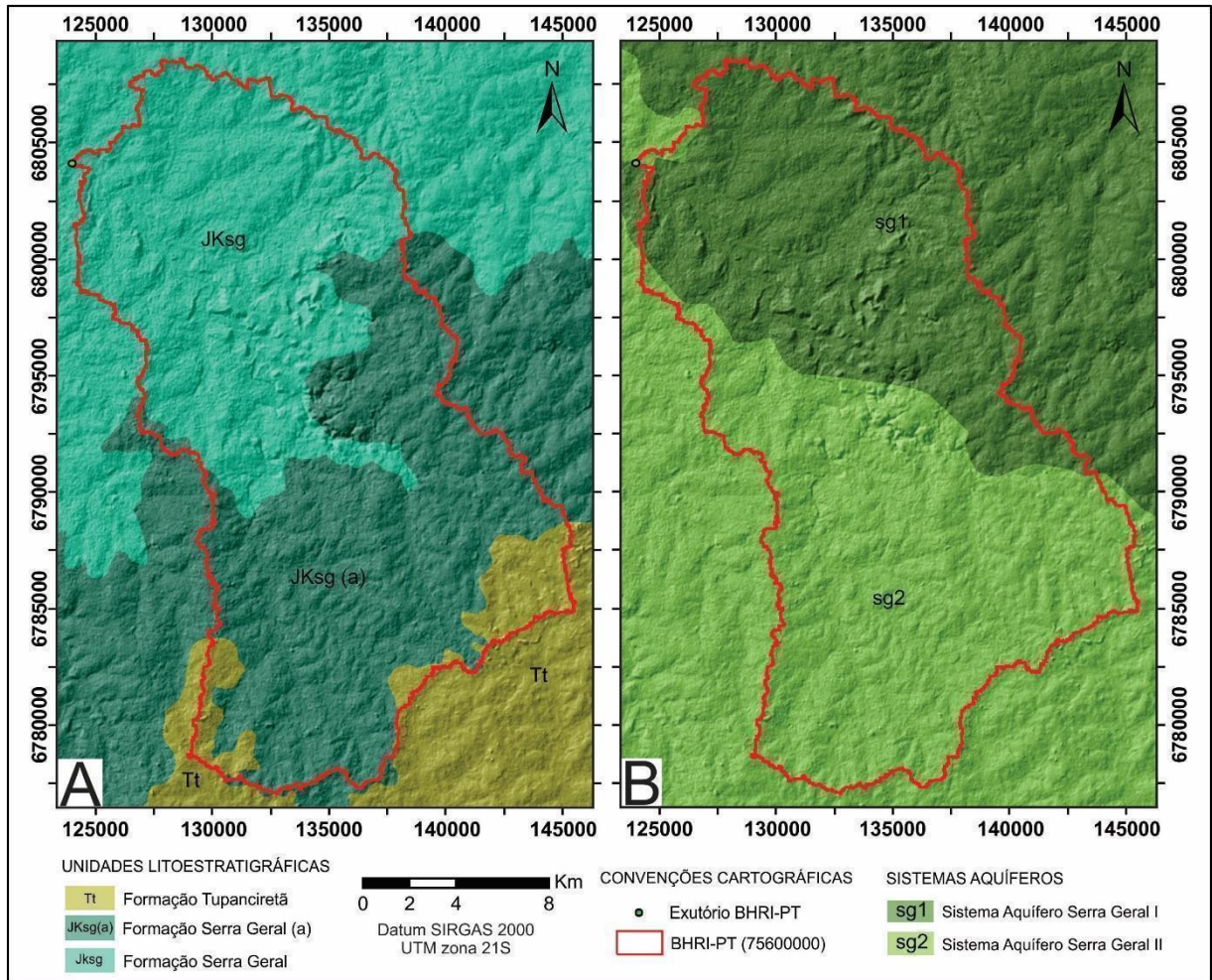


Figura 15: Bacia hidrográfica do rio Icamagua – estação Passo da Turma. a) Mapa geológico com as unidades litoestratigráficas. (b) Mapa hidrogeológico com os sistemas aquíferos. Fontes: (a) modificado das Folhas Santo Ângelo e Santiago, publicadas por IBGE (2003a, 2003b). (b) modificado de CPRM (2005).

As formações geológicas presentes na área da bacia hidrográfica do rio Icamagua – estação Passo da Turma são semelhantes às reconhecidas na bacia hidrográfica do rio Piratinim – estação Passo dos Dias. Afloram nesta área as rochas da Formação Serra Geral, que foi dividida por IBGE (2003b) em duas unidades: Formação Serra Geral e, em menor área, Formação Tupanciretã.

As rochas da Formação Serra Geral foram individualizadas por IBGE (2003b) como sendo rochas “efusivas básicas, continentais, toleíticas, comumente basaltos e fenobasaltos e corpos tabulares de diabásio (db) associados.” e a Formação Serra Geral (a) como sendo rochas félsicas e seus correspondentes termos vítreos.” que normalmente se encontram capeando as efusivas básicas.

O sistema aquífero sg1, como já descrito, é dominado por rochas basálticas amigdalóides e fraturadas, com espessa cobertura de solo. A principal diferença entre

os sistemas aquíferos sg1 e sg2 é a possibilidade de água subterrânea. Enquanto o primeiro apresenta média a alta possibilidade de água subterrânea, o segundo é caracterizado como aquíferos limitados de baixa possibilidade de água, apresentando no geral capacidades específicas menores que $0,5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}\text{m}^{-1}$ (MACHADO; FREITAS, 2005). Pontualmente há registros de poços com capacidades acima de $2,0 \text{ m}^3\text{h}^{-1}\text{m}^{-1}$, em locais com maior incidência de fraturas ou com presença de rochas areníticas na base (VIERO; SILVA, 2010).

No topo da sequência vulcânica, a região do Sistema Aquífero Serra Geral II (sg2) é dominado pelas litologias riolitos, riodacitos e, em menor proporção, os basaltos (Machado; Freitas, 2005). Essa descrição está relacionada com as rochas da Formação Serra Geral e Formação Serra Geral (a). Os aquíferos desse sistema possuem pouca espessura de solo e também são muito utilizados para abastecimento público e industrial (VIERO; SILVA, (2010).

3.4.2. Lineamentos

Para uma caracterização dos lineamentos das bacias hidrográficas deste estudo, foi feito um mapeamento através do processamento do MDE utilizando a ferramenta *Hillshade*, disponível no ArcGIS 10.1 (ESRI, 2014), que realiza um sombreamento induzido no MDE, destacando a textura do relevo e tornando mais claro algumas feições geomorfológicas, como os lineamentos (MATZEMBACKER, 2011; BRICALLI, 2016; BARROS; CORRÊA; TAVARES, 2017; HENRIQUES; VALADÃO, 2018).

Essa ferramenta permite ao usuário definir o azimuth, que é o ângulo de inclinação solar em relação à topografia, e o exagero vertical da imagem (NEPOMUCENO; LUCHIARI, 2014). Com o objetivo de destacar diferentes famílias de lineamentos, o processamento do MDE se deu em quatro azimuths diferentes, 00° , 45° , 90° e 315° , conforme a metodologia aplicada por vários autores (BRICALLI, 2016; BARROS; CORRÊA; TAVARES, 2017; DOS SANTOS COUTINHO; BRICALLI; LOPES, 2017). A partir das diferentes perspectivas de sombreamento foram traçados os lineamentos para cada bacia hidrográfica, mapeados a partir de uma análise visual na escala 1:100.000.

A análise espacial e de orientação dos lineamentos mapeados foi realizada utilizando a toolbox *AzimuthFinder*, desenvolvido por Queiroz; Salamuni; do Nascimento (2014) para utilização em programas de processamento de imagens.

Segundo os autores, a ferramenta é capaz de transformar o dado gráfico em dados numéricos com direção em relação ao Norte. Com a utilização do AzimuthFinder é possível exportar os dados em arquivos compatíveis com diferentes programas de análises estruturais. No presente trabalho, foi utilizada para exportar arquivos compatíveis com o programa Stereonet 10.2.9 (CARDOZO; ALLMENDINGER, 2013).

O Stereonet é um programa que projeta dados espaciais (linhas, planos, e pequenos círculos) em um hemisfério de referência, facilitando a análise de um conjunto de dados orientados, além de ser capaz de realizar operações com estes (CARDOZO; ALLMENDINGER, 2013). A partir dos arquivos dos lineamentos extraídos, foram criados dois diagramas de rosetas para cada bacia. Um deles apresenta a frequência com que cada direção de lineamentos aparece, podendo assim ser possível identificar as famílias de lineamentos em cada área. Além disso, foi criado um diagrama com os comprimentos dos lineamentos traçados, podendo ser útil quando da análise da persistência dos lineamentos (MATZEMBACKER, 2011; DA SILVA, 2015; DOS SANTOS COUTINHO; BRICALLI; LOPES, 2017).

A partir dos lineamentos traçados, foram gerados no programa ArcGIS 10.1 (ESRI, 2014) mapas de lineamentos para cada uma das bacias, permitindo uma análise da distribuição espacial dos lineamentos e a identificação de padrões e de áreas com maior ou menor quantidade de lineamentos por área. Também foram criados mapas de densidade a partir dos lineamentos traçados, usando o toolbox Line Density no mesmo programa. Foram estabelecidas três classes de densidade (alta, média e baixa) e elas foram definidas automaticamente no programa Arcgis 10.1 (ESRI, 2014), utilizando o método de classificação com intervalos iguais, para cada bacia hidrográfica.

A estes mapas de densidade de lineamentos foram acrescentadas feições de drenagem, para melhor compreensão da situação de cada bacia, e assim tentar estabelecer uma relação entre a distribuição espacial dos lineamentos e a rede de drenagem. O arquivo de drenagens do estado do RS foi obtido on-line na biblioteca de arquivos da Fundação Estadual de Proteção Ambiental - RS (FEPAM, 2020).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para melhor entendimento dos resultados e das discussões propostas, neste capítulo todos os resultados são inicialmente apresentados e posteriormente discutidos.

4.1. Resultados

Os resultados do coeficiente de recessão α e do BFI_{max} para a Proposta 1, Proposta 2 e Proposta 3, foram calculados com base nas séries históricas apresentadas na Tabela 4. Os trechos dos hidrogramas utilizados para calcular os coeficientes de recessão estão apresentados em destaque na Figura 16 (a-d).

Tabela 4: Período da série histórica utilizada para o cálculo do coeficiente de recessão e do BFI_{max} para cada bacia.

Bacia hidrográfica	Período analisado	
	Coeficiente de recessão	BFI _{max}
BHAF-PC	09/07/2012 a 28/07/2012	01/01/1965 a 31/12/2018
BHAB-CC	06/12/2013 a 28/12/2013	23/08/1976 a 31/12/2018
BHRP-PD	24/11/2011 a 22/12/2011	29/12/1941 a 16/09/2018
BHRI-PT	19/10/2010 a 23/11/2010	01/01/1976 a 28/10/2018

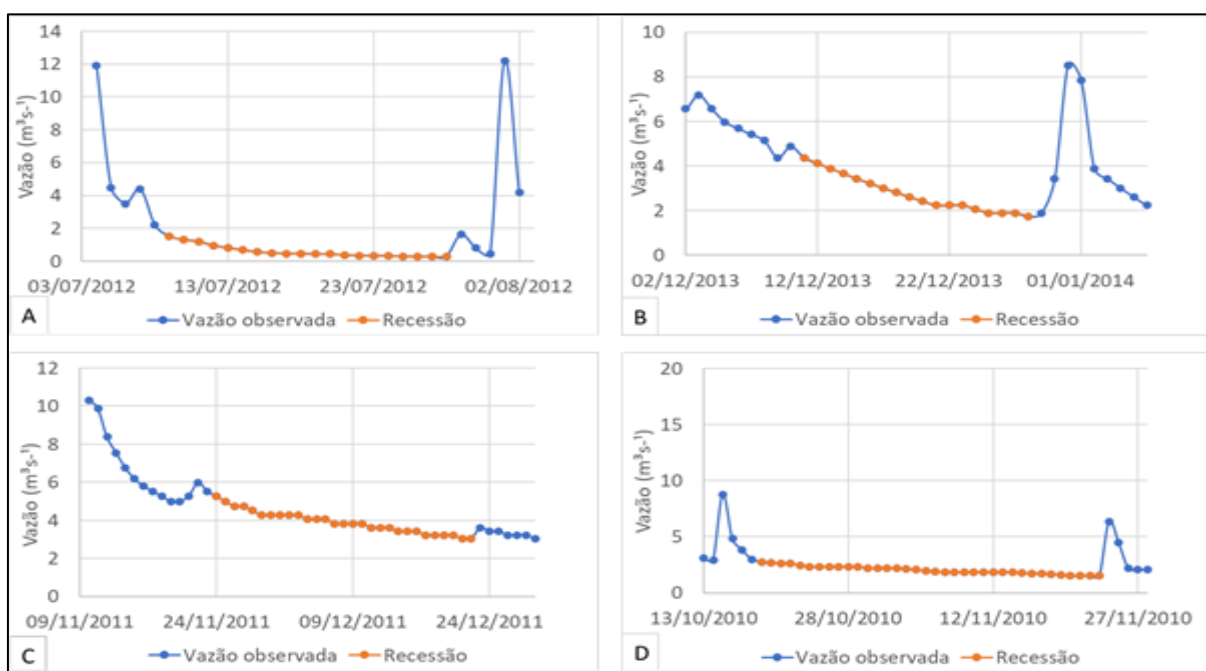


Figura 16: Hidrogramas apresentando as vazões observadas com destaque para o período utilizado na determinação do coeficiente de recessão para cada bacia hidrográfica estudada: (a) bacia hidrográfica do arroio Fragata – estação Passo dos Carros; (b) bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato; (c) bacia hidrográfica do rio Piratinim – estação Passo dos Dias; (d) bacia hidrográfica do rio Icamagua – estação Passo das Turmas.

Os resultados encontrados para o coeficiente de recessão α , as vazões características Q_{90} e Q_{50} e o BFI_{max} estão apresentados na Tabela 5. A Proposta 1

de determinação do BFI_{max} é o definido por Eckhardt (2005), a Proposta 2 é do filtro inverso e a Proposta 3 das vazões características, sendo os dois últimos propostos por Collischonn; Fan (2013). Cabe salientar que as vazões Q_{90} e Q_{50} , para a Proposta 3, foram calculadas utilizando as mesmas séries históricas do cálculo de BFI_{max} (Tabela 4).

Tabela 5: Resultados da determinação do coeficiente de recessão, das vazões características Q_{90} e Q_{50} e a relação entre elas e o parâmetro BFI_{max}, para cada proposta, para cada uma das bacias de estudo.

Bacia hidrográfica	Coeficiente de recessão α	Vazões características			BFI _{max}		
		Q_{90}	Q_{50}	Q_{90}/Q_{50}	Proposta 1	Proposta 2	Proposta 3
BHAF-PC	0,913	0,25	1,03	0,24	0,25	0,49	0,42
BHAB-CC	0,944	1,72	8,87	0,19	0,25	0,38	0,38
BHRP-PD	0,981	3,11	12,12	0,26	0,25	0,38	0,43
BHRI-PT	0,983	0,78	4,83	0,16	0,25	0,14	0,35

De acordo com os resultados do coeficiente de recessão α , as bacias hidrográficas localizadas no Escudo Sul-rio-grandense, BHAF-PC e BHAB-CC, apresentaram os menores valores, sendo a BHAF-PC a com menor valor (0,913). As bacias hidrográficas BHRP-PD e BHRI-PT localizadas no Planalto Setentrional, apresentaram os maiores resultados, sendo a BHRI-PT com maior valor (0,983).

As vazões características da bacia hidrográfica com a menor área (BHAF-PC) apresentaram os menores valores, mas não a menor relação Q_{90}/Q_{50} . A menor relação Q_{90}/Q_{50} foi observada na bacia BHRI-PT. A metodologia de se dividir duas vazões características de uma bacia, acaba por eliminar o efeito do tamanho da área de drenagem nos resultados (SMAKHTIN, 2001). A BHAB-CC apresenta a menor relação Q_{90}/Q_{50} das bacias localizadas na região do Escudo Sul-Rio-Grandense. A BHRP-PD apresenta a maior relação dentre as situadas na região do Planalto Setentrional.

Os resultados de BFI_{max} (Tabela 5), para a Proposta 1 apresentam os mesmos valores para todas as bacias, uma vez que esse é o valor fixo sugerido por Eckhardt (2005) para todas as bacias com rios perenes e aquíferos fraturados. Nas propostas 2 e 3, foram utilizados dados de vazão observada nos cálculos para determinação do BFI_{max} (Collischonn; Fan, 2013), sendo propostas que produzem resultados específicos para cada bacia.

A Proposta 1 apresentou resultados de BFI_{max} menores do que as propostas 2 e 3 para as BHAF-PC, BHAB-CC e BHRP-PD. A Proposta 1 apresentou valor de BFI_{max} maior apenas do que a Proposta 2 para a BHRI-PT. É importante chamar atenção para os períodos das séries históricas utilizado por Eckhardt (2005), que

foram no geral entre 2 e 3 anos, enquanto que no presente estudo foram utilizadas séries mais longas, acima de 40 anos de dados diários.

A Proposta 2 mostrou valores de BFI_{max} iguais para a BHAB-CC (BFI_{max} = 0,38), localizada na região do Escudo Sul-rio-grandense e a BHRP-PD, localizada na região do Planalto Setentrional. Nesta proposta, a BHAF-PC foi a que apresentou o maior valor de BFI_{max} (BFI_{max} = 0,49) e a BHRI-PT o menor (BFI_{max} = 0,14).

Os valores de BFI_{max} da Proposta 3 apresentaram resultados semelhantes para todas as bacias. A BHRI-PT apresentou o menor resultado (BFI_{max} = 0,35) e a BHRP-PD o maior (BFI_{max} = 0,43), sendo as duas bacias localizadas na região do Planalto Setentrional.

Com o objetivo de verificar o impacto das metodologias de determinação de BFI_{max} sobre as vazões do curso d'água, foi realizado o cálculo do escoamento de base médio, em lâmina, em cada uma das bacias, para cada uma das propostas analisadas. Foi determinada também a parcela do escoamento total que é referente ao escoamento de base em cada uma das propostas analisadas (Tabela 6).

Tabela 6: Escoamento de base médio (em lâmina) e porcentagem de contribuição do escoamento de base em relação ao escoamento total para cada bacia estudada de acordo com as diferentes propostas de determinação do BFI_{max}, utilizando dados de toda a série histórica disponível.

Bacia hidrográfica	Lâmina do escoamento de base médio (mm ano ⁻¹)			Contribuição do escoamento de base (%)		
	Proposta 1	Proposta 2	Proposta 3	Proposta 1	Proposta 2	Proposta 3
BHAF-PC	184,0	328,5	288,5	24,71%	44,10%	38,73%
BHAB-CC	180,1	253,2	250,2	23,77%	33,41%	33,02%
BHRP-PD	218,3	306,8	331,6	24,03%	33,77%	36,51%
BHRI-PT	228,8	155,3	279,5	16,09%	10,92%	19,65%

Os valores, em lâmina, do escoamento de base médio, de modo geral, se mostraram proporcionais aos valores de BFI_{max} para cada uma das bacias. Os valores obtidos para a Proposta 1 foram menores em três das bacias estudadas (BHAF-PC, BHAB-CC e BHRP-PD). Apenas a BHRI-PT apresentou valor de lâmina d'água do escoamento de base médio menor na Proposta 2 (Tabela 6).

Para a Proposta 1, as bacias localizadas na região do Escudo Sul-rio-grandense (BHAF-PC = 184,0mm ano⁻¹ e BHAB-CC = 180,1mm ano⁻¹) apresentaram os menores valores de lâmina do escoamento de base médio, enquanto que as bacias localizadas no Planalto Setentrional apresentaram os maiores valores de lâmina (BHRP-PD = 218,3mm ano⁻¹ e BHRI-PT = 228,8mm ano⁻¹).

A BHAF-PC apresentou o maior valor de lâmina de escoamento de base médio para a Proposta 2 ($328,5\text{mm ano}^{-1}$), seguida pelas BHRP-PD ($306,8\text{mm ano}^{-1}$) e a BHAB-CC ($253,2\text{mm ano}^{-1}$). A BHRI-PT apresentou o menor valor de lâmina para a Proposta 2 entre as quatro bacias ($155,3\text{mm ano}^{-1}$).

Para a Proposta 3, a BHRP-PD apresentou maior valor de lâmina d'água ($331,6\text{mm ano}^{-1}$), seguida pelas bacias BHAF-PC ($288,5\text{mm ano}^{-1}$), a BHRI-PT ($279,5\text{mm ano}^{-1}$) e a BHAB-CC ($250,2\text{mm ano}^{-1}$).

As porcentagens de contribuição do escoamento de base em relação ao escoamento total são indicadores da relação entre a lâmina do escoamento de base e a lâmina do escoamento total do curso d'água. Para a Proposta 1, a BHAF-PC, a BHAB-CC e a BHRP-PD apresentaram contribuições de escoamento de base semelhantes, em torno de 24%, enquanto que a BHRI-PT apresentou uma contribuição menor (16,09%), mesmo com os valores de BF_{Imax} iguais (0,25).

Na Proposta 2, percebe-se que a BHAF-PC foi a que obteve maior contribuição (44,10%), seguida pelas BHRP-PD (33,77%) e BHAB-CC (33,41%). Nota-se que as contribuições semelhantes em BHRP-PD e BHAB-CC são coerentes com o valor de BF_{Imax} calculado, ou seja, apresentam resultados praticamente iguais. A menor contribuição foi calculada para a BHRI-PT (10,92%).

A Proposta 3 apresentou resultados de contribuição do escoamento de base próximos para as três bacias BHAF-PC, BHAB-CC e BHRP-PD, todos em torno de 36%, exceto a BHRI-PT, que apresentou a menor contribuição do escoamento de base (19,65%). Esses resultados são concordantes com os encontrados nas propostas 1 e 2.

A avaliação dos dados de escoamento de base por bacia indica que a BHAF-PC, localizada na região do Escudo Sul-rio-grandense, apresentou a maior taxa de contribuição do escoamento de base na Proposta 2 (44,10%), seguido pela Proposta 3 (38,73%) e pela Proposta 1 (24,71%). Esses valores foram os maiores para cada proposta entre todas as bacias analisadas neste estudo. No mesmo contexto geológico, a BHAB-CC apresentou 23,77% para a Proposta 1, enquanto que as Propostas 2 e 3 foram acima de 33%.

No contexto do Planalto Setentrional, a bacia BHRP-PD apresentou valores de escoamento de base de 24,03% para a Proposta 1 e acima de 33% para as propostas 2 e 3. Já a BHRI-PT apresentou as menores taxas de contribuição do escoamento de base para todas as propostas, inclusive a Proposta 1.

Para verificar uma possível influência do tamanho da série histórica para a execução do filtro digital e nos resultados de BFI_{max} e se, ao trabalhar com apenas um período da série histórica, haveria uma diferença significativa nos resultados, foi realizado também o cálculo de BFI_{max} para um período da série histórica.

Na Tabela 7 estão apresentados os períodos das séries históricas utilizados para a determinação dos valores de vazões características e BFI_{max}. Esse período foi escolhido por não apresentar falhas nos dados de vazão em nenhuma das bacias. Da mesma forma que no cálculo anterior, o período de dados utilizado para a determinação das vazões características foi coincidente com o período utilizado para os cálculos de BFI_{max}. Os valores do coeficiente de recessão foram os mesmos dos calculados anteriormente. Os períodos das séries históricas analisados foram similares para todas as bacias, havendo no máximo 2 dias de diferença entre eles.

Tabela 7: Período da série histórica utilizada para o cálculo do BFI_{max}, as vazões características Q_{90} e Q_{50} , e os resultados de BFI_{max} calculado para cada bacia no período entre 2010 e 2015.

Bacia hidrográfica	Período analisado BFI _{max}	Vazões características			BFI _{max}		
		Q_{90}	Q_{50}	Q_{90}/Q_{50}	Proposta 1	Proposta 2	Proposta 3
BHAF-PC	02/01/2010 a 31/12/2015	0,18	0,81	0,22	0,25	0,50	0,40
BHAB-CC	03/01/2010 a 31/12/2015	1,64	7,51	0,22	0,25	0,43	0,40
BHRP-PD	01/01/2010 a 31/12/2015	3,62	15,24	0,24	0,25	0,43	0,41
BHRI-PT	01/01/2010 a 31/12/2015	1,17	4,84	0,24	0,25	0,13	0,42

Sobre as vazões características, apenas a BHAF-PC apresentou valores menores de vazão (Tabela 7), enquanto todas as outras apresentaram valores maiores quando comparados com as vazões em todo o período de dados (Tabela 6). Mesmo assim, a relação entre as duas vazões características Q_{90} e Q_{50} , para a BHAF-PC e a BHRP-PD para esse período foi menor do que a relação quando analisada toda a série histórica. As bacias BHAB-CC e BHRI-PT apresentaram taxas maiores para esse período.

A Proposta 1 permanece utilizando o valor de BFI_{max} = 0,25 para as quatro bacias, independentemente do tamanho da série histórica utilizada na análise (Tabela 7). Para o esse período (Tabela 7) na Proposta 2, a BHAF-PC apresentou o maior valor de BFI_{max} (BFI_{max} = 0,50), enquanto que as BHAB-CC e BHRP-PD obtiveram valores iguais (BFI_{max} = 0,43). A BHRI-PT apresentou o menor resultado entre todas

as bacias (BFImax = 0,13), seguindo o resultado obtido para a série histórica completa. A mesma bacia foi ainda a única a apresentar um valor de BFImax menor do que o proposto por Eckhardt (2005) na Proposta 1.

As relações entre as vazões características Q_{90} e Q_{50} ficaram próximas entre todas as bacias estudadas em aproximadamente 0,23. Uma vez que esses valores são utilizados para calcular o BFImax calculados na Proposta 3, todas as bacias nessa Proposta apresentaram valores semelhantes para esse parâmetro, próximo à 0,41.

A Figura 17 (a–c) apresenta a comparação entre os resultados de BFImax calculados em cada bacia hidrográfica a partir de toda a série histórica disponível e para o período entre 2010 e 2015.

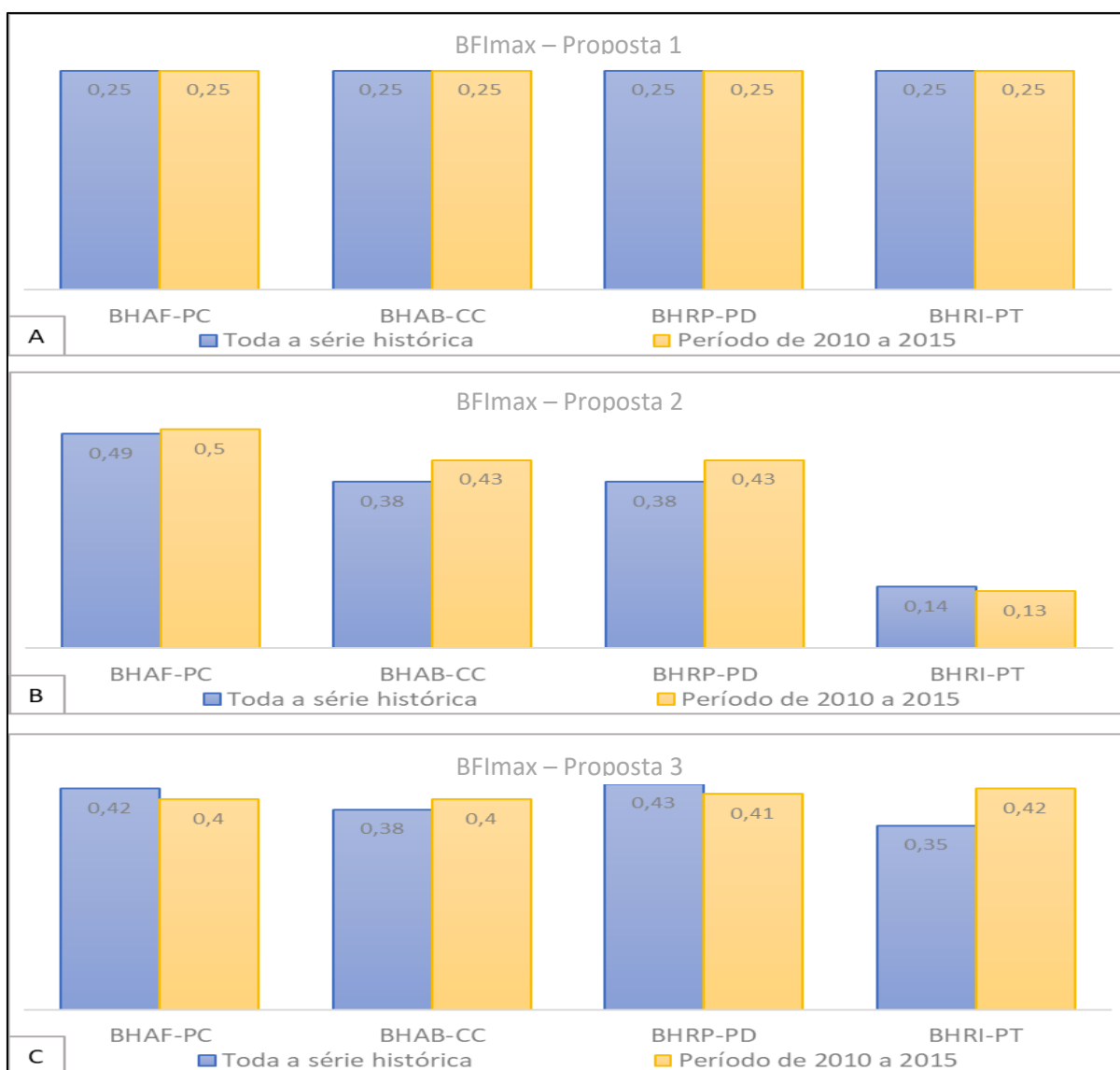


Figura 17: Gráficos de BFImax para cada uma das propostas avaliadas de acordo com os dois períodos de avaliação da série histórica propostos, para cada bacia de estudo. (a) BFImax de acordo com a Proposta 1, proposto por Eckhardt (2005). (b) BFImax de acordo com a Proposta 2, filtro inverso proposto com Collischonn; Fan (2013). (c) BFImax de acordo com a Proposta 3, vazões características proposto por Collischonn; Fan (2013).

A Figura 17 (a) evidencia que o valor de BFI_{max} de acordo com a Proposta 1, é igual independentemente do tamanho da série histórica analisada. A Proposta 2 (Figura 17(b)) apresenta um ligeiro aumento do valor de BFI_{max} para a BHAF-PC, a BHAB-CC e a BHRP-PD quando se utilizou o período da série histórica entre 2010 e 2015. Apenas a BHRI-PT apresentou uma pequena diminuição do valor de BFI_{max}. Na Proposta 3 (Figura 17(c)), é possível notar que para a BHAF-PC e a BHRP-PD houve uma diminuição no valor de BFI_{max} para o período entre 2010 e 2015. A BHAB-CC e a BHRI-PT apresentaram aumento nos valores de BFI_{max}, sendo que a última exibiu a maior diferença entre as duas propostas.

A elaboração de hidrogramas foi realizada com trechos selecionados da série histórica de vazões de cada uma das bacias. De forma sobreposta, foram inseridos os hidrogramas de escoamento de base utilizando o filtro digital para uma das propostas (Figuras 18-21).

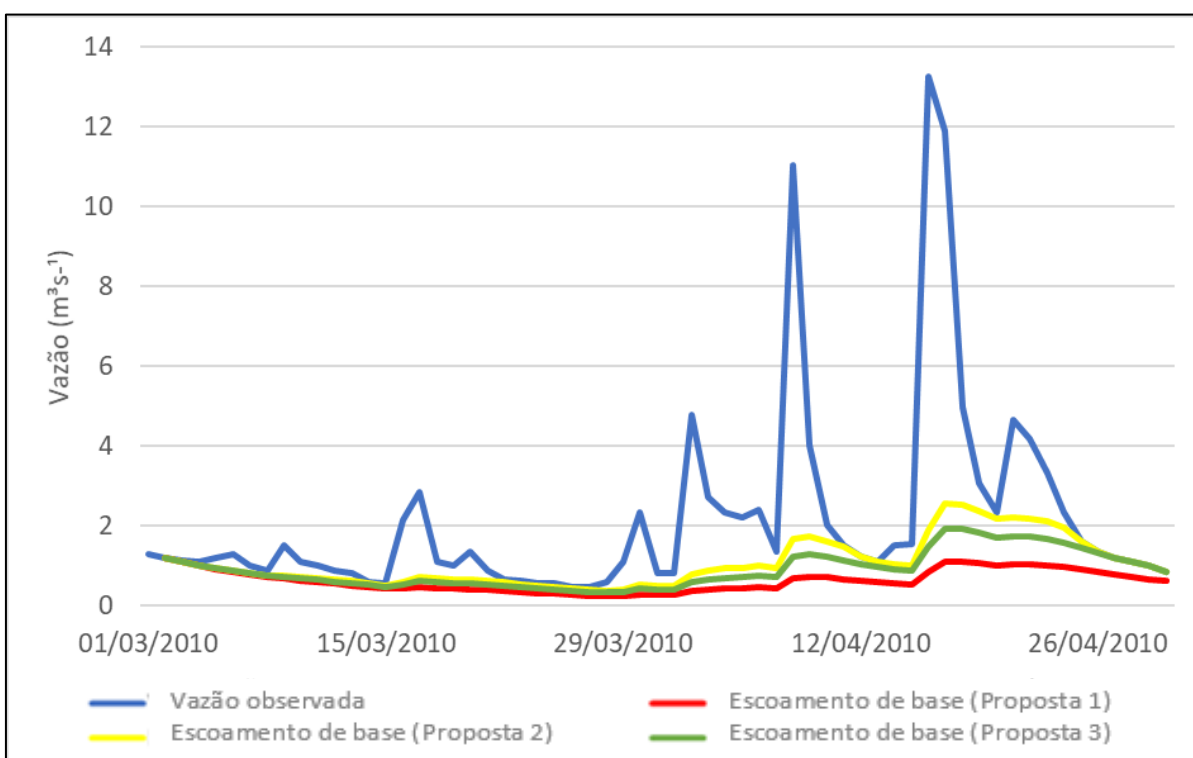


Figura 18: Trechos dos hidrogramas apresentando as vazões observadas e as vazões decorrentes do escoamento de base calculadas de acordo com cada uma das três propostas para a bacia hidrográfica do arroio Fragata – estação Passo dos Carros.

A Figura 18 permite inferir que a BHAF-PC apresenta a maior diferença nos resultados do hidrograma de escoamento de base entre as diferentes propostas avaliadas, principalmente durante os períodos de contribuição do escoamento superficial direto (picos do hidrograma). É possível verificar também que em períodos

longos de recessão, as estimativas do hidrograma de escoamento de base para as três propostas praticamente se igualam, mas em períodos com picos de vazão mais elevados, as três propostas apresentam as maiores diferenças.

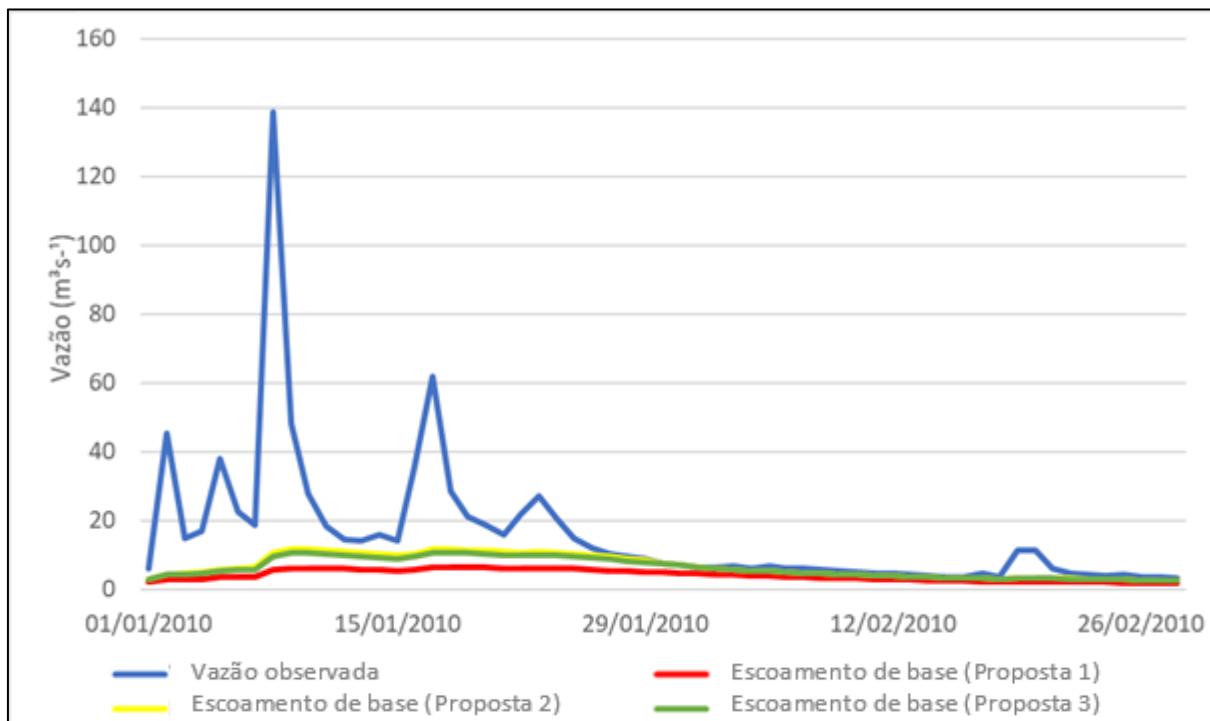


Figura 19: Trechos dos hidrogramas apresentando as vazões observadas e as vazões decorrentes do escoamento de base calculadas de acordo com cada uma das propostas para a bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato.

A Figura 19 evidencia que as vazões do escoamento de base estimadas em cada uma das propostas para a BHAB-CC ficaram bem próximas quando no período longo de recessão. No entanto, nos períodos de maior variação da vazão observada (picos do hidrograma), as vazões de base estimadas em cada proposta se diferenciam. Nesse caso, a Proposta 1 apresenta a curva com menores valores entre as três propostas e a curva para a Proposta 2 ligeiramente acima da Proposta 3.

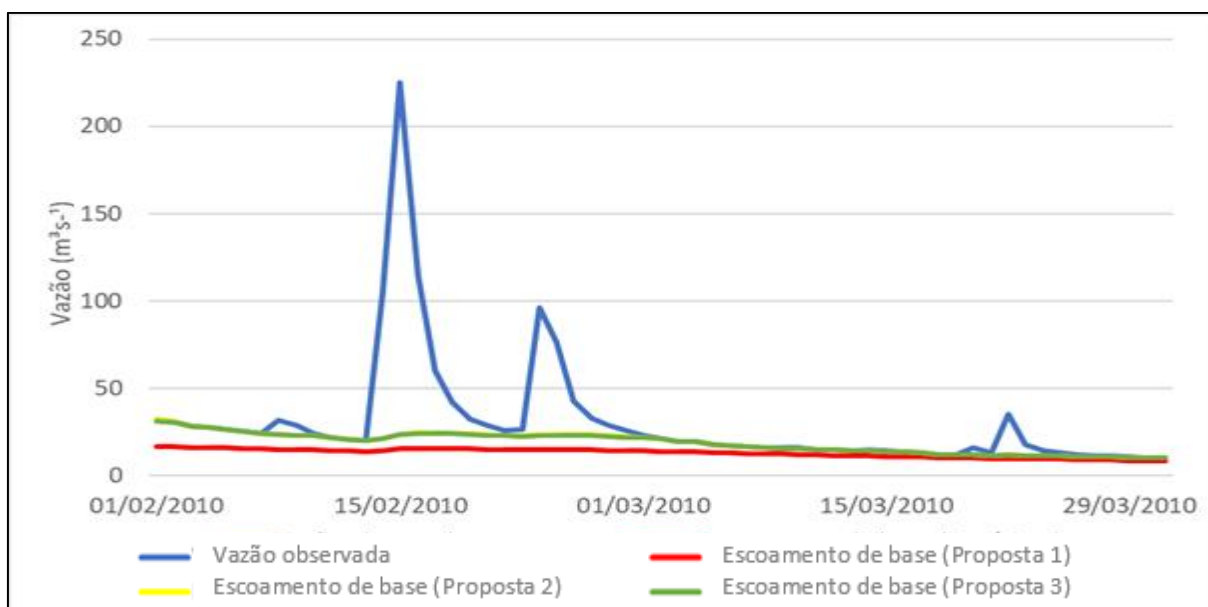


Figura 20: Trechos dos hidrogramas apresentando as vazões observadas e as vazões decorrentes do escoamento de base calculadas de acordo com cada uma das propostas para a bacia hidrográfica do rio Piratinim – estação Passo dos Dias.

Na Figura 20 é observado que as propostas 2 e 3 produziram hidrogramas de escoamento de base praticamente iguais, enquanto que a Proposta 1 se mostrou abaixo dos outros dois. As vazões de escoamento de base da Proposta 1 ficaram abaixo inclusive das vazões observadas durante períodos de recessão bastante característicos, indicando uma subestimação das vazões do escoamento de base.

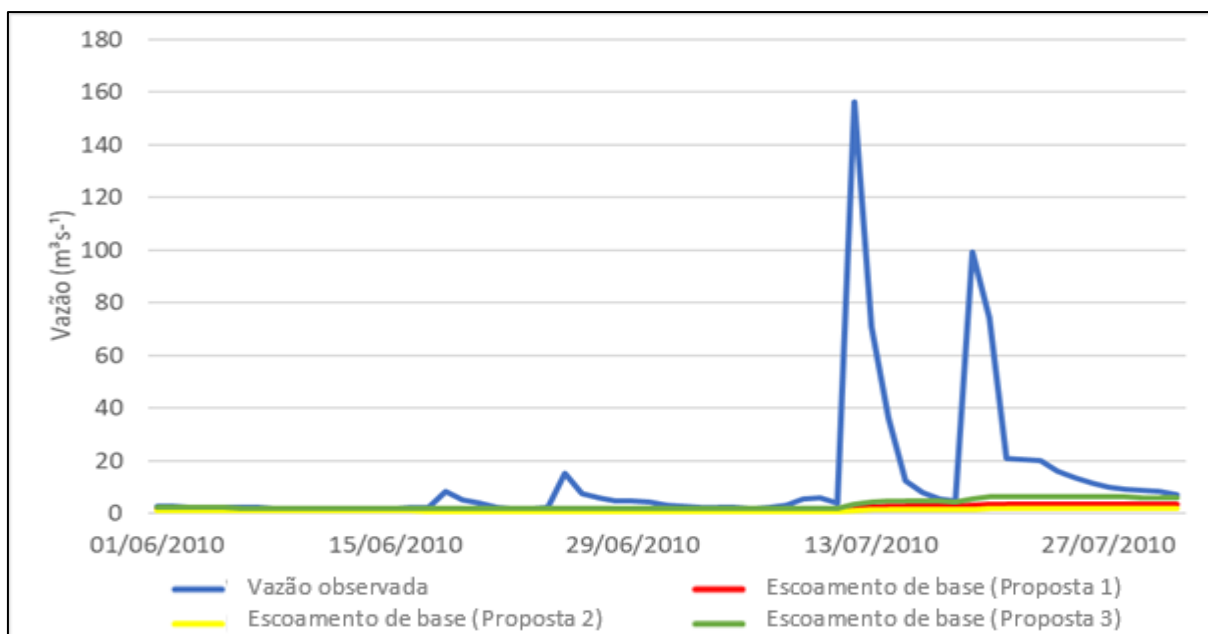


Figura 21: Trechos dos hidrogramas apresentando as vazões observadas e as vazões decorrentes do escoamento de base calculadas de acordo com cada uma das propostas para a bacia hidrográfica do rio Içamaquã – estação Passo das Turmas.

A BHRI-PT foi a única em que o hidrograma de escoamento de base determinado pela Proposta 2 ficou abaixo daquele obtido de acordo com a Proposta

1. Em períodos mais longos de recessão, as vazões de escoamento de base estimadas por cada uma das propostas ficaram praticamente iguais às vazões observadas.

A lâmina do escoamento de base e a contribuição do escoamento de base em relação à vazão total, calculadas para o período entre 2010 e 2015, para cada bacia hidrográfica deste estudo e em cada uma das três propostas, e os resultados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Escoamento de base médio (em lâmina) e porcentagem de contribuição do escoamento de base em relação ao escoamento total para cada bacia estudada de acordo com as diferentes propostas de determinação do BFI_{max}, utilizando dados da série histórica no período entre 2010 e 2015.

Bacia hidrográfica	Lâmina do escoamento de base médio (mm ano ⁻¹)			Contribuição do escoamento de base (%)		
	Proposta 1	Proposta 2	Proposta 3	Proposta 1	Proposta 2	Proposta 3
BHAF-PC	125,5	229,8	190,8	24,78%	45,37%	37,67%
BHAB-CC	146,9	226,6	214,3	24,61%	39,55%	36,11%
BHRP-PD	233,6	375,2	362,6	22,97%	36,88%	35,65%
BHRI-PT	221,9	155,0	303,0	15,03%	10,50%	20,52%

Em relação aos valores de escoamento de base, a Proposta 1 apresentou os menores valores entre todas as bacias, apenas a BHRI-PT apresentou resultado menor para a Proposta 2 (155,0mm ano⁻¹), conforme pode ser verificado na Tabela 8. Para a Proposta 1, a BHRP-PD apresentou o maior valor de escoamento de base (233,6mm ano⁻¹), seguido pela BHRI-PT (221,9mm ano⁻¹), ambas localizadas na região do Planalto Setentrional. As bacias localizadas na região do Escudo Sul-rio-grandense apresentaram os menores valores de escoamento de base para a Proposta 1 (BHAF-PC = 125,5mm ano⁻¹ e BHAB-CC = 146,9mm ano⁻¹).

As bacias localizadas na região do Escudo Sul-rio-grandense apresentaram resultados de escoamento de base semelhantes para a Proposta 2 (BHAF-PC = 229,8mm ano⁻¹ e BHAB-CC = 226,6mm ano⁻¹). Enquanto as bacias da região do Planalto apresentaram as maiores diferenças (BHRP-PD = 375,2mm ano⁻¹ e BHRI-PT = 155,0mm ano⁻¹). Sendo a BHRP-PD a bacia que apresentou maior valor de lâmina entre todas as bacias nesta proposta e a BHRI-PT o menor valor.

Para a Proposta 3, as bacias localizadas na região do Escudo Sul-rio-grandense apresentaram os menores valores de escoamento de base (BHAF-PC = 190,8mm ano⁻¹ e BHAB-CC = 214,3mm ano⁻¹), sendo a BHAF-PC a que apresentou menor valor entre todas as bacias. Já as bacias localizadas no Planalto Setentrional apresentaram os maiores valores de escoamento de base na Proposta 3 (BHRP-PD

= 362,6mm ano⁻¹ e BHRI-PT = 303,0mm ano⁻¹), sendo a BHRP-PD a bacia que apresentou maior resultado entre as quatro bacias estudadas.

Com relação à contribuição do escoamento de base, para a Proposta 1, a BHAF-PC, a BHAB-CC e a BHRP-PD apresentaram contribuição de escoamento de base semelhantes em torno de 24%, enquanto a BHRI-PT apresentou resultado inferior (~ 15%), mesmo o valor de BFI_{max} sendo igual para todas as bacias. Para a Proposta 2, a BHAF-PC apresentou resultado acima das demais (45,37%), seguida pelas bacias BHAB-CC (39,55%), BHRP-PD (36,88%) e a BHRI-PT, a qual teve o menor resultado entre todas (10,50%). Os resultados para a Proposta 3 foram semelhantes entre as três bacias BHAF-PC, BHAB-CC e BHRP-PD, em média 36%, enquanto a BHRI-PT seguiu sendo a que apresentou a menor contribuição de escoamento de base (20,52%). A Figura 22 (a–c) apresenta gráficos com as contribuições do escoamento de base calculados a partir de cada proposta estudada, comparando os resultados entre as duas propostas de análise da série histórica, tanto utilizando a série completa, quanto para a seção entre 2010 e 2015.

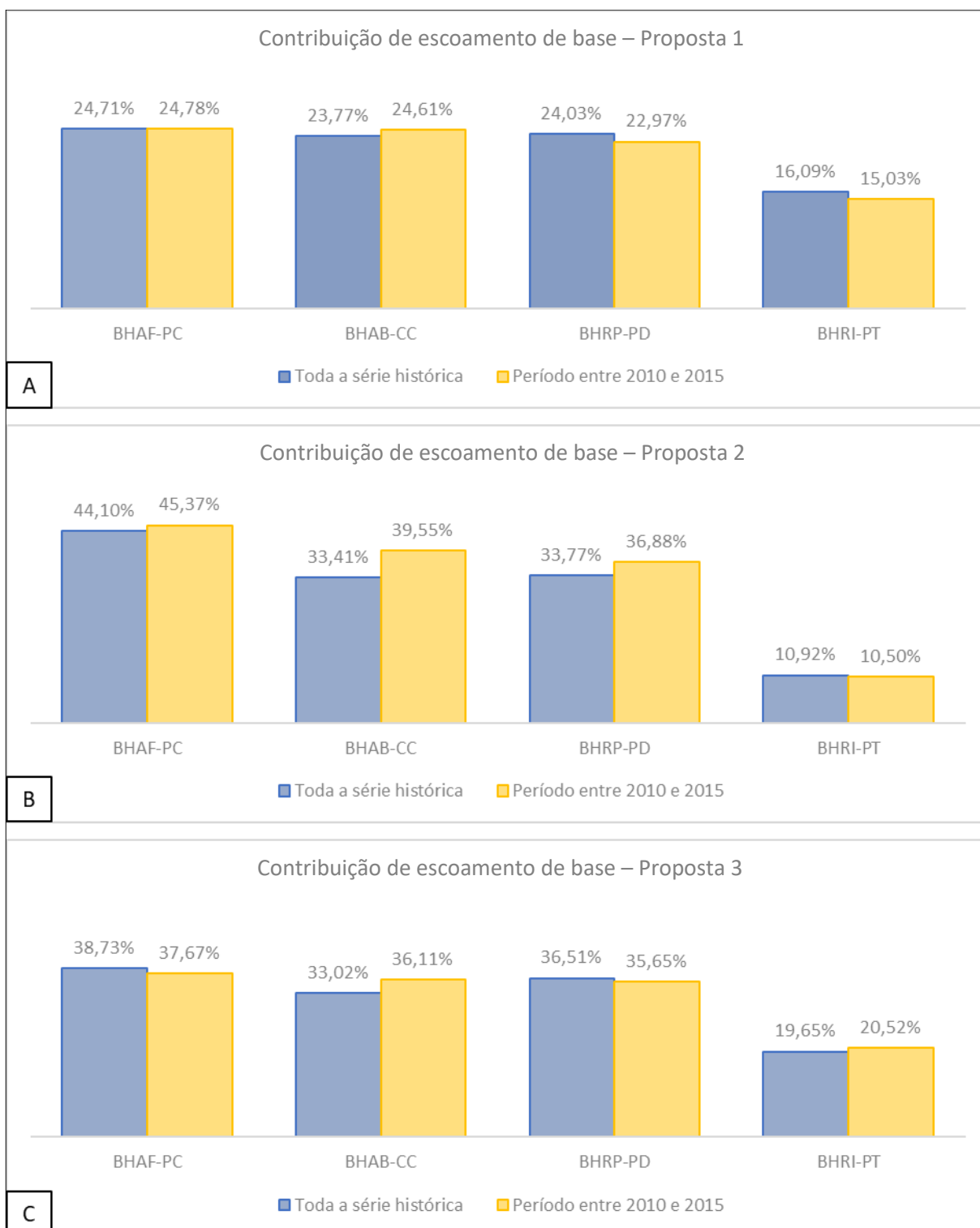


Figura 22: Gráficos de contribuição do escoamento de base para cada uma das propostas avaliadas de acordo com os dois períodos de avaliação da série histórica propostos, para cada bacia de estudo (bacia hidrográfica do arroio Fragata – estação Passo dos Carros; bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato; bacia hidrográfica do rio Piratinim – estação Passo dos Dias; bacia hidrográfica do rio Içamaqua – estação Passo das Turmas). (a) de acordo com a Proposta 1, proposto por Eckhardt (2005). (b) de acordo com a Proposta 2, filtro inverso proposto com Collischonn; Fan (2013). (c) de acordo com a Proposta 3, vazões características proposto por Collischonn; Fan (2013).

Os resultados para a contribuição do escoamento de base, no geral, acompanharam os resultados do BFI_{max}. A Figura 22 (a) mostra que, para a Proposta 1, tanto na proposta de avaliação utilizando toda a série histórica de vazões disponível, quanto utilizando apenas um período da série, os resultados para cada uma das quatro bacias deste estudo foram bem próximos, variando cerca de 1% para mais ou para menos.

A Figura 22 (b) exhibe as contribuições de escoamento de base calculadas de acordo com a Proposta 2. A BHAF-PC apresentou resultados semelhantes utilizando toda a série histórica ou apenas um trecho dela, havendo uma variação entre as duas propostas de apenas 1%. A BHAB-CC e a BHRP-PD apresentaram a mesma tendência de aumento (6% e 3%, respectivamente) na contribuição do escoamento de base quando comparado o período entre 2010 e 2015 em relação à toda a série histórica. Já para a BHRI-PT, o resultado permaneceu praticamente igual, variando menos de 0,5% entre as duas propostas de análise da série histórica.

Na Figura 22 (c), comparando os resultados da contribuição do escoamento de base para a Proposta 3, de acordo com as duas propostas de análise da série histórica, a BHAF-PC apresentou pouca variação, em torno de 1% menor quando se utilizou apenas o período entre 2010 e 2015. A BHAB-CC apresentou a maior diferença comparando entre as outras bacias nesta proposta. Houve uma contribuição cerca de 3% maior quando se utilizou a proposta do trecho da série histórica do que quando comparado com a proposta de análise de toda a série histórica. A BHRP-PD e a BHRI-PT apresentaram contribuições semelhantes em relação às duas propostas de análise da série histórica, variando cerca de 1%.

Depois de analisados os resultados de BFI_{max} e a contribuição do escoamento de base, a terceira etapa deste estudo compreende a determinação de características geológicas, geomorfológicas e estruturais de cada bacia e que podem influenciar no armazenamento e movimento das águas subterrâneas. A caracterização regional de cada bacia está disponível no item 3.4. Caracterização fisiográfica, deste estudo. Aqui serão apresentadas características individuais como frequência, comprimento e densidade dos lineamentos obtidos através da metodologia descrita. Além dessas informações, no final deste capítulo encontra-se uma tabela com o resumo das principais informações retiradas da bibliografia e levantadas neste estudo.

No âmbito da análise estrutural, os principais lineamentos das bacias foram extraídos e estão apresentados nas Figuras 23 a 26. Além dos lineamentos,

diagramas de rosetas de frequência e de comprimento dos lineamentos foram construídos para cada bacia. As rosetas evidenciam a quantidade de lineamentos identificados e suas direções em relação aos pontos cardeais.

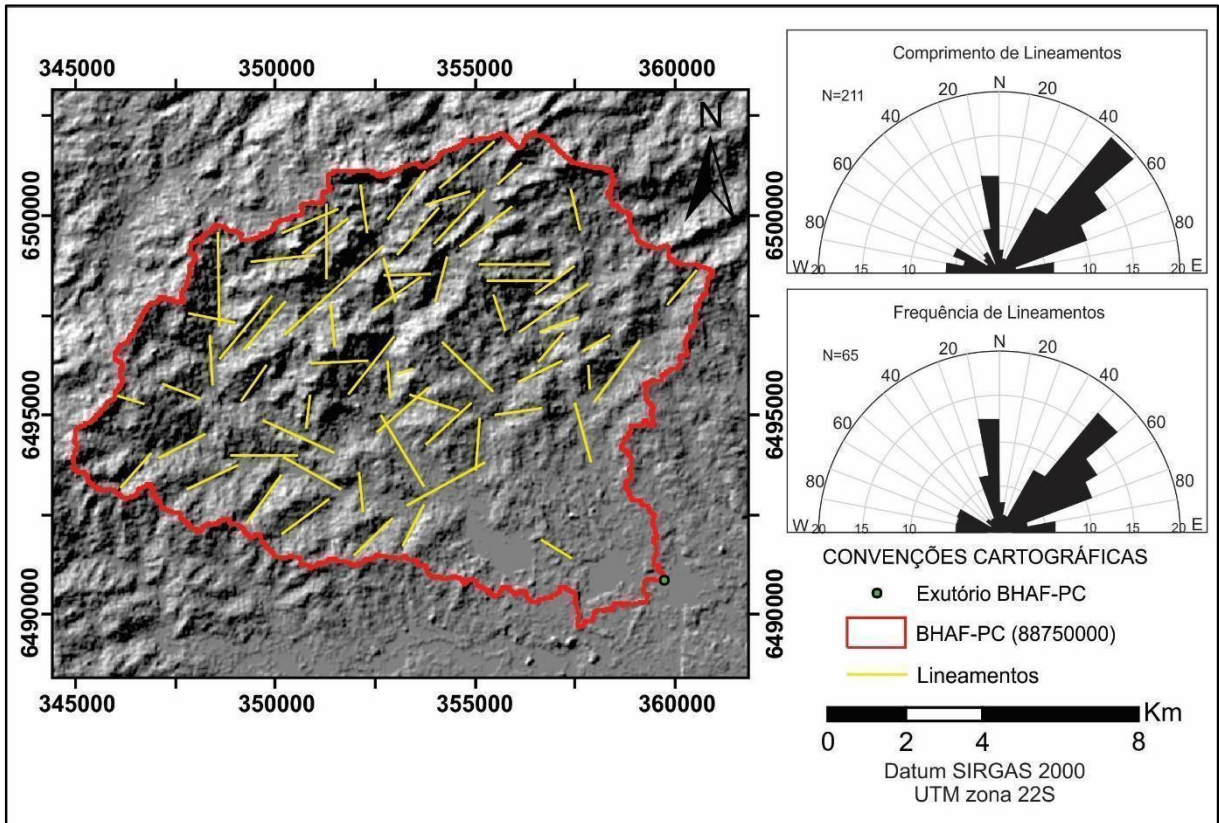


Figura 23: Mapa de lineamentos e diagramas de rosetas de frequência e comprimento dos lineamentos da bacia hidrográfica do arroio Fragata – estação Passo dos Carros.

A principal família de lineamentos da BHAF-PC possui direção aproximada N50E e uma família N10W secundária que também se destaca. Essas famílias de lineamentos também apresentam os maiores comprimentos. O curso d'água principal possui direção NW-SE, com fluxo para sul e está localizado na região sul da bacia (Figura 23). A bacia apresenta uma mudança na geomorfologia, um relevo menos acidentado no extremo SW da bacia está relacionado com a proximidade com o litoral e a presença de sedimentos recobrindo as rochas granitóides presentes na região.

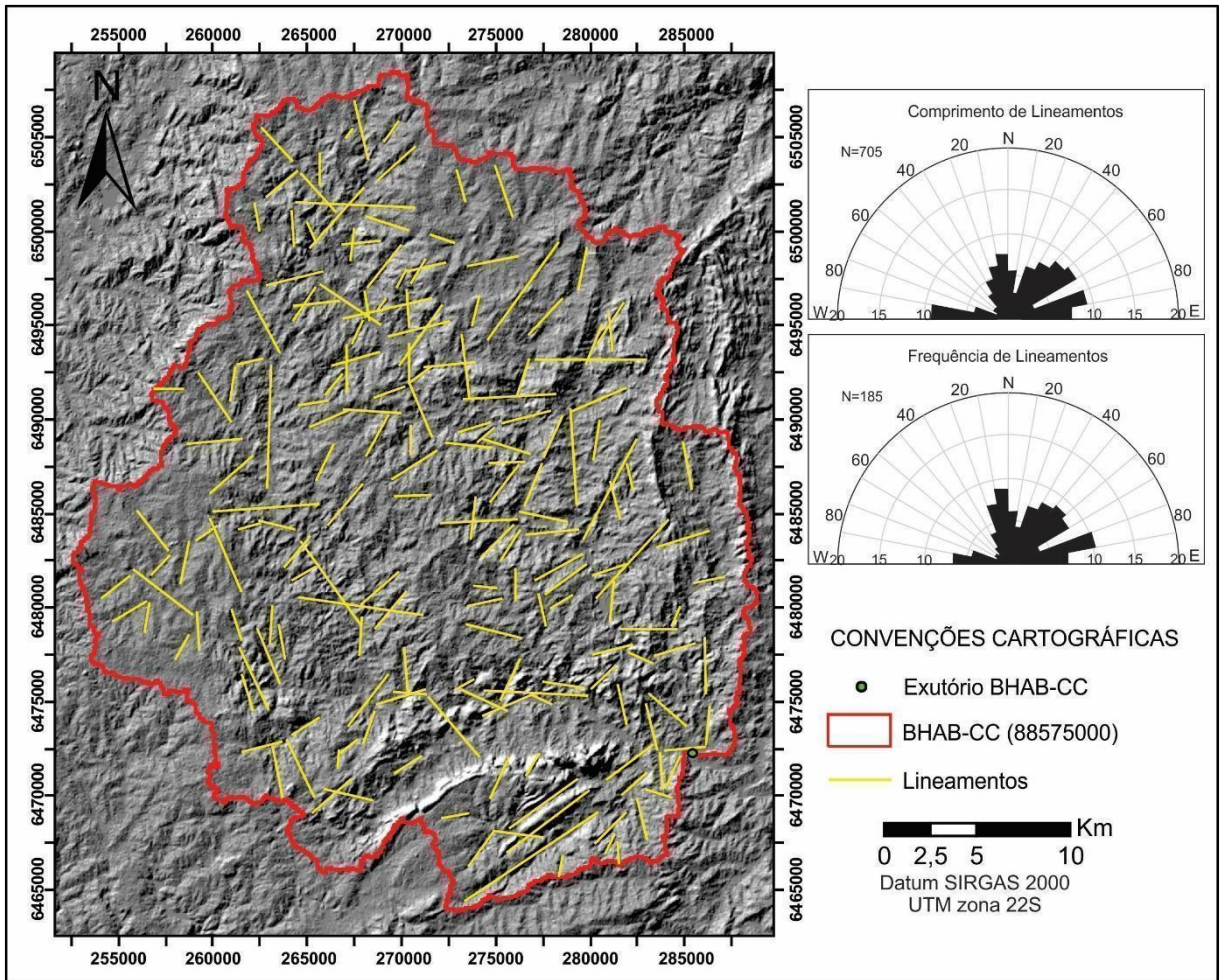


Figura 24: Mapa de lineamentos e diagramas de rosetas de frequência e comprimento dos lineamentos da bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato.

Na BHAB-CC destacam-se as direções N30-60E, também as direções N80E e N10W como direções principais dos lineamentos e essas direções são coincidentes com os maiores comprimentos. Além dessas, há uma família de lineamentos com direção leste-oeste que se destaca entre os maiores comprimentos. A bacia apresenta uma variação maior nas direções preferenciais dos lineamentos do que em relação à BHAF-PC. As drenagens principais ocorrem preferencialmente na direção NW-SE, com fluxo para sul e estão localizadas na região central da bacia (Figura 24). O relevo da BHAB-CC apresenta serras e vales escavados em um formato curvo extremo SE. Há também serras destacadas com direção N-S, presentes principalmente na região leste da bacia.

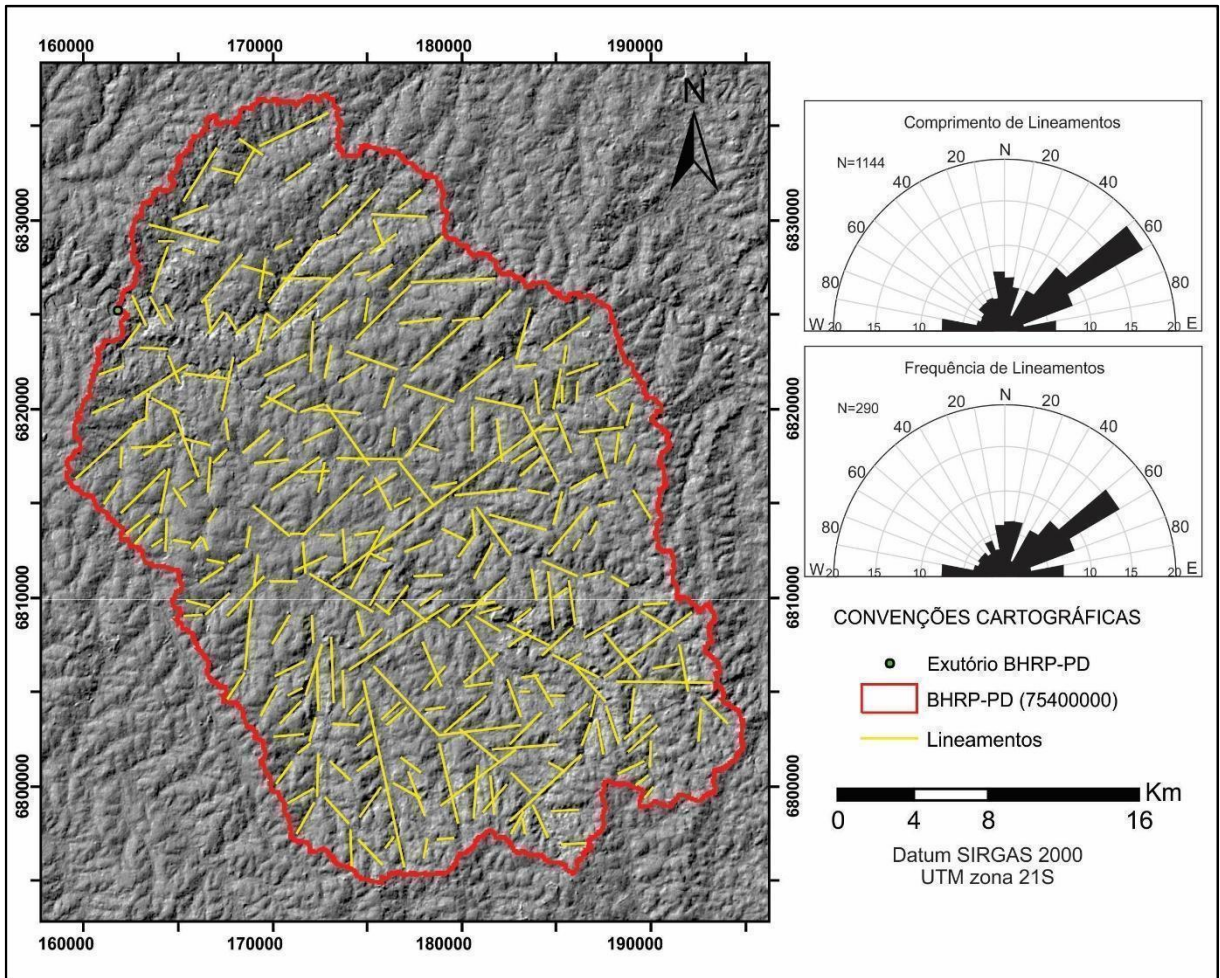


Figura 25: Mapa de lineamentos e diagramas de rosetas de frequência e comprimento dos lineamentos da bacia hidrográfica do rio Piratinim – estação Passo dos Dias.

Os lineamentos presentes na área da BHRP-PD, apresentam uma família principal de direção N60E e uma família subordinada com direção variando entre N50E a N70E e alguns poucos lineamentos praticamente leste-oeste. Os comprimentos seguiram a mesma orientação da frequência, sendo a direção N60E a que apresenta os maiores comprimentos e as direções N50E e N70E na sequência. As drenagens principais apresentam direções preferenciais NW-SE com fluxo para norte. A bacia apresenta um relevo mais acidentado, com presença de vales escavados próximos ao exutório, seguindo as orientações dos lineamentos ali presentes.

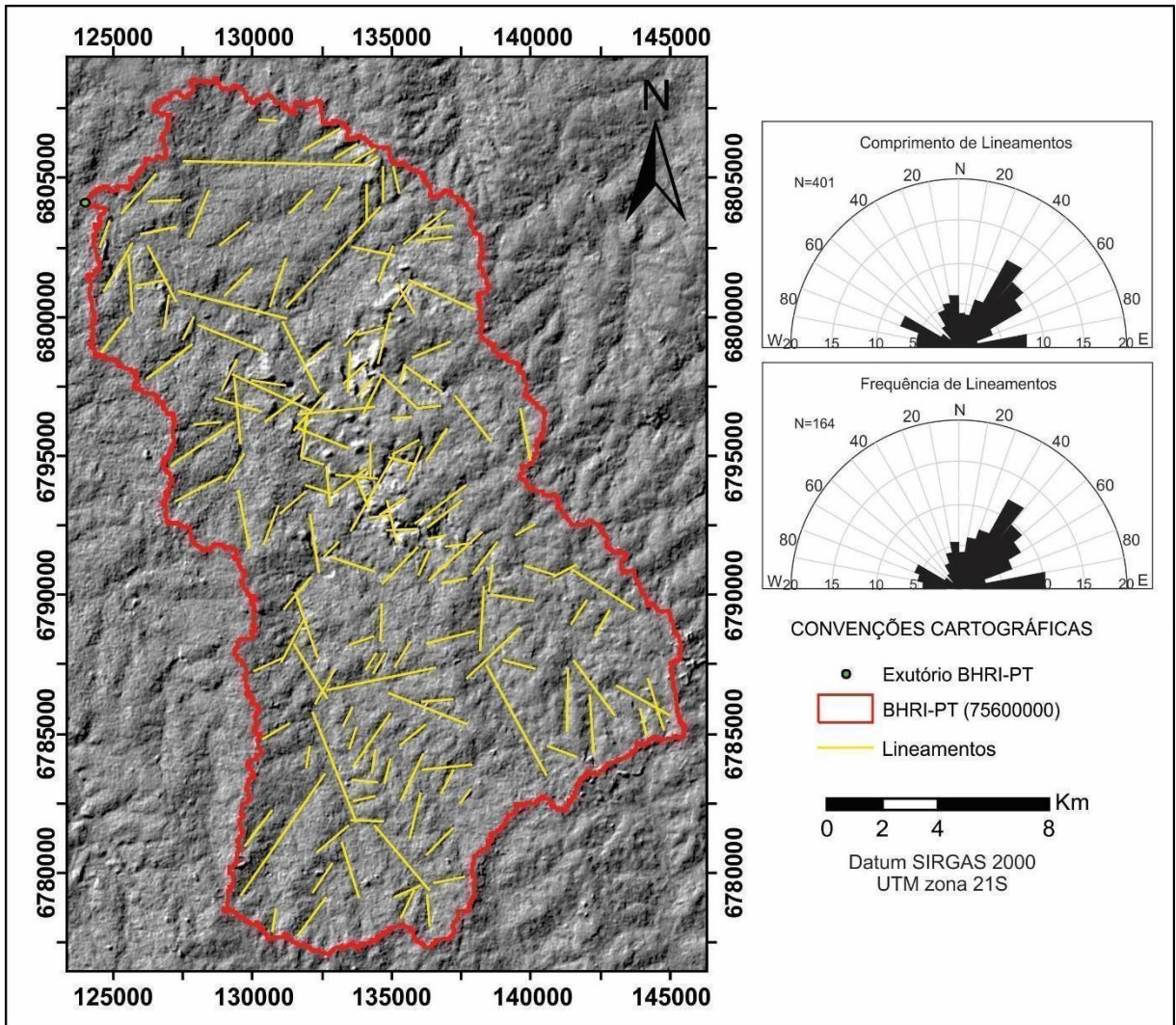


Figura 26: Mapa de lineamentos e diagramas de rosetas de frequência e comprimento dos lineamentos da bacia hidrográfica do rio Icamagua – estação Passo da Turma.

Em relação às direções preferenciais, os lineamentos da BHRI-PT que se destacam são N40-60E e, subordinada a ela, a direção N70W e alguns lineamentos em direção praticamente leste-oeste aparecem. A roseta de comprimento dos lineamentos acompanha a de frequência, sendo as famílias de lineamentos com direções em destaque, aquelas que apresentam os maiores comprimentos. Os cursos d'água principais desta bacia apresentam direção preferencial NW-SE, com fluxo para norte. Observa-se que a bacia apresenta um relevo menos dissecado do que as outras deste estudo, concentrando os lineamentos principalmente na porção mais central da bacia, enquanto as demais apresentam uma distribuição mais homogênea. Nessa região central também é possível notar vales dissecados controlados pelas direções dos lineamentos.

Ainda sobre a fotointerpretação dos lineamentos, a localização dessas estruturas apresenta um relacionamento com as fontes de recarga (FEITOSA et al., 2008). A disposição dos lineamentos na área de uma bacia, permitem a definição de áreas relevantes, como áreas de recarga e de potencial hidrogeológico. O uso de fotointerpretação em estudos hidrogeológicos consiste em uma importante ferramenta, destacando-se as vantagens da otimização de tempo e recursos em análises de grandes áreas, gerando resultados orientativos e de importância fundamental para o direcionamento de estudos de detalhe (FEITOSA et al., 2008).

Através de sistemas de informações geográficas, os produtos gerados permitem uma análise integrada entre diferentes aspectos, como rede de drenagem, lineamentos, pontos de água e mapas temáticos, admitindo resultados mais completos e comparativos (FEITOSA et al., 2008). Sendo os lineamentos estruturas de grande relevância hidrodinâmica nos domínios fraturados, áreas com maior densidade de lineamentos são relevantes para favorecimento de uma área como sendo de recarga ou de descarga. Áreas de alta densidade de lineamentos localizadas próximas aos cursos d'água, favorecem a contribuição do escoamento de base.

A Figura 27 exhibe mapas de densidade de lineamentos, destacando as regiões com maiores e menores concentrações dos lineamentos nas duas bacias situadas na região do Escudo Sul-rio-grandense (BHAF-PC e BHAB-CC), enquanto que a Figura 28 apresenta mapas de densidade de lineamentos para as bacias situadas na região do Planalto Setentrional (BHRP-PD e BHRI-PT).

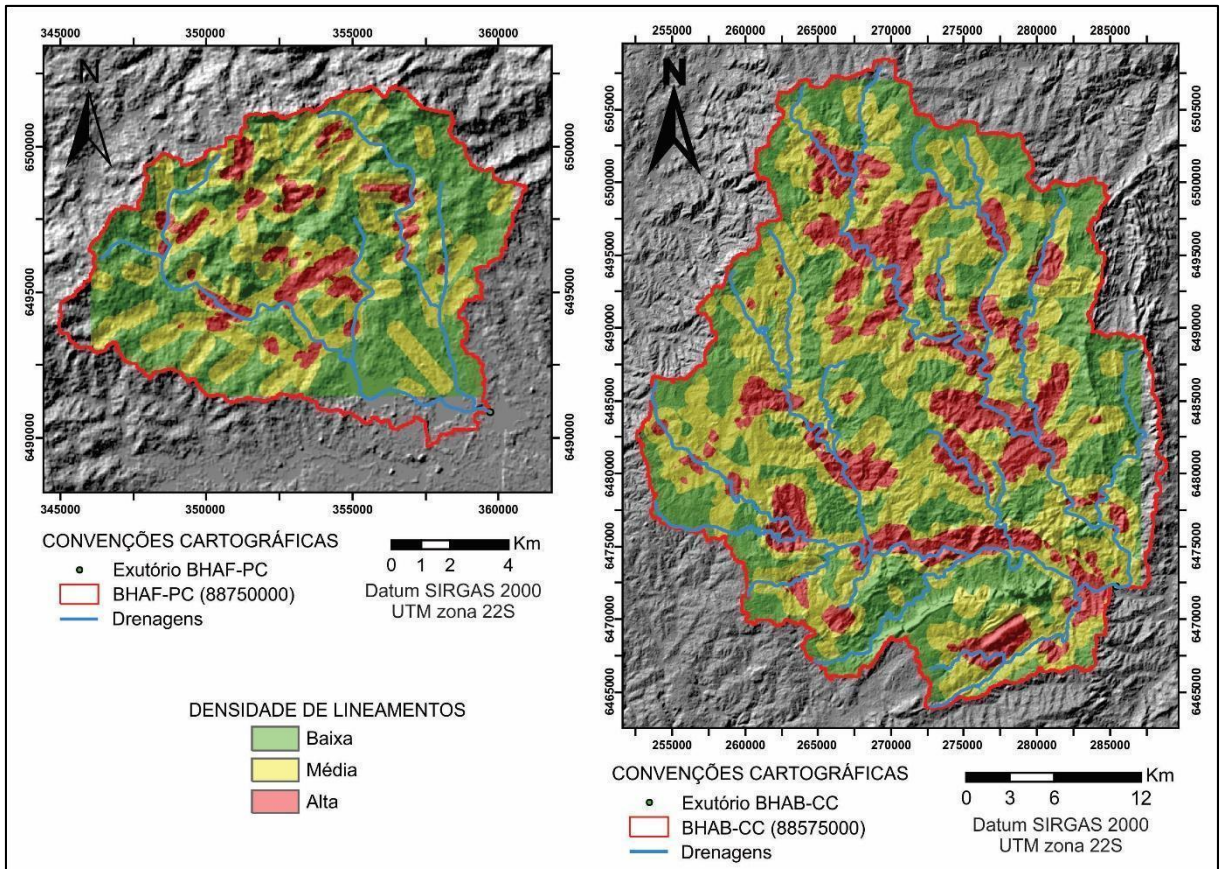


Figura 27: Mapas de densidade de lineamentos da bacia hidrográfica do arroio Fragata-estação Passo dos Carros e da bacia hidrográfica do arroio Basílio – estação Cerro Chato.

O mapa de densidade de lineamentos da BAHF-PC (Figura 27), evidencia que as áreas com alta densidade se encontram principalmente nas áreas mais centrais e nem sempre associadas aos cursos d'água principais. A BHAB-CC apresenta áreas de altas densidades de lineamentos distribuídas principalmente nas proximidades dos cursos d'água principais.

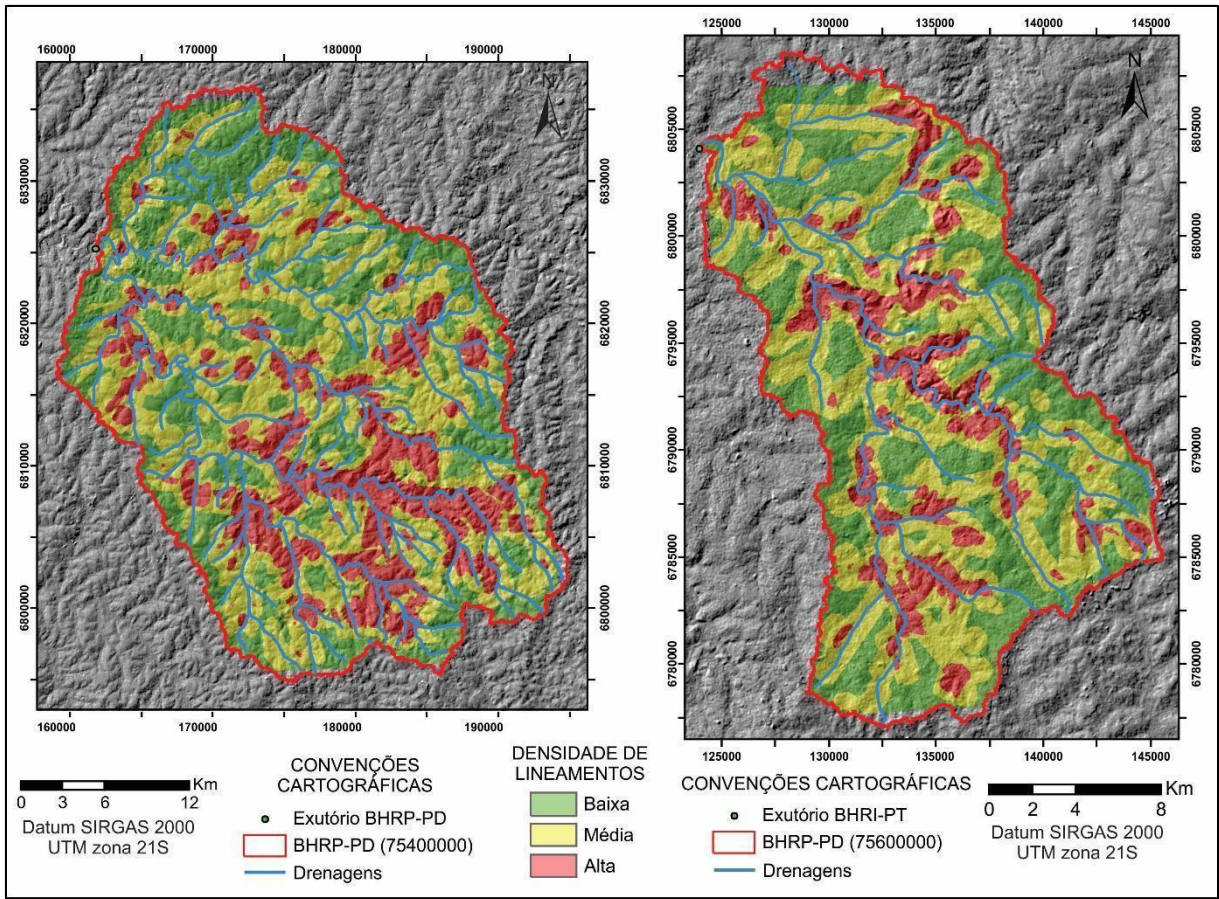


Figura 28: Mapas de densidade de lineamentos da bacia hidrográfica do rio Piratinim- estação Passo dos Dias e da bacia hidrográfica do rio Icamauá - estação Passo da Turma.

Comparando os mapas da Figura 28, é possível verificar que a BHRP-PD apresenta áreas classificadas como de alta densidade de lineamentos distribuídos principalmente na região da cabeceira da bacia, enquanto que a BHRI-PT essas áreas se concentram na região central da bacia, relacionadas com as áreas de relevo dissecado, onde se localizam os principais cursos d'água.

Com o objetivo de facilitar a correlação entre as principais características já descritas em tópicos anteriores, de acordo com o contexto geológico, hidrogeológico e em relação aos lineamentos em cada uma das bacias, a Tabela 9 expõe uma síntese dessas propriedades.

Tabela 9: Síntese descritiva das características geológicas, hidrogeológicas e dos lineamentos de cada uma das bacias do estudo. As informações completas de geologia e hidrogeologia estão disponíveis no item “3.4. Caracterização fisiográfica” deste estudo. As informações dos lineamentos estão disponíveis no item “4.1. Resultados”.

BACIAS	BHAF-PC	BHAB-CC	BHRP-PD	BHRI-PT
Geologia	Principalmente rochas granitóides e corpos com textura porfírica média a grossa	Principalmente rochas graníticas e riolitos	Principalmente basaltos e diabásios e menor área de conglomerados e arenitos	Principalmente basaltos e diabásios, seguido por riolitos, riodacitos e dacitos e menor área de conglomerados e arenitos
Hidrogeologia	Aquíferos fraturados de baixa possibilidade de água subterrânea	Aquíferos fraturados de média possibilidade de água e aquíferos praticamente improdutivos	Aquíferos fraturados com média a alta possibilidade de água subterrânea	Aquíferos fraturados com variada possibilidade de água subterrânea
Lineamentos (comprimento e frequência)	N50E e N10W direções principais e maiores comprimentos	N30-60E, N10W e E-O, direções principais e maiores comprimentos	N60E como maiores comprimentos e direção principal	N40-60E como direções principais e maiores comprimentos

4.2. Discussões

Neste capítulo serão apresentadas as discussões dos resultados da aplicação do filtro de Eckhardt (2005) nas bacias estudadas, os parâmetros necessários para aplicação do filtro (coeficiente de recessão e BF_{Imax}) e contribuição do escoamento de base na vazão total do curso d'água. Por fim, os resultados hidrológicos serão discutidos e comparados em conjunto com as informações e resultados geológicos, hidrogeológicos e estruturais.

O coeficiente de recessão

Um dos parâmetros necessários para a aplicação do filtro de Eckhardt (2005) é o coeficiente de recessão, que pode variar entre maior que 0 (zero) e menor que 1 (um), em que 1 significa que a diminuição da vazão do curso d'água no tempo durante o período de recessão é lenta. Quando as constantes de recessão (Tabela 5) são comparadas com o comportamento de decaimento das vazões nos hidrogramas (Figura 16 a-d), observa-se que o coeficiente de recessão está relacionado à inclinação da reta que caracteriza o comportamento das vazões no período de recessão.

Neste estudo, as bacias BHRP-PD e BHRI-PT, localizadas no Planalto Setentrional apresentaram os maiores valores (0,981 e 0,983 respectivamente). Já as bacias localizadas na região do Escudo Sul-rio-grandense apresentaram os menores resultados para o coeficiente de recessão (BHAF-PC = 0,913; BHAB-CC = 0,944). Com base nesses resultados, é possível sugerir que as bacias do Escudo Sul-rio-grandense apresentam uma menor regularização das vazões, apresentando um decaimento mais acelerado, em comparação com as bacias do Planalto Setentrional. No entanto, esse comportamento deve ser estudado em mais bacias hidrográficas a fim de se confirmar essa avaliação de uma maneira mais abrangente.

A interpretação do comportamento dos períodos de recessão em um hidrograma pode ser realizada de pelo menos duas formas. Uma delas considera que o comportamento da recessão é característico do aquífero (ECKHARDT, 2005) e que não há significativa variação entre os diversos períodos de recessão na série histórica (MATTIUZI, 2013). Já estudos como o de Sujono; Shikasho; Hiramatsu (2004) indicam que há uma alta variabilidade no comportamento de recessão. Os autores indicam a construção da curva mestre de recessão (MRC) através do ajuste de vários segmentos de recessão do hidrograma.

Neste estudo apenas a primeira hipótese foi admitida, escolhendo apenas um período de recessão para a determinação do coeficiente de recessão para cada uma das bacias. Cabe ressaltar que, para o cálculo do coeficiente de recessão, a escolha do período da série histórica é importante, principalmente no filtro inverso desenvolvido por Collischonn; Fan (2013), tendo em vista que a constante é utilizada para a determinação de BFI_{max} (equação 7), que posteriormente é utilizado no filtro digital de Eckhardt (2005) (equação 4).

As vazões características

As vazões características Q₉₀ e Q₅₀ são necessárias para o cálculo de BFI_{max} segundo a Proposta 3. A vazão Q₉₀ é tradicionalmente empregada como um indicador de vazões mínimas do curso d'água e está relacionada com a contribuição do escoamento de base, enquanto a Q₅₀ é a mediana das vazões de um curso d'água. Valores próximos de 1 para a relação entre Q₉₀ e Q₅₀ indicam que o curso d'água mantém uma regularidade nas vazões e maior potencial de armazenamento do aquífero, enquanto que, quanto menor a relação, maior a variação nas vazões do curso d'água e menor potencial de armazenamento do aquífero.

As vazões características da bacia hidrográfica BHAF-PC apresentaram os menores valores, o que pode ser explicado por se tratar de uma bacia hidrográfica pequena comparada às demais. Entretanto, esta não foi a bacia com o menor resultado de Q90/Q50 que foi observado na bacia BHRI-PT. Esses resultados vão ao encontro à suposição de que quando se divide as duas vazões características, elimina-se o efeito da área da bacia (SMAKHTIN, 2001).

O parâmetro BFI_{max}

O BFI_{max} retrata a relação máxima entre o escoamento de base, relacionado com a contribuição do aquífero, e o total (ECKHARDT, 2012). O parâmetro pode variar entre 0 (zero) e 1 (um) e quanto maior o valor, maior a contribuição do escoamento de base, ou seja, da descarga do aquífero, no escoamento total. Neste estudo foram avaliadas três propostas de determinação de BFI_{max}, em duas etapas. A primeira etapa avaliou os resultados de BFI_{max} calculados utilizando toda a série histórica de dados de vazão, enquanto apenas o período entre os anos de 2010 e 2015 foi considerado na etapa 2.

Nas duas etapas, a Proposta 1, com valores fixos propostos por Eckhardt (2005), apresentou os menores valores entre as três propostas, exceto pela BHRI-PT, que apresentou BFI_{max} menor para a Proposta 2, utilizando o filtro inverso (Tabela 5 e 7). Essa diferença entre os valores propostos por Eckhardt (2005) e outras metodologias de determinação do BFI_{max} também foi identificada em outros estudos (LIM et al., 2010; BORTOLIN et al., 2018; BATISTA, 2019). Ao analisar 15 bacias hidrográficas, Collischonn; Fan (2013) identificaram que apenas uma apresentou valor de BFI_{max} estimado através do filtro inverso coincidente com o proposto por Eckhardt (2005).

Neste estudo, com base nas observações dos hidrogramas e dos escoamentos de base (Figuras 18 a 21), foi observado que os valores de escoamento de base de acordo com a Proposta 1 ficaram abaixo das vazões observadas em períodos de recessão. Tendo em vista que uma das premissas do método é que nesses períodos há somente contribuição do escoamento de base, indica uma subestimação do escoamento de base em todas as bacias. Esses resultados vão de encontro aos encontrados por outros autores (COLLISCHONN; FAN, 2013; BORTOLIN et al., 2018; BATISTA, 2019).

Com base nos resultados deste e de outros estudos, é possível observar que as características individuais de cada bacia podem contribuir para a correta estimativa de BFI_{max}. Nesse sentido, os valores fixos estabelecidos por Eckhardt (2005) em bacias hidrográficas nos EUA e na Alemanha podem não representar o valor de escoamento de base coerente para bacias hidrográficas brasileiras.

A Proposta 2 apresentou valores de BFI_{max} iguais para duas das bacias analisadas em distintos contextos geológicos e hidrogeológicos, e valores distintos para as demais (Tabela 5). As bacias que obtiveram valores iguais, são a BHAB-CC, localizada no sistema aquífero do embasamento cristalino, e a BHRP-PD, localizada no sistema Serra Geral. Essa variação também foi encontrada em bacias hidrográficas localizadas no mesmo sistema aquífero do Serra Geral (BORTOLIN et al., 2018). Esses resultados confirmam que não devem ser indicados valores pré-definidos de BFI_{max} para grupos de bacias hidrográficas de acordo com apenas algumas características, como por exemplo o tipo de aquífero.

Quando comparados os resultados de Bortolin et al. (2018) para as bacias coincidentes (BHRI-PT e BHRP-PD) e as metodologias utilizadas neste estudo, os resultados foram levemente diferentes. Este contraste pode estar relacionado com a diferença entre as constantes de recessão utilizadas na determinação do BFI_{max}, seguindo a metodologia do filtro inverso, uma vez que nesse estudo foram utilizados valores superiores. Os resultados estão de acordo com a sugestão de que o coeficiente de recessão possui significativa influência da determinação nos resultados de BFI_{max}.

De acordo com a Proposta 3, os valores de BFI_{max} foram semelhantes para as quatro bacias deste estudo (Tabela 5). As duas bacias localizadas no sistema aquífero Serra Geral (BHRP-PD e BHRI-PT) produziram o maior e o menor resultados, respectivamente. Isso indica que pode não haver uma conexão direta entre caracterização hidrogeológica das bacias e os resultados da relação entre as vazões características Q₉₀ e Q₅₀ e, conseqüentemente, com os valores de BFI_{max}.

Os valores de BFI_{max} encontrados neste estudo são inferiores àqueles encontrados por Bortolin et al. (2018) para as duas bacias coincidentes com este estudo. Essa diferença deve estar relacionada aos ajustes das constantes na equação (9) proposta por Collischonn; Fan (2013), sabendo que Bortolin et al. (2018) utilizou apenas a relação Q₉₀/Q₅₀ para determinar os valores de BFI_{max}.

Os valores de BFI_{max} calculados com o período de 2010 a 2015 seguem uma tendência semelhante aos calculados para a série histórica completa (Figura 17 a-c), assim como a relação Q90/Q50, com algumas diferenças discutidas a seguir.

Na Proposta 1, os resultados de BFI_{max} (Tabela 7) foram iguais aos obtidos quando da análise de toda a série histórica (Tabela 5), assim como entre as bacias (BFI_{max} = 0,25). Essa equivalência ocorre em função da metodologia, que utiliza valores fixos para todos os aquíferos fraturados com rios perenes, independentemente do tamanho da série histórica. Na Proposta 2 foi observado um leve incremento de BFI_{max} quando utilizado o período de 2010-2015, conforme pode ser comparado na Figura 17 (a-c). A BHAF-PC aumentou BFI_{max} de 0,49 para 0,50; ao passo que a BHAB-CC e a BHRP-PD aumentaram BFI_{max} de 0,38 para 0,43; A BHRI-PT diminuiu BFI_{max} de 0,14 para 0,13. Na Proposta 3 os valores foram variáveis, as BHAF-PC e BHRP-PD diminuíram o BFI_{max} em 0,02 (BFI_{max} = 0,42 para 0,40 e BFI_{max} = 0,43 para 0,41 respectivamente). Já para a BHAB-CC e a BHRI-PT houve um incremento nos valores de BFI_{max}. O BFI_{max} da BHAB-CC aumentou de 0,38 para 0,40 e da BHRI-PT aumentou de 0,35 para 0,42. Neste estudo não foram identificadas significativas alterações nos valores de BFI_{max} calculados através da série histórica completa ou apenas um trecho.

Eckhardt (2005) utilizou séries históricas curtas (2 a 3 anos) em seu estudo para o desenvolvimento do filtro digital e das propostas de BFI_{max}. Enquanto diversos outros autores que aplicaram o filtro digital recursivo para a avaliação do método e das propostas para a determinação do parâmetro BFI_{max}, utilizaram séries históricas longas, com mais de 10 anos de dados e em alguns casos com até 70 anos (LI et al., 2014; CORREA; MELLO, 2014; MATIUZZI et al., 2015; BORTOLIN; REGINATO, 2018; BORTOLIN et al., 2018; BATISTA, 2019). Não há aparente consenso entre autores com relação ao tamanho das séries históricas, não sendo identificados trabalhos discutindo esta abordagem.

A relação entre os resultados encontrados para o parâmetro BFI_{max} e o tamanho das bacias também deve ser considerada. A BHAF-PC, por exemplo, possui uma área pequena de apenas 125 km², e apresentou o maior resultado de BFI_{max}. Apesar de não ter sido identificado outros estudos que discutem a relação entre BFI_{max} e área da bacia, este resultado pode sugerir que a variação de nível d'água em bacias menores é maior, confirmado pelos valores baixos de coeficiente de recessão entre todas as bacias estudadas. Em bacias pequenas, também pode haver

influência do tempo de resposta, ou seja, apresentar respostas mais rápidas aos eventos de precipitação que podem não estar representados quando trabalhamos com dados diários de vazão.

Aplicação do filtro digital recursivo de Eckhardt

Quando comparados os métodos gráficos e de filtros digitais para separação de escoamento de base em 1815 bacias, o filtro de Eckhardt (2005) apresentou melhor desempenho utilizando a proposta do filtro inverso para definição do BFI_{max} (XIE et al., 2020). O filtro demonstrou representar o cenário hidrológico com mais coerência em 1145 bacias. Apesar dos resultados positivos, Xie et al. (2020) sugerem a necessidade de incluir dados hidroclimáticos para a estimação do escoamento de base, testes incorporando métodos não lineares para recessão e estimativas precisas de recarga, entre outros (XIE et al., 2020).

O filtro digital proposto por Eckhardt (2005) não necessita de programa específico ou diversidade de dados de entrada para sua aplicação. Por se tratar de um método indireto e considerando ser bastante difícil obter dados precisos do escoamento de base, o método tem mostrado bons resultados (BATISTA, 2019).

Sobre os parâmetros utilizados no filtro, Eckhardt (2005) concluiu que o BFI_{max} exerce mais influência nos resultados do escoamento de base do que o coeficiente de recessão, portanto a escolha do período pode representar diferenças menos significativas nos resultados de escoamento de base. No entanto, a avaliação da sensibilidade do filtro de Eckhardt (2005) utilizando o filtro inverso de Collischonn; Fan (2013) deve ser realizado para verificar a intensidade dessa influência.

Lâmina e parcela de contribuição do escoamento de base

A lâmina do escoamento de base média é verificada a partir da determinação das vazões de escoamento de base calculadas em cada uma das propostas avaliadas em relação às áreas de cada bacia. Esse valor apresenta informações de volume de água relacionado com o escoamento de base em cada bacia. A partir dos valores de lâmina do escoamento de base e, associando valores de precipitação e evapotranspiração, é possível determinar o volume de água retido nos aquíferos (armazenamento).

A BHAF-PC apresentou o maior valor de lâmina de escoamento de base médio para a Proposta 2 (328,5mm ano⁻¹), seguida pelas BHRP-PD (306,8mm ano⁻¹) e a BHAB-CC (253,2mm ano⁻¹). Mesmo as BHAB-CC e BHRP-PD apresentando valores

de BFI_{max} semelhantes, os valores em lâmina foram diferentes. Esse comportamento está relacionado com valores de vazão e com as áreas das bacias, onde a BHRP-PD apresenta valor médio de vazão maior que a BHAB-CC e área menor entre as duas bacias. A BHRI-PT apresentou o menor valor de lâmina para a Proposta 2 entre as quatro bacias (155,3mm ano⁻¹).

A parcela de contribuição do escoamento de base na vazão total traz informações de qual a descarga do aquífero para o curso d'água. Essa contribuição foi calculada para cada uma das bacias estudadas, em cada uma das propostas (Tabela 6 e 8). No geral, os valores variam proporcionalmente aos valores de BFI_{max} (Tabela 5 e 7). Apenas a BHRI-PT apresentou contribuição do escoamento de base menor nas três propostas. Essa diferença na contribuição do escoamento poderia estar relacionada com a influência do coeficiente de recessão e do BFI_{max} no método de separação do escoamento. No entanto, de acordo com a Tabela 5, os valores do coeficiente de recessão são praticamente iguais para a BHRI-PT e a BHRP-PD, e mesmo na Proposta 1, com valores iguais de BFI_{max}, as bacias apresentaram valores de contribuição de escoamento de base diferentes. Essa diferença no comportamento da contribuição do escoamento de base para a BHRI-PT pode ocorrer devido a uma característica particular nesta bacia, atribuindo maior contribuição do escoamento superficial. Por ser um método que utiliza apenas dados de vazões, contribuições como lançamento de efluentes e reservatórios artificiais à montante da estação de monitoramento, podem influenciar nos resultados do escoamento de base (SOUZA, 2015). Os resultados de contribuição do escoamento de base encontrados para as propostas 2 e 3, seguem a tendência do BFI_{max} para as demais bacias.

Na BHAF-PC, a separação dos escoamentos através do método do balanço hídrico propostas para o modelo LASH (Lavras Simulation of Hydrology) encontrou valores de 33% para contribuição do escoamento de base e subsuperficial juntos (CALDEIRA, 2016). Apesar de que os períodos das séries históricas serem levemente diferentes (Tabela 6), os resultados entre os dois estudos podem ser considerados próximos e confirmam que a bacia tem maior contribuição de escoamento superficial.

Os hidrogramas (Figuras 18-21) são complementados pelos resultados do escoamento de base em cada uma das propostas, para cada bacia estudada. É possível verificar que a Proposta 1 produz resultados de escoamento de base inferiores às vazões observadas, mesmo em períodos de recessão. Uma vez que, a metodologia considera que o período de recessão apresenta valores de vazão sem

contribuição superficial, apenas contribuição do escoamento de base, isso indica que há uma subestimação do escoamento de base. Essa resposta inferior está relacionada com o valor de BFI_{max}, que não incorpora características específicas de cada bacia.

As propostas 2 e 3 apresentaram resultados de escoamento de base bem próximos para as quatro bacias e se mostraram mais ajustados aos hidrogramas, quando observados os períodos de recessão. Essa relação indica um bom ajuste dos métodos. De acordo com Bortolin et al. (2018), o método do filtro inverso foi mais adequado, produzindo resultados de escoamento de base mais próximos aos valores de vazão observados em períodos de recessão. Essa consideração também é válida para os resultados encontrados na Proposta 2.

Utilizando a metodologia das vazões características, aqui chamado de Proposta 3, Batista (2019) avaliou os resultados de BFI_{max} e concluiu que este método apresentou menor grau de incerteza entre os demais. Da mesma forma, neste estudo, a Proposta 3 produziu bom ajuste para o hidrograma de escoamento de base no hidrograma observado.

A Proposta 3 é um modelo que utiliza a relação entre Q_{90}/Q_{50} (equação 9) ajustada de acordo com os dados de apenas 15 bacias hidrográficas brasileiras, e sob domínio de aquíferos fraturados e porosos. Essa indiferenciação entre as bacias dominadas por aquíferos com comportamentos hidrodinâmicos diferentes pode gerar imprecisões na construção do modelo. Testes em outras bacias hidrográficas devem ser continuados a fim de se refinar o ajuste da equação para talvez ser mais representativos (COLLISCHONN; FAN, 2013). Neste estudo foi utilizado esse modelo seguindo a recomendação dos autores de ser utilizado em bacias do sul e centro-oeste brasileiro, admitindo ser correto o uso em bacias sob domínio de aquíferos fraturados.

As conclusões divergentes entre os autores Bortolin et al. (2018), que consideram a metodologia do filtro inverso como o mais adequado, e Batista (2019), que considera o método das vazões características como mais adequada, entre outras diferenças, reforçam a ideia de que mais estudos devem ser conduzidos para o melhor aperfeiçoamento das metodologias, tendo em vista que, apesar de serem de fácil utilização, são métodos indiretos e apresentam incertezas. No caso deste estudo, analisando visualmente os hidrogramas e o escoamento de base, as propostas 2 e 3 apresentaram resultados semelhantes entre eles, para cada uma das bacias

estudadas, enquanto que a Proposta 1 subestimou o escoamento de base. Apesar disso, os resultados dos parâmetros BFI_{max} e coeficiente de recessão e da contribuição do escoamento de base, variaram entre as bacias, mesmo entre aquelas localizadas no mesmo domínio hidrogeológico.

Outro ponto importante a ser observado diz respeito ao intervalo de tempo das observações, no caso deste estudo, foram dados diários de vazão. A bacia hidrográfica do arroio Fragata – estação Passo dos Carros apresentou maior taxa de contribuição do escoamento de base na Proposta 2 (44,10%), seguido pela Proposta 3 (38,73%) e pela Proposta 1 (24,71%) e, como pode ser observado na Tabela 6, esses valores foram os maiores para cada proposta entre todas as bacias analisadas neste estudo quando analisada toda a série histórica disponível. Esse fato pode estar relacionado ao tamanho da bacia hidrográfica.

Quando se trabalha com bacias pequenas, pode haver uma superestimação do escoamento de base dependendo da discretização dos dados. Bacias menores apresentam tempo de concentração também menor, fazendo com que as vazões máximas de pico não sejam representadas caso essa discretização dos dados seja maior. Os resultados das contribuições do escoamento de base através de filtros também podem ser influenciados caso a bacia seja muito grande.

A forma da bacia também é um importante fator que influencia nas contribuições de escoamento superficial. Bacias com forma mais alongada (K_c maior que 1), são menos suscetíveis a enchentes, sendo difícil a ocorrência de chuvas intensas simultaneamente por toda a sua extensão (DE ALMEIDA et al., 2019). Sendo a BHRI-PT a bacia que apresenta a menor contribuição de escoamento de base entre as estudadas, ela também é a que apresenta maior coeficiente de compacidade ($K_c = 2,15$). A BHRI-PT também é a que apresenta o menor valor do fator de forma ($K_f = 0,45$). Quanto menor esse índice, menos probabilidade de haver enchentes nesta bacia no âmbito na análise de sua forma. Os dois índices morfométricos indicam que a BHRI-PT é menos propícia a ocorrência de enchentes. Bacias com essa característica apresentam uma distribuição maior do fluxo de água no tempo, concentrando de forma mais lenta em direção à foz, permitindo maior contribuição do escoamento superficial em relação ao escoamento total do curso d'água (DE ALMEIDA et al., 2019). Essa característica vai de encontro aos resultados de contribuição do escoamento de base para a BHRI-PT, indicando maior contribuição do escoamento superficial à esta bacia.

Aspectos geológicos, hidrogeológicos e estruturais

Em virtude da melhor correspondência dos resultados apresentados nas propostas 2 e 3, a Proposta 1 foi desconsiderada nesta discussão. Os aspectos geológicos serão discutidos de acordo com as propostas 2 e 3 e as respectivas contribuições de escoamento de base.

Em relação ao coeficiente de recessão, trata-se de um parâmetro que indica a intensidade com que há descarga das reservas do aquífero para os cursos d'água, sendo então característica do aquífero (COSTA; BACELLAR, 2010). Esse coeficiente pode representar o parâmetro condutividade hidráulica e até mesmo a porosidade do solo para aquíferos livres (SUJONO; SHIKASHO; HIRAMATSU, 2004).

Neste estudo, as bacias localizadas na região do Escudo Sul-rio-grandense apresentaram os menores resultados para o coeficiente de recessão ($BHAF-PC = 0,913$; $BHAB-CC = 0,944$). As bacias $BHRP-PD$ e $BHRI-PT$, localizadas no Planalto Setentrional apresentaram os maiores valores (0,981 e 0,983, respectivamente). Esses resultados podem indicar que os aquíferos livres das bacias analisadas da região do Escudo Sul-rio-grandense apresentam menor condutividade hidráulica do que aqueles localizados nas bacias analisadas da região do Planalto.

Para os valores de BF_{Imax} , neste estudo eles variaram para cada bacia, assim como os resultados de contribuição do escoamento de base. Esse comportamento também foi encontrado em outros estudos (COLLISCHONN; FAN, 2013; BORGES et al., 2017; MELATI; FAN; ATHAYDE, 2017; BORTOLIN et al., 2018). Do ponto de vista geológico e hidrogeológico, essa diferença pode ser justificada por vários fatores, como por exemplo as características geológicas e estruturais de cada bacia hidrográfica.

As rochas que compõem a área de uma bacia somadas à influência da tectônica na região são fatores determinantes para o fluxo de água em rochas cristalinas (FERNANDES, 2008). Em aquíferos fraturados, é necessário ainda que haja conexão entre as fraturas (Figura 4), permitindo o fluxo de água por entre o meio rochoso. Esse fluxo ainda depende de algumas características das fraturas, como a abertura (que exerce grande controle sobre a condutividade hidráulica), além das direções, persistência e densidade (FERNANDES, 2008). Sendo o escoamento de base relacionado à descarga do aquífero, essa capacidade do aquífero transferir água ao curso d'água pode ser maior ou menor dependendo dessas características.

As bacias avaliadas neste estudo estão localizadas em distintos contextos geológicos e estruturais. As BHAF-PC e BHAB-CC estão localizadas na região do Escudo Sul-rio-grandense, no Batólito Pelotas, e os processos ocorridos na região indicam um sistema tectônico compressivo ou transpressivo de idade pré-cambriana (PHILLIP; MACHADO, 2001). São descritos na região três sucessivos eventos deformacionais, sendo dois de natureza dúctil e somente o mais jovem, rúptil. O mais jovem ocorreu em nível mais raso e em condições extensionais apresentando orientação N20E a N50-65E (PHILLIP et al., 2002). Essa descrição coincide com as direções dos lineamentos marcados na área das bacias BHAF-PC e BHAB-CC (Figuras 23 e 24).

De acordo com o mapa de domínios hidrogeológicos do Rio Grande do Sul (CPRM, 2005), essas bacias se encontram sob domínio principal do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino I e II (Figura 12), considerado como de baixa possibilidade para água subterrânea. Através do conhecimento da circulação e acumulação de água em aquíferos fraturados, torna-se difícil estabelecer uma relação entre percolação e acumulação de água com estruturas dúcteis e de idade pré-cambriana (FEITOSA et al., 2008). Isso porque as estruturas mais antigas normalmente apresentam-se preenchidas ou afetadas por outros eventos geológicos, permanecendo poucos espaços vazios por onde a água possa percolar.

Sendo assim, nestes sistemas aquíferos do embasamento cristalino (ec1 e ec2), tanto a idade de formação das estruturas tectônicas, como a natureza por vezes dúctil, tendem a desfavorecer a circulação de água subterrânea. Neste contexto tectônico, os valores de contribuição do escoamento de base das BHAF-PC e BHAB-CC (valor máximo igual a 45,37%), foram coerentes com as características descritas, apresentando maior contribuição do escoamento superficial.

Nesse sentido, os resultados mostram que ambas as bacias, mesmo com tamanhos distintos, apresentam escoamento de base semelhante. Esse escoamento de base possivelmente está relacionado, entre outros fatores, com a recarga que ocorre através de lineamentos originados em um evento tectônico mais jovem, ou ainda formados por neotectônica e que precisam ser avaliados em novos estudos de detalhe.

Com relação aos aquíferos da Formação Serra Geral, cinco parâmetros são considerados fundamentais na análise de suas estruturas, como a densidade, orientação e comprimento dos lineamentos, além do grau de dissecação do relevo e

a espessura do solo (TAKAHASHI, 1993). De acordo com a variabilidade dessas características, diferenças locais entre os parâmetros podem representar distintas características hidráulicas de cada aquífero (TAKAHASHI, 1993).

As fraturas desenvolvidas na região do Planalto Setentrional foram formadas por tectônica distensiva de idade cretácica (BETIOLLO, 2006; CUNHA, 2014; JACQUES; MACHADO; NUMMER, 2015) o que, somadas às características geológicas da Formação Serra Geral, tendem a favorecer a circulação de água.

Lineamentos com direções N30-40E e N60-70E são indicados como as principais estruturas regionais presentes na Formação Serra Geral (FREITAS, 2005). Estudo das características estruturais da Formação Serra Geral no estado de Santa Catarina indica três eventos deformacionais, o primeiro com orientação N-S, mais antigo, o segundo NE-SW e um terceiro de direção E-W, sendo este o mais jovem (JACQUES; MACHADO; NUMMER, 2015). As bacias deste estudo apresentaram lineamentos de direções principais pertencentes aos dois últimos eventos deformacionais.

Os aquíferos classificados como pertencentes ao Sistema Aquífero Serra Geral, são descritos como descontínuos, formados por segmentos independentes, podendo apresentar variadas condições de capacidade específica e produtividade de poços. O potencial de produção dos aquíferos está relacionado não apenas com a direção dos lineamentos, mas também com o comprimento (BETIOLLO, 2006; CUNHA et al., 2011). Lineamentos de médio porte, entre 10 km e 100 km, principalmente de direção NW são considerados indicadores de produtividade (BETIOLLO, 2006). Da mesma forma, lineamentos de pequeno e médio porte de direções NE-E e NW-W são relacionados com os poços mais produtivos, e os de direções N-NE e N-NW estão relacionados com poços de baixa produção (CUNHA et al., 2014). As bacias deste estudo, localizadas na região pertencente ao Sistema Aquífero Serra Geral, apresentam lineamentos de pequeno e médio porte, com os principais comprimentos nas direções N40-60E e E-W (Figuras 25 e 26), indicando que podem apresentar boa possibilidade de água subterrânea, segundo Cunha et al. (2014).

Conforme os estudos destacaram, apenas as direções preferenciais dos lineamentos não indicam uma relação direta com a produtividade dos aquíferos. É necessário que haja uma caracterização mais detalhada das condições das fraturas e estruturas que fazem parte da área da bacia e que condicionam o fluxo da água

subterrânea. Essa caracterização das condições das fraturas, pode revelar grau de abertura, preenchimento, persistência e conectividade, além de outras características estruturais, conforme exemplificado nas Figuras 5 e 6.

Aquíferos Sistema Aquífero Serra Geral são formados por porosidade primária e secundária. A presença de estruturas de origem primária e o contato entre os derrames tabulares formam camadas horizontais com características distintas (Figura 6). Essas estruturas contribuem para o escoamento de base (BETIOLLO, 2006), dependendo do grau de entalhe dos rios (Figura 7). Cabe ressaltar que esse é um contexto distinto do encontrado nas rochas graníticas do Sistema Aquífero Embasamento Cristalino (Figura 5). O fluxo de água subterrânea em aquíferos vulcânicos, como os da região do Planalto Setentrional, ocorre principalmente na horizontal e secundariamente nas estruturas verticais, sendo essas as principais responsáveis por possibilitar a recarga e a mistura de águas entre diferentes derrames (ATHAYDE; ATHAYDE, 2016).

Neste estudo, a BHRP-PD e a BHRI-PT, localizadas na região do Planalto Setentrional, apresentaram as maiores diferenças nos resultados de contribuição do escoamento de base. A primeira apresentou valores acima de 33% de contribuição do escoamento de base, enquanto que a BHRI-PT apresentou próximos a 10% para a Proposta 2 e próximo a 20% para a Proposta 3. Essa bacia apresentou valores de contribuição de escoamento de base abaixo das demais, inclusive na Proposta 1, com o BFI_{max} pré-estabelecido. Ou seja, há indícios de que a BHRI-PT deve apresentar características diferentes das demais, como a localização das áreas com maiores densidades de lineamentos, o relevo menos acidentado, as características fisiográficas como a menor área, o alto coeficiente de compacidade e o baixo fator de forma, que, em conjunto são responsáveis por esses valores baixos de contribuição do escoamento de base.

A diferença em relação à contribuição do escoamento de base da BHRI-PT em relação às demais, também pode estar associada ao menor grau de entalhamento do curso d'água principal, indicando menor quantidade de derrames em suas vertentes contribuindo para o abastecimento do curso d'água. A análise da morfologia dos vales na Formação Serra Geral, demonstrou que existem dois tipos principais de vales em "V" profundos, aqueles sem planícies de inundação em que o leito dos rios normalmente é rochoso e os vales de fundo chato, aberto e plano com amplas áreas de inundação (SORDI et al., 2017). O primeiro tipo normalmente está associado a

estruturas verticais, enquanto que os vales de fundo chato estão associados a zonas de fraqueza horizontal, como contatos de derrames, que propiciam o alargamento dos vales. Nesse sentido, a morfologia dos vales pode condicionar maior ou menor contribuição de escoamento de base. Estudos detalhados da dissecação do relevo devem ser realizados a fim de avaliar essa característica nas bacias de interesse.

Quando consideradas as contribuições individuais de cada escoamento, há uma forte influência da geomorfologia na descarga do aquífero (MELATI; FAN; ATHAYDE, 2017). Essa influência indica maior contribuição do escoamento de base em regiões mais planas e com maiores áreas de drenagem, enquanto que o escoamento subsuperficial tem maior relevância quando em bacias com relevo mais acentuado (MELATI; FAN; ATHAYDE, 2017). Entre as duas bacias estudadas e localizadas na região do Planalto Setentrional, a BHRI-PT apresenta a menor área (377 Km²), enquanto que a BHRP-PD possui 933 Km². É possível verificar também, que a BHRI-PT (Figura 26) apresenta regiões menos acidentadas do que a BHRP-PD (Figura 25). As duas características vão de encontro às conclusões de Melati; Fan; Athayde (2017).

Com relação às duas bacias localizadas no Escudo Sul-rio-grandense (BHAF-PC e BHAB-CC), apresentam relevo acidentado, coerente com as características intempéricas das rochas graníticas presentes na região. Essa característica também é coerente com a conclusão de Melati; Fan; Athayde (2017).

Com a delimitação dos lineamentos presentes em cada bacia, é possível confeccionar os mapas de densidade de lineamentos. Esses mapas indicam áreas com alta, média e baixa concentração de lineamentos. Como apresentado anteriormente, para que haja fluxo de água subterrânea, é necessário que as fraturas e falhas sejam interconectadas (Figura 4). Portanto, áreas com maior densidade de lineamentos são mais propícias para que essas estruturas se interceptam, formando melhores condições de transmissividade e armazenamento ao aquífero (PINOTTI; CARNEIRO, 2013).

A densidade e distribuição dos lineamentos nas bacias localizadas no Sistema Aquífero Embasamento Cristalino (BHAF-PC e BHAB-CC) foram semelhantes. Os lineamentos estão distribuídos pela área da bacia, associados com os cursos d'água principais (Figura 27). Já para as bacias BHRI-PT e BHRP-PD, localizadas no Sistema Aquífero Serra Geral, houve uma diferenciação entre elas (Figura 28), principalmente na localização das áreas de maior densidade. Na BHRP-PD as áreas com alta

densidade de lineamentos são mais comuns na região da cabeceira da bacia, enquanto que a BHRI-PT apresenta uma concentração maior na área central. A distribuição mais localizada (BHRI-PT) possivelmente contribui para uma menor área de recarga do aquífero, ao passo que as regiões de cabeceiras são conhecidas áreas de recarga de aquíferos.

Considerando as quatro bacias estudadas, sendo todas dominadas por aquíferos fraturados, o filtro de Eckhardt (2005), quando utilizadas as propostas de determinação do parâmetro $BF_{I_{max}}$, apresenta resultados de separação de escoamento de base coerentes com os valores de vazão observada em períodos de recessão. As contribuições do escoamento de base foram diferenciadas para cada bacia, indicando que as características individuais como área, características das estruturas tectônicas e morfometria das bacias influenciam nas contribuições do fluxo de água subterrânea em aquíferos fraturados e, por consequência, a descarga do aquífero nos cursos d'água.

As informações sobre as características das estruturas tectônicas presentes nas bacias dominadas por aquíferos fraturados, como a idade de formação, as principais direções, seus comprimentos, além da localização das áreas de maior densidade de lineamentos se mostraram influentes na determinação do escoamento de base. Essas características condicionam o fluxo de água subterrânea e por consequência, a contribuição do escoamento de base na vazão dos rios, possibilitando maior ou menor descarga dos aquíferos.

5. CONCLUSÕES

Os filtros de separação de escoamento utilizam da relação entre a água subterrânea e a vazão do curso d'água de maneira indireta, sendo uma metodologia mais simples do que a implantação de poços de monitoramento em todo território. O filtro digital recursivo de Eckhardt (2005) é uma ferramenta prática e de fácil utilização, necessitando de apenas um conjunto de dados observados de vazão. Enquanto que em outras metodologias, são necessários vários dados para sua utilização, podendo inviabilizar o seu uso em algumas áreas por falta de dados. De acordo com a observação dos hidrogramas das Figuras 18 a 21, o comportamento do escoamento de base determinado através do filtro digital está coerente com o esperado, com diferença entre as propostas analisadas.

Apesar do coeficiente de recessão ser considerado característico do aquífero, a escolha do período de recessão para a determinação deste pode influenciar nos resultados do escoamento de base utilizando o filtro digital recursivo de Eckhardt (2005), principalmente quando o $BF_{I\max}$ é calculado pela proposta de filtro inverso (Proposta 2) desenvolvido por Collischonn; Fan (2013). O desenvolvimento de estudos nesta área é importante para o aprimoramento e evolução de propostas de cálculo deste parâmetro. Estudos sobre a curva mestre de recessão – MRC, e sobre o comportamento do decaimento das vazões, considerando a recessão de forma linear ou não-linear, devem ser trabalhados e testados na tentativa de aprimorar as metodologias.

Para as propostas de determinação do parâmetro $BF_{I\max}$ a ser utilizado no filtro digital recursivo, a Proposta 1 não incorpora particularidades físicas das bacias, como a classificação das rochas, as estruturas presentes nelas, a geomorfologia presente na região. Essas características exercem influência considerável nos aquíferos em relação à porosidade, permeabilidade e transmissividade. Sendo assim, esta Proposta apresentou valores estimados de escoamento de base inferiores, inclusive, dos valores de vazão observados em alguns períodos de recessão, indicando uma subestimação da contribuição do escoamento de base.

As propostas 2 e 3, utilizando propostas de determinação do parâmetro $BF_{I\max}$ desenvolvidos por Collischonn; Fan (2013), produziram valores estimados de escoamento de base próximos e ficaram bastante coerentes com as vazões observadas no hidrograma, principalmente em períodos de recessão, considerando

que nestes períodos há apenas contribuição do escoamento de base. As duas propostas são metodologias simples e práticas, não havendo necessidade de outros dados além da série de vazões observadas, já necessária para a utilização do filtro de Eckhardt (2005).

Não foram identificadas diferenças abruptas nos valores de $BF_{I_{max}}$ e nas taxas de contribuição do escoamento de base determinados tanto utilizando toda a série histórica de dados de vazão (~40 anos), quanto utilizando apenas um período da série histórica (entre 2010 e 2015). Mais estudos utilizando diferentes períodos de séries históricas devem ser realizados a fim de verificar se realmente há, ou não, uma influência significativa nos resultados de escoamento de base, dependendo do período da série utilizada nos métodos.

As características geológicas das bacias são muito importantes no que diz respeito ao comportamento hidrogeológico de um aquífero e por consequência, na disponibilização ou não de água do aquífero aos cursos d'água. A Proposta 2, por ser uma metodologia que utiliza o próprio comportamento de vazão do curso d'água, acaba por incorporar indiretamente as características da bacia que influenciam nesse comportamento. Enquanto que a Proposta 3, apesar de produzir resultados satisfatórios neste estudo, deve ser tratado com cautela, pois foi ajustado de acordo com análises de apenas algumas bacias hidrográficas brasileiras e pode não ser adequado a outras bacias com características diferenciadas das utilizadas no desenvolvimento do método.

As bacias do Escudo Sul-rio-grandense analisadas neste estudo apresentam comportamento de fluxo de água subterrânea diferenciado das bacias localizadas no Planalto Setentrional, e por isso, resultados diferenciados de contribuição de escoamento de base, estimados através do filtro de Eckhardt (2005). A BHAF-PC apresentou as maiores taxas em cada uma das propostas, localizada na região do Escudo Sul-rio-grandense, enquanto que a BHRI-PT, localizada na região do Planalto Setentrional, as menores taxas.

As bacias localizadas no Planalto Setentrional que foram avaliadas neste estudo apresentam características individuais diferenciadas entre si. A BHRI-PT apresenta relevo menos acidentado, áreas de densidade de lineamentos concentradas na região central da bacia, alto coeficiente de compacidade e o baixo fator de forma. Apresentou a menor recarga e por consequência, um menor volume de água subterrânea que é disponibilizado para os cursos d'água da região.

A idade de formação das estruturas tectônicas é importante no comportamento do fluxo da água subterrânea em aquíferos fraturados. Fraturas e falhas antigas são menos propícias à circulação de água por possivelmente se encontrarem preenchidas ou terem sofrido alteração de outros eventos mais jovens. Nesse sentido, a identificação das principais direções dos lineamentos se faz necessária à análise da contribuição do escoamento de base, pois podem indicar sobre famílias estruturais que podem ser mais produtivas. Da mesma forma, a análise dos comprimentos dos lineamentos nas bacias hidrográficas pode auxiliar a compreensão da interação entre água superficiais e subterrâneas. Além disso, a localização das áreas de maior densidade de lineamentos se faz necessária na análise de fluxo de água subterrânea e contribuição de escoamento de base em aquíferos fraturados. Essa característica indica, na área da bacia, se as estruturas se encontram em locais favoráveis à recarga dos aquíferos ou à descarga deles nos cursos d'água.

Referências

ANA. 2007. **Evolução da Rede Hidrometeorológica Nacional**. Superintendência de Administração da Rede Hidrometeorológica. v. 1, n. 1, ANA, Brasília, DF. 15p. 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil) (ANA). **HidroWeb: sistemas de informações hidrológicas**. Disponível em: http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf . Acesso em: 30 de maio de 2019a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil) (ANA). **Portal de metadados geoespaciais da ANA**. Disponível em: <https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home?uuid=b228d007-6d68-46e5-b30d-a1e191b2b21f>. Acesso em: 30 de maio de 2019b.

ALMEIDA, F. F. M de; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B de. The Upper Precambrian of South America. **Boletim IG**, São Paulo, v. 7, p. 45-80, 1976.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ALVES, J.M.P.; CASTRO, P.T.A. Influência de feições geológicas na morfologia da bacia do rio Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 2, p. 117-127, 2003.

ANDRADES FILHO, C. O.; FONSECA, L. M. G. Lineamentos Estruturais a partir de imagem Landsat TM e dados SRTM. **XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)**, p. 3151-3158, 2009.

ARAÚJO, G. B. U. **Dependência da porosidade e da permeabilidade com o volume de grãos em rochas artificiais não consolidadas**. 2018. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) - Departamento de Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

BARNES, B. S. The structure of discharge-recession curves. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 20, n. 4, p. 721-725, 1939.

BARROS, R. M; MENDIONDO, E. M.; WENDLAND, E. Cálculo de áreas inundáveis devido a enchentes para o plano diretor de drenagem urbana de São Carlos (PDDUSC) na bacia escola do córrego do Gregório. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 5-17, 2007.

BARROS, A. C. M. de; CORRÊA, A. C. B; TAVARES, B. de A. C. Controles estruturais sobre a sedimentação de fundo de vale na bacia do riacho Grande/PB. **Clio Arqueológica**. v. 32, n. 3, p.1-36, 2017.

BATISTA, L. V. **Desvendando a movimentação da água em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG), utilizando análise hidrológica e traçadores isotópicos**. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente). Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente - Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". 111p. 2019.

BECKER, E. L. S.; MÁRCIA, N. P. Relevo do Rio Grande do Sul, Brasil, e sua representação em maquete. **Revista Percurso**, v. 4, n. 2, p. 113-132, 2012.

BESKOW, S.; NORTON, L. D.; MELLO, C. R. Hydrological prediction in a tropical watershed dominated by Oxisols using a distributed hydrological model. **Water Resources Management**, v. 27, n. 2, p. 341–363, 2013.

BETIOLLO, L. M. **Caracterização estrutural, hidrogeológica e hidroquímica dos sistemas aquíferos Guarani e Serra Geral no nordeste do Rio Grande do Sul, Brasil**. 2006. Dissertação de Mestrado apresentada como requisito para obtenção do Título de Mestre em Geociências. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul Instituto De Geociências Programa De Pós-Graduação Em Geociências. Porto Alegre. 2006.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**, 1997.

BRICALLI, L. L. Procedimentos Metodológicos e Técnicas em Geomorfologia Tectônica. **Espaço Aberto**, v. 6, n. 1, p. 75-110, 2016.

BORGES, V. M., FAN, F. M., REGINATO, P. A. R., ATHAYDE, G. B. Groundwork recharge estimating in the Serra Geral aquifer system outcrop area-Paraná State, Brazil. **Águas subterrâneas**, v. 31, n. 4, p. 338-346, 2017.

BORTOLIN, T. A., REGINATO, P. A. R., PRESOTTO, M. A., SCHNEIDER, V. E. Estimativas de recarga aquífera com uso de filtros digitais em sub-bacias hidrográficas do Sistema Aquífero Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul. **Scientia cum Industria**, v. 6, n. 2, p. 21-30, 2018.

BORTOLIN, T. A.; REGINATO, P. A. R. Estimativa de recarga aquífera em duas bacias hidrográficas com diferentes características hidromorfológicas. In: **Congresso Internacional de Tecnologia para o Meio Ambiente** (6.: 2018 abr.: Bento Gonçalves, RS). Trabalhos técnicos. Caxias do Sul. 2018.

CALDEIRA, T. L. **Aprimoramento computacional do modelo Lavras Simulation of Hydrology (LASH): aplicação em duas bacias do Rio Grande do Sul**. 2016. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas. 2016.

CARDOSO, C. A.; DIAS, H. C. T.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S. V. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore [online]**, v. 30, n. 2, p. 241-248. 2006.

CARDOZO, N., ALLMENDINGER, R.W., Spherical projections with OSXStereonet. **Computers & Geosciences**, v. 51, p. 193-205, 2013.

CHAPMAN, T. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. **Hydrological Processes**, v. 13, n. 5, p. 701-714, 1999.

CHOW, V. T; MAIDMENT, D. R.; LARRY, W. M. **Applied Hydrology**. International edition, MacGraw-Hill, Inc. 572 p., 1988.

CPRM. **Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul**: mapa hidrogeológico / José Luiz Flores Machado; Marcos Alexandre de Freitas. - Porto Alegre: CPRM, 2005.

COELHO, G., PONTES, L. M., BATISTA, M. L., DE MELLO, C. R., DA SILVA, A. M. Relação entre o escoamento de base e os diferentes sistemas hidrogeológicos do Estado de Minas Gerais. **Águas Subterrâneas**, v. 29, n. 3, p. 257-267, 2015.

COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. Defining parameters for Eckhardt's digital baseflow filter. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 18, p. 2614-2622, 2013.

CORREA, S.W., MELLO, C.R. de. Determinação e separação do escoamento superficial direto do escoamento base na sub-bacia Paraopeba, rio Ribeirão da Ajuda, mediante os métodos de Barnes e dos filtros de Eckhardt. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA**, 43., Campo Grande. 2014.

COSTA, F. M.; BACELLAR, L. de A. P. Caracterização hidrogeológica de aquíferos a partir do fluxo de base. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, p. 173-183, 2010.

CRUZ, R. F. da. **Projeto sudeste do Rio Grande do Sul, carta geológica Pelotas SH.22-Y-D-IV**. Porto Alegre. Carta geológica. Escala 1:100.000. CPRM, 2018a.

CRUZ, R. F. da. **Projeto sudeste do Rio Grande do Sul, carta geológica Pedro Osório SH.22-Y-C-VI**. Porto Alegre. Carta geológica. Escala 1:100.000. CPRM, 2018b.

CRUZ, R. F. da. **Projeto sudeste do Rio Grande do Sul, carta geológica Pinheiro Machado SH.22 -Y-C-V**. Porto Alegre. Carta geológica. Escala 1:100.000. CPRM, 2018c.

CRUZ, R. F. da (Org.) **Projeto Sudeste do Rio Grande do Sul**: escalas 1:250.000 e 1:100.000; estado do Rio Grande do Sul / organizado por Rodrigo Fabiano da Cruz. Porto Alegre. 173p. CPRM, 2019.

CRUZ, R. R. da. **Morfometria da bacia hidrográfica do Rio Itabirito, Itabirito-Minas Gerais**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em engenharia geológica). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia. 64p. 2018.

CUNHA, G. G. da. **Relação espacial da tectônica rúptil com a hidrogeoquímica e o potencial hidrogeológico do Sistema Aquífero Serra Geral na região do Alto Rio Uruguai, noroeste do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Programa de Pós-Graduação em Ciências. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 105 p. 2014.

DA SILVA, C. X. **Análise morfoestrutural e morfométrica da bacia hidrográfica do rio Chopim – Paraná**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia), Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná. CURITIBA. 2015. 32p.

DE ALMEIDA, K. P., SANTOS, M. F., AMORIM, L. S. A., ANDRADE, C. S. S., DE CARVALHO DORES, E. F. G., CAIXETA, D. S. Qualidade ambiental e descrição morfométrica de uma microbacia urbana da região hidrográfica do Paraguai. **E&S Engineering and Science**, v. 8, n. 1, p. 62-78, 2019.

DE MATOS, A. B.; REGINATO, P. A. R.; ATHAYDE, G. B. Compartimentação hidrogeológica do Sistema Aquífero Guarani na escarpa da serra geral no nordeste do RS. **Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 1, p. 130-139, 2018.

DOS SANTOS COUTINHO, V.; BRICALLI, L. L.; LOPES, G. P. A. Aplicação da técnica de extração de lineamentos para identificação de locais favoráveis a prospecção e capturas de água subterrânea no norte do Espírito Santo (sudeste do Brasil). **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 5655-5660, 2017.

ECKHARDT, K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 19, n. 2, p. 507-515, 2005.

ECKHARDT, K. Analytical sensitivity analysis of a two parameter recursive digital baseflow separation filter. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 2, p. 451-455, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10., 1979, Rio de Janeiro. **Súmula...** Rio de Janeiro, 1979. 83 p.

ESRI, ArcGIS DESKTOP 10.1. Redlands, CA: **Environmental Systems Research Institute**, Inc. (Esri), 2014. CD-ROM.

FAGUNDES, F.S. **Estudo sobre a separação de escoamento e a relação entre vazão e turbidez na bacia hidrográfica do rio dos Bugres no município de Rio Negrinho – SC**. Relatório de estágio supervisionado. Centro de Ciências

Agroveterinárias. Curso de Engenharia Ambiental. Universidade do Estado de Santa Catarina. Lages, 2014.

FARIA, M. M.; ZACCHI, R. C.; FERREIRA, E. S. Caracterização morfométrica e biológica da Bacia Hidrográfica do Córrego Serafim, Sub-Bacia do Rio Paraibuna, Juiz de Fora MG. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA**, 13, 2009, Viçosa, MG. [Anais...] Viçosa, MG: Editora da Universidade Federal de Viçosa, 13., 2009.

FEITOSA, F. A. C., MANOEL FILHO, J., FEITOSA, E. C., DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia**: conceitos e aplicações. CPRM, 2008. 3ed. Ver. e Ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID. 812p. 2008.

FERNANDES, A. J. Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. **Revista do Instituto Geológico**, v. 29, n. 1-2, p. 49-72, 2008.

FERNANDES, A. M.; NOLASCO, M. B.; MORTATTI, J. Estimativa do escoamento superficial rápido e sua carga em suspensão com a aplicação do modelo de separação de hidrogramas com filtros numéricos: Bacia do Rio Sorocaba-SP. **Geociências (São Paulo)**, v. 29, n. 1, p. 49-57, 2010.

FINAMOR, A. B.; IGLESIAS, C. M. D. F.; SANDER, A.; CAMOZZATO, E. Caracterização petrográfica das sequências vulcânicas coerente e particulada da formação Cerro Chato, RS. 2018. **49º Congresso Brasileiro de Geologia**, 20 a 24 de agosto de 2018 – Rio de Janeiro. 2018.

FLORENZANO, T. G. (Org.). **Geomorfologia**: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FREITAS, R.O. de. Textura da drenagem e sua aplicação geomorfológica. **Boletim Paulista de Geografia**. n. 11, p. 53-57, 1952.

FREITAS R. C. **Análise estrutural multitemática do Sistema Petrolífero Irati – Rio Bonito, Bacia do Paraná**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Geologia. Setor de Ciências da Terra. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 98 p. 2005.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUÍS ROESSLER (FEPAM/RS). 2020. **Biblioteca Digital**. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/biblioteca.asp>. Acesso em: 10 de dezembro de 2020.

GASS, S. L. B.; MASSOLA, J. L.; MONTARDO, D. K. Caracterização Geológico-Geomorfológica da Microbacia do Arroio Varejão, Município de Chapada, Rio Grande do Sul, Brasil. **XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal. Anais, p. 3833-40, 2009.

GONÇALVES, J. M. S.; DOS SANTOS, N. M. Análise das classificações do relevo para o Rio Grande do Sul. **Boletim Gaúcho de Geografia**, v. 13, n. 1, 1985.

HENRIQUES, R. J.; VALADÃO, R. C. Análise morfoestrutural da bacia hidrográfica do Ribeirão da Mata no contato embasamento arqueano e bacia sedimentar neoproterozoica, Minas Gerais. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 35, n. 4, 2018.

HIDROWEB, **Agência Nacional de Águas (ANA)**. Disponível em < <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf> > Acessado em 03 de outubro de 2018.

HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin Of The Geological Society Of America**. v. 56, p. 275-370. 1945.

HUANG, M.; ZHANG, L. Hydrological responses to conservation practices in acatchment of the Loess Plateau, China. **Hydrological Processes**, v.18, p.1885-1898, 2004.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2003a). **Carta geológica Folha Santo Ângelo SH.21-X-B**. Levantamento de Recursos Naturais. (Rio Grande do Sul). Rio de Janeiro, Escala 1:250.000. 2003a.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2003b). **Carta geológica Santiago SH.21-X-D**. Levantamento de Recursos Naturais. (Rio Grande do Sul). Rio de Janeiro – RJ, Escala 1:250.000. 2003b.

IGLESIAS, C. M. da F.; KLEIN, C.; CAMOZZATO, E. 2014. **Passo São Diogo (Pedras Altas), Folha SH.22-Y-C-IV**. Estado do RS. Porto Alegre: CPRM. Carta Geológica, Escala 1:100.000. Programa Geologia do Brasil - PGB. 2014.

JACQUES, P. D., MACHADO, R., NUMMER, A. R. Análise estrutural da formação serra geral na porção centro-sul do estado de Santa Catarina, Brasil. **Geociências**, v. 34, n. 3, p.390-401, 2015.

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

KOSKELO, A. I.; FISHER, T. R.; UTZ, R. M.; JORDAN, T. E. A new precipitation-based method of baseflow separation and event identification for small watersheds (< 50 km²). **Journal of hydrology**, v. 450, p. 267-278, 2012.

KOUTSOYIANNIS, D. Hydrologic persistence and the Hurst phenomenon. **Water encyclopedia**, v. 3, p. 210-221, 2005.

LEINZ, V. Contribuição à geologia dos derrames basálticos do sul do Brasil. **Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Universidade de São Paulo. Geologia**, n. 5, p. 1-59, 1949.

LI, L.; MAIER, H. R.; PARTINGTON, D.; LAMBERT, M. F.; SIMMONS, C. T. Performance assessment and improvement of recursive digital baseflow filters for catchments with different physical characteristics and hydrological inputs. **Environmental modelling & software**, v. 54, p. 39-52, 2014.

LIM, K. J.; PARK, Y. S.; KIM, J.; SHIN, Y.-C.; KIM, N. W.; KIM, S. J.; JEON, J.-H.; ENGEL, B. A. Development of genetic algorithm-based optimization module in WHAT system for hydrograph analysis and model application. **Computers & Geosciences**, v. 36, n. 7, p. 936–944. 2010.

LISBOA, N.A.; DANI, N.; REMUS, M.V.D.; CASTRO, J. 2004. Síntese da Ocorrência Geológica das Águas Subterrâneas do Rio Grande do Sul. In: **XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. 2004. Cuiabá. Anais do XIII CABAS (2004).

MACHADO, J. L. F.; FREITAS, M. A. de. **Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul**: relatório final. Porto Alegre: CPRM, 65p., 2005.

MACHADO, F. B.; NARDY, A. J. R.; ROCHA JUNIOR, E. R. V.; MARQUES, L. S.; OLIVEIRA, M. A. F. D. Geologia e litogeoquímica da Formação Serra Geral nos estados de Mato grosso e Mato Grosso do Sul. **Geociências**, v. 28, n. 4, p. 523-540, 2009.

MACHADO, T. F. **Proveniência das areias inconsolidadas do Rio Jacuí-RS**. 2011. Dissertação (Mestrado em Geociências), Instituto de geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2011.

MATTIUZI, C.D.P. **Estimativa de recarga a partir da separação de escoamento de base na bacia hidrográfica do rio Ibicuí/RS**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS. 69 p. 2013.

MATTIUZI, C. D. P., KIRCHHEIM, R., COLLISCHONN, W., FAN, F. M. Estimativa de recarga subterrânea a partir da separação de escoamento de base na bacia hidrográfica do Rio Ibicuí (América do Sul). **Águas Subterrâneas**, v. 29, n. 3, p. 285-300, 2015.

MATZEMBACHER, L. T. **Caracterização estrutural, hidrogeológica e hidroquímica da zona de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG) na região sudoeste do Rio Grande do Sul**. 2011. Trabalhos de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia). Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011.

MELATI, M. D.; FAN, F. M.; ATHAYDE, G. B. Estudo das interações entre as águas superficiais e subterrâneas na Bacia do Paraná utilizando modelagem hidrológica e separação do escoamento de base. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos** (22.: Florianópolis, 2017). Anais [recurso eletrônico]. [Porto Alegre: ABRH, 2017], 2017.

MENEGOTTO, E. Análise textural da Formação Tupanciretã. **Ciência e Natura, Santa Maria**, v. 2, p. 91-103, 1980.

MENEZES, D. J.; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S.; SCCOTI, A. A. V. Compartimentação geomorfológica do município de São Pedro do Sul/RS. **Boletim Gaúcho de Geografia**, v. 40, p.268-279, 2013.

MILANI, E. J.; RAMOS, V. A. Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 4, p. 473-484, 1998.

MIRANDA, A. C. R. **Métodos de separação dos escoamentos superficial direto e subterrâneo: estudo de caso para a bacia do Rio das Velhas**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. 2012.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. de A. **Hidrologia estatística**. CPRM, 2007.

NOGUEIRA, P. C. Regiões fisiográficas do Estado do Rio Grande do Sul. **Boletim Geográfico**, n. 6, v. 64, p. 337-346. 1948.

NOLL FILHO, R. J. **Geologia e petrologia das rochas riolíticas da região do Cerro Chato, Herval, RS**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia). Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014.

PETERLINI, G. **Mapeamento de lineamentos estruturais e sua influência na potencialidade hídrica do Sistema Aquífero Serra Geral na bacia do Ribeirão Cambé em Londrina, PR**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PETTYJOHN, WAYNE A.; HENNING, ROGER. Preliminary estimate of ground-water recharge rates, related streamflow and water quality in Ohio. **Ohio State University Water Resources Center Project Completion Report**, v. 552, 1979.

PHILIPP R.P. 1998. **A evolução geológica e tectônica do Batólito Pelotas no Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado em Geologia). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 255p. 1998.

PHILIPP, R. P.; MACHADO, R. Suítes graníticas do Batólito Pelotas no Rio Grande do Sul: petrografia, tectônica e aspectos petrogenéticos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31, n. 3, p. 257-266, 2001.

PHILIPP, R. P., MACHADO, R., NARDI, L. V. S., LAFON, J. M. O magmatismo granítico Neoproterozóico do Batólito Pelotas no sul do Brasil: novos dados e revisão da geocronologia regional. **Brazilian Journal of Geology**, v. 32, n. 2, p. 277-290, 2008.

PINOTTI, A. M.; CARNEIRO, C. D. R. Geologia Estrutural na previsão e contenção de queda de blocos em encostas: aplicação no Granito Santos, SP. **Terrae Didactica**, v. 9, n. 2, p. 132-168, 2013.

PISSARA, T. C. T.; BORGES, M. J.; GALBIATTI, J. A.; RODRIGUES, F. M.; POLITANO, W. Análise morfométrica da microbacia hidrográfica do córrego rico, região nordeste do Estado de São Paulo. **Científica [online]**, v.34, n.2, p.170-177, 2006.

POLAND, J. F., LOFGREN, B. E., RILEY, F. S. **Glossary of selected terms useful in studies of the mechanics of aquifer systems and land subsidence due to fluid withdrawal**. 1972.

PONTES, L. M.; COELHO, G.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; OLIVEIRA, G. C. Análise de sensibilidade e avaliação da estrutura do modelo BALSEQ em condições distintas de clima, solo e vegetação. **Revista Brasileira De Recursos Hídricos**, v. 20, n. 1, p. 46-54, 2015.

QUEIROZ, G. L.; SALAMUNI, E.; DO NASCIMENTO, E. R. AzimuthFinder: ferramenta para a extração de dados e apoio na análise estrutural. **Geologia USP. Série Científica**, v. 14, n. 1, p. 69-80, 2014.

REGINATO, P. A. R.; STRIEDER, A. J. Caracterização hidrogeológica e potencialidades dos aquíferos fraturados da formação serra geral na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. **Águas Subterrâneas**, n. 1, p. 1-15, 2004.

ROBAINA, L.E.S. Compartimentação Geomorfológica da Bacia Hidrográfica do Ibicuí, Rio Grande do Sul, Brasil: Proposta de Classificação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v.11 n.2, p. 11 – 23. 2010.

ROBAINA, L.E.S; TRENTIN, R.; LAURENT, F. Compartimentação do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, através do uso de *geomorphons* obtidos em classificação topográfica automatizada. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.17, n.2, p.287-298, 2016.

ROBAINA, L. E.; TRENTIN, R. Estudo e zoneamento das formas de relevo do município de São Vicente do Sul, RS. **Geoambiente [On-Line]**, (n.31). 2018. <https://doi.org/10.5216/revgeoamb.v0i31.53087>

SANTOS, C. A.; SOBREIRA, F. G. Análise morfométrica como subsídio ao zoneamento territorial: o caso das bacias do Córrego Carioca, Córrego do Bação e Ribeirão Carioca na região do Alto Rio das Velhas-MG. **Revista da Escola de Minas**, v. 61, n. 1, Jan./Mar. p.77-85. 2008.

SILVA, J. B. L. DA, FERREIRA, P. A., RAMOS, M. M., EUCLYDES, H. P., SOARES, V. P. Modelos de previsão de enchentes em tempo real para o município de Nova Era-MG. **Revista Engenharia Na Agricultura-REVENG**, v. 17, n. 3, 2009.

SLOTO, R. A.; CROUSE, M. Y. HYSEP: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. **Water-resources investigations report**, v. 96, p. 4040, 1996.

SMAKHTIN, V. U. Low flow hydrology: a review. **Journal of hydrology**, v. 240, n. 3-4, p. 147-186, 2001.

SORDI, M. V., SALGADO, A. A. R., PAISANI, J. C., PAGOTTO, D. Controle litoestrutural no desenvolvimento de vales na área do rebordo da Bacia do Paraná no Estado de Santa Catarina, Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 4, p. 671-687, 2017.

SOUZA, R. M. de. **Heterogeneidade espacial e efeito de escala no escoamento de base em bacias embutidas do Alto Iguaçu/PR**. Tese (Doutorado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 161p. 2015.

SPADOTTO, C. A. Ocupação agrícola: a importância da gestão territorial. **Agroanalysis**, Rio de Janeiro, v. 32, n. 9, p. 31. set. 2012.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) – analysis of erosion al topography. **Geological Society of America Bulletin**, v.63, n.10, p.1117-1142, 1952.

STRAHLER, A.N. Quantitative slope analysis. **Geological Society of America Bulletin**, n. 67, p. 571-596, 1956.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Geophysical Union Trans.**, v.38, p.912-920, 1957.

SUJONO, J.; SHIKASHO, S.; HIRAMATSU, K. A comparison of techniques for hydrograph recession analysis. **Hydrological processes**, v. 18, n. 3, p. 403-413, 2004.

TAKAHASHI, H. A.; HAERTEL, V.; LISBÔA, N. A. 1993. Caracterização morfoestrutural e hidrogeológica de aquíferos em meio fraturado através de técnicas de sensoriamento remoto e análise estatística em setor do Planalto Meridional, RS. In: **Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto**, 7., Curitiba, PR. ANAIS... Curitiba, PR.: INPE. P. 332-350. 1993.

TEIXEIRA, R.F.O. **Modelos de Cintilação na banda Ka em Trajectória Terra-Satélite**. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Electrónica e Telecomunicações e Informática, Universidade de Aveiro. Aveiro, 131p. 2007.

TRAJANO, S. D. S.; SPADOTTO, C. A.; HOLLER, W. A.; DALTIO, J.; MARTINHO, P. R. R.; FOIS, N. S.; SANTOS, B. B. DE O.; TOSCHI, H. H; LISBOA, F. S. Análise Morfométrica de Bacia Hidrográfica: Subsídio à Gestão Territorial Estudo de Caso no Alto e Médio Mamanguape. **Embrapa Gestão Territorial - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2012.

TONELLO, K. C.; DIAS, H. C. T.; SOUZA, A. L. D.; RIBEIRO, C. A. A. S.; LEITE, F. P. Morfometria da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhões - MG. **Revista Árvore [online]**, v. 30, n. 5, p. 849-857, 2006.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Ed. da Universidade: ABRH: EDUSP. 2º ed.: Tucci, CEM (org.), 2001.

TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. **Ciência e Cultura**, v. 55, n. 4, p.31-33, 2003.

USGS EROS Data Center. **Shuttle Radar Topography Mission**. < <https://earthexplorer.usgs.gov/> > acessado em 29 de março de 2019.

VENDRAME, I. F.; LOPES, W. A. B. Análise do crescimento urbano e seus efeitos na mudança da dinâmica de escoamento superficial da bacia do Pararangaba. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 12, p. 16-21, 2005.

VIEIRA, L. D. **Caracterização dos tipos de porosidade em rochas vulcânicas da Formação Serra Geral por microtomografia de raios-X de radiação síncrotron**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) Universidade Federal de Santa Catarina. 2016.

VIERO, A. C.; SILVA, D. R. A da. **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM. 250 p. 2010.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo, McGraw-Hill, 1975. 245p. Capítulo 2 – Bacia hidrográfica. P.6-28.

WITTENBERG, H. Nonlinear analysis of flow recession curves. **IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences**, v. 221, p. 61-68, 1994.

WREGE, M. S.; STEINMETZ, S.; REISSER JUNIOR, C.; ALMEIDA, I. R. de. (Ed.). Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. **Pelotas: Embrapa Clima Temperado**; Colombo: Embrapa Florestas. 333 p. 2011.

XIE, J., LIU, X., WANG, K., YANG, T., LIANG, K., LIU, C. Evaluation of typical methods for baseflow separation in the contiguous United States. **Journal of Hydrology**, v. 583, p. 124628, 2020.

ZERNITZ, E.R. Drainage patterns and their significance. **Journal of Geology**. Vol. 40, No. 6 (Aug. - Sep., 1932), pp. 498-521.

ZOU, C. **Volcanic reservoirs in petroleum exploration**. Newnes, 2013.