

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – UFRGS  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS – IPH  
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE  
RECURSOS HÍDRICOS – PROFÁGUA

**SUBSÍDIOS PARA ELABORAÇÃO DE TERMO DE REFERÊNCIA PARA  
CONTRATAÇÃO DE ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS COM VISTAS À  
DETERMINAÇÃO DE VAZÃO OUTORGÁVEL EM ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS NO ÂMBITO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

**FLÁVIA ÁVILA DIAS**

Porto Alegre/RS  
2022

POLO



# ProfÁgua



# ProfÁgua



FLÁVIA AVILA DIAS

**SUBSÍDIOS PARA ELABORAÇÃO DE TERMO DE REFERÊNCIA PARA  
CONTRATAÇÃO DE ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS COM VISTAS À  
DETERMINAÇÃO DE VAZÃO OUTORGÁVEL EM ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS NO ÂMBITO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua) Polo IPH/UFRGS como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

**Orientador:** Prof. Dr. Néelson Luiz Sambaqui Gruber

**Banca examinadora:**

Prof. Dr. Pedro Antônio Rohe Reginato

Prof. Dr. Marco Antonio Fontoura Hansen

Prof. Dr. Cristiano Poletto

Porto Alegre/RS  
2022

#### CIP - Catalogação na Publicação

Dias, Flávia Avila  
SUBSÍDIOS PARA ELABORAÇÃO DE TERMO DE REFERÊNCIA  
PARA CONTRATAÇÃO DE ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS COM VISTAS  
À DETERMINAÇÃO DE VAZÃO OUTORGÁVEL EM ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS NO ÂMBITO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL  
/ Flávia Avila Dias. -- 2022.  
87 f.  
Orientador: Néelson Luiz Sambaqui Gruber.

Dissertação (Mestrado Profissional) -- Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas  
Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Gestão e  
Regulação de Recursos Hídricos, Porto Alegre, BR-RS,  
2022.

1. Gestão de Recursos Hídricos. 2. Termo de  
Referência. 3. Hidrogeologia. 4. Vazão outorgável. 5.  
Recarga de Aquíferos. I. Gruber, Néelson Luiz Sambaqui,  
orient. II. Título.

FLÁVIA AVILA DIAS

SUBSÍDIOS PARA ELABORAÇÃO DE TERMO DE REFERÊNCIA PARA CONTRATAÇÃO  
DE ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS COM VISTAS À DETERMINAÇÃO DE VAZÃO  
OUTORGÁVEL EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO ÂMBITO DO ESTADO DO RIO  
GRANDE DO SUL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua) Polo IPH/UFRGS como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Aprovado em: Porto Alegre, 30 de março de 2022.

Prof. Dr. Néelson Luiz Sambaqui Gruber - UFRGS  
Orientador

Prof. Dr. Pedro Antônio Rohe Reginato – UFRGS  
Examinador

Prof. Dr. Marco Antonio Fontoura Hansen – UNIPAMPA  
Examinador

Prof. Dr. Cristiano Poletto - UFRGS  
Examinador

*“Há água suficiente para satisfazer as crescentes necessidades do mundo, mas não sem mudar a forma de geri-la.”*

(Relatório Mundial sobre o Desenvolvimento de Recursos Hídricos – ONU)

## AGRADECIMENTOS

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

Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE N°. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

Ao meu orientador Prof. Dr. Néelson Luiz Sambaqui Gruber por ter abraçado esta causa comigo.

Ao Prof. Dr. Reginato que mais uma vez muito me auxiliou na elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Hansen por ter aceitado participar da banca, enriquecendo-a ainda mais.

Ao Prof. Dr. Poletto que conduz com maestria o polo Rio Grande do Sul do ProfÁgua.

Aos meus pais e mães Orixás, que sempre me conduziram pela vida me amparando nos momentos difíceis e me levantando quando caí. Às mães Oxum e Yemanjá, divindades das águas que permeiam minha vida profissional e onde sempre busquei a paz dos oceanos e a tranquilidade dos rios. Ao pai Omulu, o senhor da Terra, e a Oxalá o senhor da fé. Saravá, Umbanda!

Aos meus pais, Roque e Tereza por todos os valores ensinados e o amor incondicional.

À minha companheira de vida, o meu amor Viviane, quem acalentou minhas angústias e muito me incentivou a seguir em frente. Obrigada pelas longas conversas madrugada afora quando eu fazia minhas “catarses”.

Aos meus irmãos Giovani e Maicon e cunhadas Juliana e Larissa pela torcida de sempre. Vocês são mais que irmãos.

Aos meus amigos e amigas, pois sem eles, nada sou.

Aos colegas da turma 2019 do ProfÁgua pelos bons momentos passados juntos e pelas muitas risadas compartilhadas.

Aos colegas da DIOUT/SEMA, Carlos, Luciano, Francielle, Patrícia, Ingo, Leandro, F. Garcia, os “subterrâneos” da Divisão. À Daiana, Kevin, Rogério e F. Marodin, os “superficiais” e, João e Rafaela que cuidam da parte administrativa. Obrigada pela parceria na construção de um serviço público de qualidade. É uma honra trabalhar com vocês.

Aos parceiros da Câmara Técnica de Águas Subterrâneas (CTAS), a qual pude estar presidenta por dois anos e onde pudemos construir políticas públicas relativas à água subterrânea.

## RESUMO

**Dias, Flávia Avila. Critérios para Elaboração de Termo de Referência para Contratação de Estudos Hidrogeológicos com Vistas à Determinação de Vazão Outorgável em Águas Subterrâneas.** Dissertação. Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Programa de Pós-graduação em Rede Nacional ProfÁgua, IPH/UFRGS, Porto Alegre. 2022.

Com as reiteradas situações de escassez hídrica de águas superficiais, a água subterrânea tem surgido como alternativa para auxiliar no atendimento ao abastecimento público e na irrigação. Entretanto o debate e o gerenciamento destes recursos ainda estão muito aquém do necessário. Por exemplo, na maioria dos estados brasileiros não há o critério da vazão máxima a ser outorgada visando à integridade dos sistemas aquíferos e hidrológicos locais. As concessões de outorga baseiam-se nos ensaios de bombeamento pontuais do poço a ser explorado sem o olhar para o comportamento daquela vazão em relação ao reservatório como um todo. Diante deste cenário, estudos hidrogeológicos devem oferecer o embasamento técnico para as tomadas de decisão do poder regulatório e fiscalizador. Entretanto, há uma defasagem profissional de hidrogeólogos nos órgãos gestores o que resulta na necessidade de contratação de empresas privadas para elaboração dos estudos de hidrogeologia. Em razão desta falta de profissionais, identifica-se uma grande dificuldade na elaboração de Termos de Referência para contratação destes estudos. Uma vez que cada estado do Brasil segue critérios, usos e limites diversos, não há um direcionamento a ser seguido no momento da elaboração de um Termo de Referência. Este trabalho buscou estabelecer um roteiro com base na literatura existente, sobre que critérios devem ser elencados em um TR para a contratação de estudos hidrogeológicos para a definição de uma vazão outorgável, através da pesquisa na bibliografia e trabalhos acadêmicos referentes aos métodos utilizados para cálculos de estimativas de recarga para os aquíferos fraturados e intergranulares existentes no Estado do Rio Grande do Sul, juntamente com o modelamento do avanço e/ou recuo da cunha salina nos aquíferos costeiros através dos métodos geolétricos Sondagem Elétrica Vertical e Caminhamento Elétrico. Foram encontrados diversos métodos para cálculo de recarga na vasta literatura e produção acadêmica a respeito. Os métodos considerados relevantes para comporem um TR são o balanço hídrico, separação de escoamento, modelos de simulação e variação dos níveis de água que servem de subsídios para a elaboração de um modelo conceitual da recarga aquífera em regiões a serem estudadas.

**Palavras-chave:** recarga; água subterrânea; outorga.



## ABSTRACT

With the repeated situations of water scarcity of surface waters, groundwater has emerged as an alternative to assist in serving public supply and irrigation. However, the debate and management of these resources are still far from necessary. For example, in most Brazilian states there is no criterion of maximum flow to be granted aiming at the integrity of local aquifer and hydrological systems. The granting concessions are based on punctual pumping tests of the well to be explored without looking at the behavior of that flow in relation to the reservoir as a whole. Given this scenario, hydrogeological studies should provide the technical basis for decision-making by the regulatory and supervisory authorities. However, there is a professional gap of hydrogeologists in the management bodies, which results in the need to hire private companies to carry out hydrogeology studies. Due to this lack of professionals, a great difficulty is identified in the elaboration of Terms of Reference for contracting these studies. Since each state in Brazil follows different criteria, uses and limits, there is no direction to be followed when preparing a Term of Reference. This work sought to establish a guide based on the existing literature, on which criteria should be listed in a Terms of Reference for contracting hydrogeological studies for the definition of a grantable flow, through research in the bibliography and academic works referring to the methods used for calculations of recharge estimates for the fractured and intergranular aquifers existing in the Rio Grande do Sul State, together with the modeling of the advance and/or retreat of the saline wedge in coastal aquifers through the geoelectrical methods Vertical Electric Sounding and Electric Walking. Several methods for calculating recharge were found in the vast literature and academic production on the subject. The methods considered relevant to compose a TR are the water balance, flow separation, simulation models and variation of water levels that serve as subsidies for the elaboration of a conceptual model of aquifer recharge in regions to be studied.

Keywords: recharge; groundwater; grant.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação do Ciclo hidrológico. ....	21
Figura 2 - Mecanismos de entrega da chuva para um canal de rio a partir de uma vertente em um pequeno tributário de uma bacia hidrográfica.....	22
Figura 3- Esquema do aparato utilizado por Darcy em seu experimento.....	24
Figura 4 - Conceitos de transmissividade e condutividade hidráulica.....	26
Figura 5 – Exemplo de mapa potenciométrico.....	27
Figura 6 – Esquema identificando os fluxos (em m <sup>3</sup> /ano) na interação no ciclo hidrológico e as reservas de água (atmosfera, gelo e águas subterrâneas).....	27
Figura 7 - Sistemas de Fluxo de Águas Subterrâneas.....	28
Figura 8 – Esquema mostrando o rio efluente (A) e influente (B)..	29
Figura 9 - (a) direção do fluxo da intrusão de cunha da água do mar; (b) Circulação de acordo com a densidade na zona da água do mar; (c) Formação de cone devido ao bombeamento de água; (d) Zona de recirculação da água superior do mar; (e) Afloramento na superfície das águas subterrâneas. ....	30
Figura 10 - Metodologia e produtos na captação de água subterrânea – Rochas Sedimentares.....	31
Figura 11 - Metodologia e produtos na captação de água subterrânea – Rochas Cistalinas. ....	32
Figura 12- Classificação dos meios fraturados.....	33
Figura 13– Estimativa de nível de água em aquíferos mundiais. ....	34
Figura 14 – Determinação do $\Delta H$ .....	52
Figura 15– Diferentes origens de escoamento de um rio. ....	53
Figura 16– Definição da curva de recessão. ....	54
Figura 17- Hidrogramas mostrando os resultados de separação do escoamento pelo método HYSEP .....	57
Figura 18- Hidrogramas mostrando os resultados de separação do escoamento pelo método BFI Padrão e modificado.....	58
Figura 19 – Guia para identificar a adequabilidade do método de análise de águas superficiais ao estudo....	61
Figura 20– Mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul.....	65
Figura 21 – Adequabilidade dos métodos de estimativa de recarga.....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Distribuição da população e da água subterrânea por região brasileira, com os respectivos valores numéricos e percentuais..	36
Tabela 2- Classificação do escoamento superficial	71
Tabela 3- Métodos de estimativa de recarga a partir de dados de águas superficiais.	74

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1: Valores de C e a em função do tipo de solo, declividade e estação do ano. ....	48
Quadro 2- Valores do CN atribuído a cada complexo hidrológico.....	49
Quadro 3- Limites de classes de declividade – Fonte: Embrapa 1999. ....	67

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ANA – Agência Nacional de Águas  
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
CELIC – Central de Licitações do Rio Grande do Sul  
CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento  
DRHS – Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento  
DIOUT – Divisão de Outorga  
DIPLA – Divisão de Planejamento  
SEMA – Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura  
SIOUT RS– Sistema de Outorga do Rio Grande do Sul  
TR – Termo de Referência  
SASG – Sistema Aquífero Serra Geral  
CPRM – Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais  
BDMEP – Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa  
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia  
P – precipitação  
ET–evapotranspiração  
ETR– evapotranspiração real  
ETP– evapotranspiração potencial  
 $\Delta S$  – variação de armazenamento no volume de controle  
Roff – escoamento direto ou superficial  
D – Drenagem  
R – Recarga  
Qbf – escoamento de base  
 $\Delta S_{uz}$  – variação do armazenamento da água no solo  
Qon – escoamento superficial e subterrâneo para dentro da bacia  
Qoff – escoamento superficial e subterrâneo para fora da bacia  
Q swoff – escoamento total (superficial e de base)  
Qswon – Fluxo superficial para dentro da bacia  
Qgwon – Fluxo subterrâneo para dentro da bacia  
Q gwoff – Fluxo subterrâneo para fora da bacia  
Qbf – Fluxo de base para corpos d’água superficiais  
Roff – Deflúvio ou fluxo superficial para fora da bacia  
ETsw – Evapotranspiração - água superficial  
ETuz – Evapotranspiração - zona não saturada

ET<sub>gw</sub> – Evapotranspiração - zona saturada  
 $\Delta S_{snow}$  – Mudança no armazenamento - neve  
 $\Delta S_{sw}$  – Mudança no armazenamento - água superficial  
 $\Delta S_{sz}$  – Mudança no armazenamento - zona não saturada  
 $\Delta S_{gw}$  – Mudança no armazenamento - água subterrânea  
CN – Curva número do método Soil Conservation Service  
S – Parâmetro armazenamento do método Soil Conservation Service  
IT – infiltração total  
I<sub>r</sub> – água retida no solo  
I<sub>e</sub> – Infiltração eficaz  
BFI – índice de fluxo basal (Base Flow Index)  
VNA – Variação de níveis de água  
WTF – Water Table Fluctuation  
ZFP – Plano de fluxo nulo  
ZZFP – Profundidade do plano de fluxo nulo  
ZWT – Profundidade do nível de água  
K – condutividade hidráulica  
h – carga hidráulica total  
 $\psi$  – potencial mátrico  
 $\theta$  – conteúdo de umidade  
S<sub>y</sub> – rendimento específico  
 $\Delta H$  – mudança na altura do lençol freático  
 $\Delta t$  – intervalo de tempo  
n – porosidade total  
S<sub>r</sub> – retenção específica  
Q<sub>o</sub> – escoamento no tempo t<sub>0</sub>  
k – constante de decaimento exponencial  
N – duração aproximada do escoamento superficial  
A – área  
f – fator de teste de ponto de inflexão do hidrograma  
K' – índice diário de recessão do hidrograma  
K – índice de recessão  
m – metro  
m<sup>2</sup>/h – metro quadrado por hora  
m<sup>3</sup>/h/m – metro cúbico por hora por metro

$m^3/h$  – metro cúbico por hora

y – vazão total

f – escoamento superficial

b – escoamento de base

$\alpha$  – parâmetro de filtro digital recursivo

*BFI<sub>max</sub>* – índice de fluxo basal máximo

T e TR – Transmissividade

T<sub>c</sub> – Tempo crítico

V – Volume

CMB – Chloride Mass Balance

Map – taxa de deposição seca de cloro

C<sub>p</sub> – concentração de cloro na precipitação

C<sub>gw</sub> – concentração da cloro na água subterrânea

WEAP – Water Evaluation and Planning System

SMAP – Soil Moisture Accounting Procedure

BALSEQ – Balanço hídrico sequencial diário

GRACE – Gravity Recovery and Climate Experiment

GLDAS – Global Land Data Assimilation System

C' – coeficiente de escoamento superficial

E<sub>s</sub> – escoamento superficial direto

E<sub>r</sub> – taxa de evapotranspiração

Rec – recarga do reservatório do subsolo

STR – capacidade de campo máxima do solo

TU – teor de umidade do solo

Capc – a capacidade de campo máxima do solo

Q<sub>m</sub> –vazão média

CC – capacidade de campo

D<sub>s</sub> – densidade do solo

AHP – Análise Hierárquica Processual

MGB – Modelo de Grandes Bacias

## SUMÁRIO

RESUMO .....	8
ABSTRACT .....	9
1 INTRODUÇÃO .....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 CICLO HIDROLÓGICO.....	21
2.2 RESERVAS SUBTERRÂNEAS .....	23
2.3 RECARGA E DESCARGA DE AQUÍFEROS .....	23
2.4 FLUXO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	24
2.4.1 Lei de Darcy .....	24
2.4.2 Condutividade Hidráulica.....	25
2.4.3 Transmissividade .....	25
2.4.4 Coeficiente de armazenamento.....	26
2.4.5 Mapa potenciométrico .....	26
2.5 INTERAÇÃO COM O FLUXO SUPERFICIAL .....	27
2.5.1 Controles Geomorfológicos, Hidrogeológicos e Climáticos.....	28
2.5.2 Intrusão da Cunha Salina.....	29
2.6 GEOFÍSICA APLICADA À HIDROGEOLOGIA .....	30
2.7 TIPOS DE AQUÍFERO QUANTO AO MEIO.....	32
2.7.1 Fraturado.....	32
2.7.2 Intergranular .....	33
2.7.3 Cárstico.....	33
2.8 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS .....	33
2.8.1 Breve panorama dos cenários brasileiro e mundial de água subterrânea .....	33
2.8.2 Gestão integrada dos recursos hídricos .....	36
2.8.3 Arcabouço legal.....	37
2.8.3.1 Outorga de Direito de Uso da Água .....	43
2.8.3.2 Critérios de Outorga .....	45
2.8.3.3 Termo de Referência (TR) .....	45
3 METODOLOGIA .....	47
3.1 DESENVOLVIMENTO DOS TRABALHOS .....	47



3.2	BALANÇO HÍDRICO .....	48
3.3	MÉTODOS FÍSICOS .....	50
3.3.1	Zona Não Saturada .....	50
3.3.2	Zona Saturada .....	51
3.3.3	Métodos baseados em dados de águas superficiais .....	52
3.3.4	Uso de curvas de permanência .....	54
3.3.5	Softwares para separação de um hidrograma .....	54
3.3.6	Método de análise do deslocamento da curva de recessão .....	58
3.3.7	Métodos de Traçadores.....	61
3.3.7.1	Balanço de Cloretos	61
3.3.7.2	Isótopos	62
3.3.8	Modelos de Simulação.....	62
3.3.9	Técnicas de Regressão.....	63
3.3.10	Uso de satélites e sistemas de informações geográficas .....	64
3.4	ÁREA DE ESTUDO .....	64
3.5	RESULTADOS .....	66
3.5.1	Estudos que devem compor cálculo de estimativa de recarga.....	67
3.5.1.1	Seleção da área de estudo	67
3.5.1.2	Descrição geológica e hidrogeológica	67
3.5.1.3	Geomorfologia	67
3.5.1.4	Caracterização do solo	67
3.5.1.5	Caracterização física e morfométrica	68
3.5.1.6	Mapeamento do uso e cobertura do solo da região de estudo	68
3.5.1.7	Caracterização climática da bacia e/ou sub-bacia	68
3.5.1.8	Inventário de poços	68
3.5.1.9	Caracterização geológica estrutural (Somente para as áreas com aquíferos fraturados)	68
3.5.1.10	Mapa de densidade de lineamentos e de drenagem;	69
3.5.1.11	Mapa potenciométrico	69
3.5.1.12	Tratamento estatístico de dados;	69
3.5.2	Critérios para modelagem da cunha salina .....	70
3.5.2.1	Método geolétrico	70
3.5.3	Métodos a serem utilizados para a estimativa de recarga.....	70
3.5.3.1	Método do Balanço Hídrico	70

3.5.3.2	Métodos baseados na separação de escoamento superficial e subterrâneo	74
3.5.3.3	Uso de modelos de Simulação	74
3.5.3.4	Variação do Nível de Água (VNA)	75
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS E DISCUSSÕES .....	77
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	79

## 1 INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas vêm ganhando destaque há alguns anos como uma fonte alternativa para solução de reiterados períodos de escassez hídrica no país e no Estado do Rio Grande do Sul. De acordo com a publicação do Boletim Especial de Estiagem de 2019 a 2021, da Sala de Situação da Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Infraestrutura do Rio Grande do Sul (SEMA/RS), “...o prognóstico climático é de que a recarga hídrica das bacias não será possível dada a chuva insuficiente, e, em razão do aumento da demanda hídrica em função do calendário de plantio (sobretudo arroz e soja) há risco substancial de comprometimento da disponibilidade hídrica nas bacias gaúchas, demandando ações de gestão e regulação de recursos hídricos, principalmente nas bacias com conflito de uso da água”.

Como forma de mitigação dos danos causados pela estiagem, em janeiro de 2021 o governo do Estado do Rio Grande do Sul, através da Secretaria de Obras e Habitação (SOP), lançou o Plano de Enfrentamento à Estiagem, com uma previsão de investimentos de R\$ 55.100.000,00 para perfurar poços em 401 municípios. Ações como essa se repetem em várias localidades que buscam na água subterrânea uma mitigação para o problema da escassez hídrica.

Em que pese água subterrânea ser elemento componente do ciclo hidrológico, é necessário refletir sobre o uso deste recurso. Que informações estão disponíveis a respeito do balanço hídrico dos aquíferos? Quais as vazões podem ser exploradas com segurança sem afetar o equilíbrio hídrico deste sistema? Uma vez que a estiagem se faz presente, como se dá a recarga dos aquíferos?

Apesar do vasto acervo técnico e científico acerca das águas subterrâneas no Brasil produzidos pelos centros acadêmicos, pouco foi agregado à Gestão de Recursos Hídricos. E apesar da necessidade cada vez mais crescente do uso destas águas para o abastecimento, a maioria dos órgãos gestores ainda não possui uma abordagem específica para a definição da vazão outorgável dos aquíferos, a qual deveria ser utilizada como parâmetro para manter a segurança hídrica do sistema como um todo.

Ainda que diante da evidente necessidade, alguns desses órgãos se ressentem nessa lacuna do conhecimento no momento da elaboração dos critérios para a determinação de uma vazão outorgável para as águas subterrâneas. Soma-se ainda a insuficiência de recursos humanos, fato que permeia a administração pública. Portanto, neste cenário, a solução

geralmente recai na contratação destes serviços. Entretanto o hiato técnico dificulta bastante a elaboração de um Termo de Referência (TR) para a contratação dos estudos.

É em razão deste hiato técnico que este trabalho visa indicar os critérios necessários a serem abordados no TR para a contratação de tais estudos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir será apresentada uma revisão bibliográfica dos conceitos que serão discutidos ao longo do trabalho e na legislação aplicada nos estados do Brasil e em alguns países.

### 2.1 CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico conforme demonstra a figura 1, é o "Sistema pelo qual a natureza faz a água circular do oceano para a atmosfera e daí para os continentes, de onde retorna, superficial ou subterraneamente, ao oceano. Esse ciclo é governado no solo e subsolo pela ação da gravidade, bem como pelo tipo e pela densidade de cobertura vegetal; e a atmosfera e superfícies líquidas (rios, lagos, mares e oceanos), pelos elementos e fatores climáticos, como, por exemplo, temperatura do ar, ventos, umidade relativa do ar e insolação, que são os responsáveis pelos processo de circulação da água dos oceanos para a atmosfera em uma dada latitude terrestre" ( Junior.,2006 site CPRM).

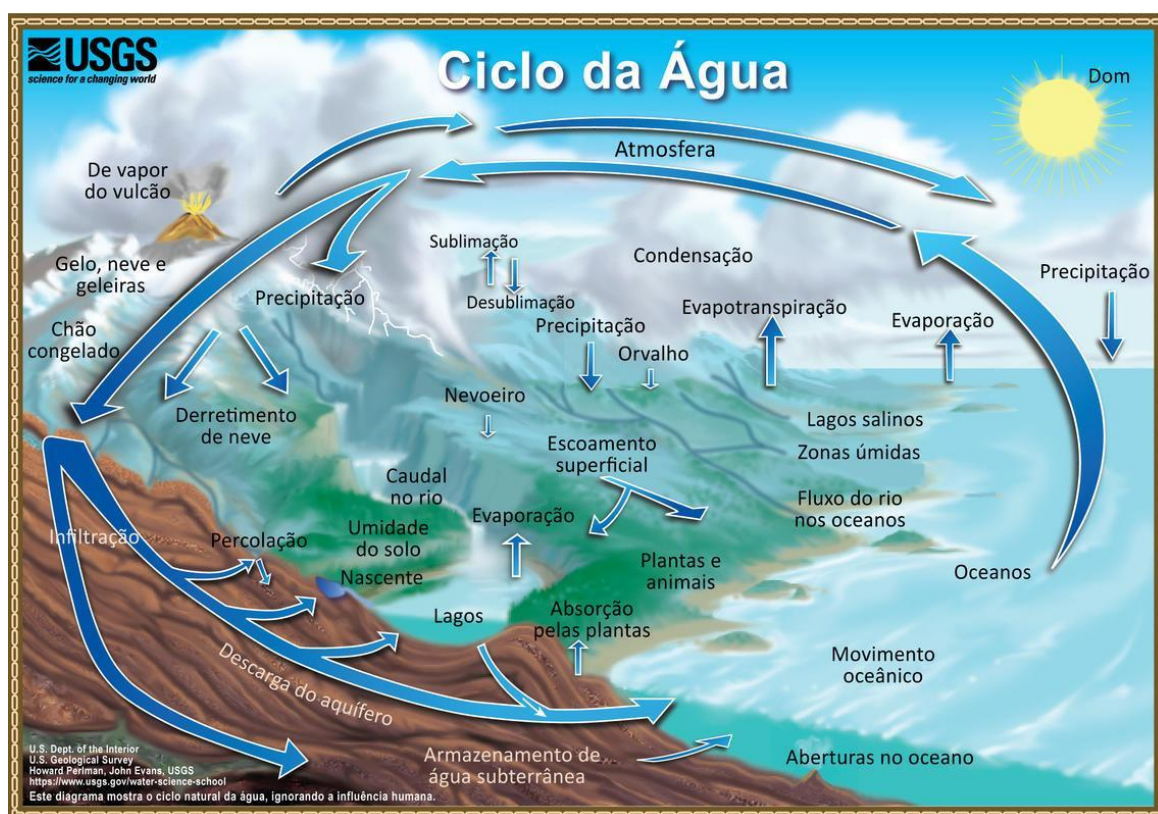


Figura 1 – Representação do Ciclo hidrológico (adaptado de USGS, Public Domain, 2006).

As águas subterrâneas, fase importante do ciclo hidrológico, sofrem de certa forma indireta ou diretamente, a influência de todas as outras fases, porém as de infiltração e escoamento superficial são as que atuam mais efetivamente nas recargas dos aquíferos, a partir da precipitação (Figura 2).

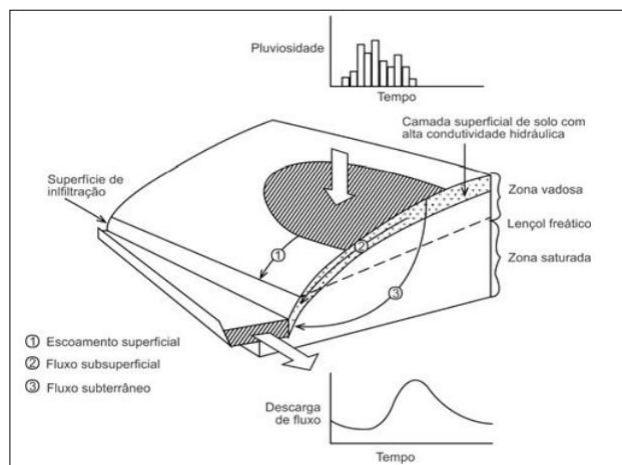


Figura 2 - Mecanismos de entrega da chuva para um canal de rio a partir de uma vertente em um pequeno tributário de uma bacia hidrográfica (adaptado de Freeze et Cherry, 1979).

O escoamento superficial é a fase do ciclo hidrológico que corresponde à parte precipitada que se desloca sobre a superfície do solo influenciado pelas forças gravitacionais (PRUSKI et al., 2003) e que dependendo dos fatores geomorfológicos, densidade de vegetação e declividade do terreno, pode ou não infiltrar no solo e compor a recarga do aquífero.

Sobre infiltração, Horton (1933) define que a precipitação quando atinge o solo infiltra-se em seu perfil a uma taxa que diminui com o tempo. Para qualquer tipo de solo existe uma curva de “capacidade de infiltração do solo” que vai diminuindo ao longo do tempo após o início da precipitação. Em solos argilosos o declínio desta curva é mais rápido pois sofre a influência da porosidade.

As curvas de infiltração versus tempo de Horton (1933) em conjunto com os dados de taxas de precipitação, infiltração e as taxas de condutividades hidráulicas, todas expressas em unidades de  $[L/T]$ , de acordo com os pesquisadores Rubin et al (1963) se tem que a taxa de infiltração final das curvas de Horton é numericamente equivalente à condutividade hidráulica saturada do solo. Também concluíram que quando a precipitação é maior que a condutividade hidráulica do solo e o tempo de precipitação for maior que o tempo necessário para a saturação do solo, será gerado o escoamento superficial.

Freeze e Cherry (1979) destaca ainda que em alguns ambientes hidrogeológicos as efetivas recargas subterrâneas podem ser casos isolados no tempo e no espaço sendo necessárias medidas de campo para complementar os cálculos, como as medidas de carga hidráulica acima e abaixo do nível d’água, para efetivamente chegar ao valor do volume que

infiltra, uma vez que uma parte fica armazenada no solo, outra sofre a evapotranspiração e tem ainda a quantidade utilizada pela vegetação.

## 2.2 RESERVAS SUBTERRÂNEAS

As reservas subterrâneas são aquelas águas que ficam acumuladas nos poros das rochas. A forma de estimar as reservas subterrâneas dividem opiniões acerca dos conceitos e formas de avaliação e/ou cálculo. Para Feitosa et al (2008), é inadequado se falar em cálculo de recursos hídricos subterrâneos ou até mesmo, cálculo de reservas. Segundo estes autores, a complexidade geológica dos reservatórios subterrâneos não oferecem uma satisfatória compreensão das suas geometrias, variação espacial e propriedades hidrodinâmicas.

Entretanto do ponto de vista da gestão, é necessário estimar essas reservas que fazem parte do potencial explorável da bacia como um todo. Diante disso os hidrogeólogos no intuito de realizar esta estimativa podem adotar os conceitos que Costa (1998) trouxe para uniformizar a terminologia e metodologia da estimativa de recargas conforme a seguir:

- Reserva permanente ( $R_p$ ): Volume hídrico acumulado no meio aquífero, não variável em decorrência da variação sazonal da superfície potenciométrica, em função da porosidade eficaz e do coeficiente de armazenamento; e
- Reserva reguladora ou renovável ( $R_r$ ): Volume de água acumulado no meio aquífero, em função da porosidade eficaz ou do coeficiente de armazenamento e variável anualmente em decorrência dos aportes sazonais de água superficial, do escoamento subterrâneo e dos exutórios.

Feitosa et al (2008), trazem mais dois conceitos de reservas:

- Reservas naturais, que são a soma das reservas permanentes e renovável, ou seja seriam as reservas totais existentes no aquífero ou em um sistema aquífero.
- Reservas de exploração definidas por *safe yield* (descarga segura), que é um conceito americano, atribuído originalmente por Meinzer em 1920. O conceito de *safe yield*, aborda as águas subterrâneas como um recurso hídrico, passível de ser utilizado nas inúmeras atividades econômicas e principalmente para consumo humano.

## 2.3 RECARGA E DESCARGA DE AQUÍFEROS

Os aquíferos possuem dois processos fundamentais definidores dos seus fluxos: Recarga e Descarga. A recarga pode ser definida como a entrada d'água no aquífero através da zona não saturada do solo tornando-se disponível no nível freático e parte dela adicionada

ao reservatório. A descarga de água subterrânea pode ser definida como o retorno da água da zona saturada através do fluxo do nível freático, quando este aflora e contribui assim com a formação de nascentes e manutenção da vazão de rios, por exemplo (FREEZE e CHERRY, 1979; SIMMERS, 1987; HEALY, 2010).

A origem das águas de recarga está em uma parte importante do ciclo hidrológico chamada de “infiltração”.

## 2.4 FLUXO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Os fluxos de águas subterrâneas são controlados por propriedades físicas conforme definições a seguir:

### 2.4.1 Lei de Darcy

Henri Darcy, em 1856 publicou em seu relatório sobre abastecimento de água na cidade de Dijon, França, a descrição sobre seu experimento de laboratório realizado para analisar o fluxo de água através de areias. Os resultados deram origem à lei hidrodinâmica que leva seu nome, a Lei de Darcy (Figura 3).

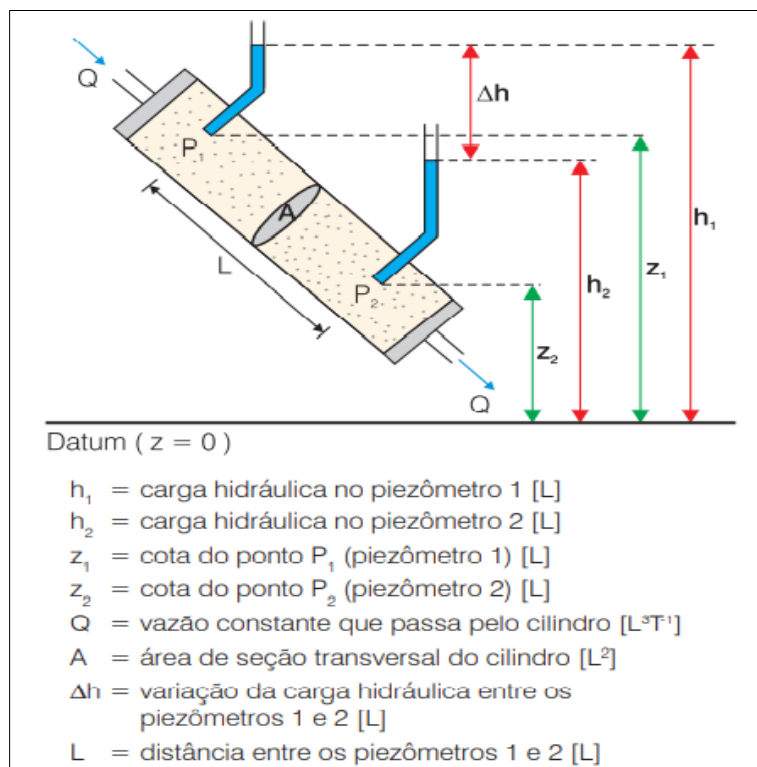


Figura 3- Esquema do aparato utilizado por Darcy em seu experimento (adaptado de Feitosa et al., 2008).

A equação do experimento pode ser anotada como descrita na equação 1:



$$Q = K \times A \left( \frac{h_1 - h_2}{L} \right) \quad \text{Equação 1}$$

Sendo que K é o coeficiente de proporcionalidade, chamado condutividade hidráulica (L/T).

#### 2.4.2 Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica é um parâmetro ligado ao tipo de material geológico que compõe o solo, sedimentos ou a rocha. A condutividade hidráulica tem valores altos para areias e cascalhos e baixos para argila e a maioria das rochas.

A expressão da condutividade hidráulica (K) em função dos parâmetros do meio e do fluido é mostrada na equação 2:

$$K = k\rho g / \mu = \text{kg}/\text{v} \quad \text{Equação 2}$$

Onde :

k = permeabilidade intrínseca do meio poroso (L<sup>2</sup>);

ρ = massa específica do fluido;

g = aceleração da gravidade;

μ = viscosidade dinâmica; e

v = viscosidade cinemática = μ/ ρ.

#### 2.4.3 Transmissividade

A transmissividade corresponde à quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente pela espessura saturada do aquífero. Pode-se considerar também como a taxa de escoamento através de uma faixa vertical do aquífero com largura unitária submetida a um gradiente hidráulico unitário, conforme blocodiagrama da figura 4.

A transmissividade é dada pela expressão da equação 3:

$$T = K.b \quad \text{Equação 3}$$

Sendo que:

T = Transmissividade em L<sup>2</sup>/T;

K = Condutividade hidráulica (L/T); e

B = espessura do aquífero (L).

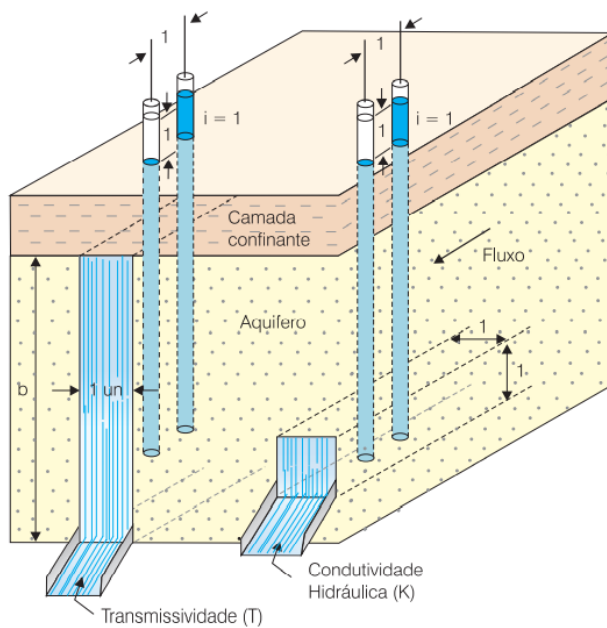


Figura 4 - Conceitos de transmissividade e condutividade hidráulica. Adaptado de Feitosa et al (2008).

#### 2.4.4 Coeficiente de armazenamento

O armazenamento específico ( $S_s$ ) de um aquífero é definido como o volume de água que uma unidade de volume do aquífero libera do armazenamento sob uma diminuição unitária na carga hidráulica. O coeficiente de armazenamento é dado pela equação:

$$S = S_s b \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$S$  é o armazenamento específico; e

$b$  é a espessura do aquífero.

#### 2.4.5 Mapa potenciométrico

A elaboração de um mapa potenciométrico representa um dos principais estudos de natureza hidrogeológica física a ser desenvolvido numa determinada área de ocorrência de um aquífero. Através desse mapa, possibilita-se o conhecimento de zonas de descarga, recarga e trânsito do aquífero, sentido do fluxo subterrâneo principal e fluxos secundários, dentre outras informações não menos importantes (De Lucena et al., 2004).

Quando se observa a superfície do mapa (Figura 5), existem linhas que são conhecidas como linhas equipotenciais e linhas de fluxo. As linhas equipotenciais representam pontos de mesma carga hidráulica dos aquíferos. Já as linhas de fluxo representam o sentido de fluxo da água no aquífero e são perpendiculares às linhas equipotenciais (Filho e Alencar, 2010).

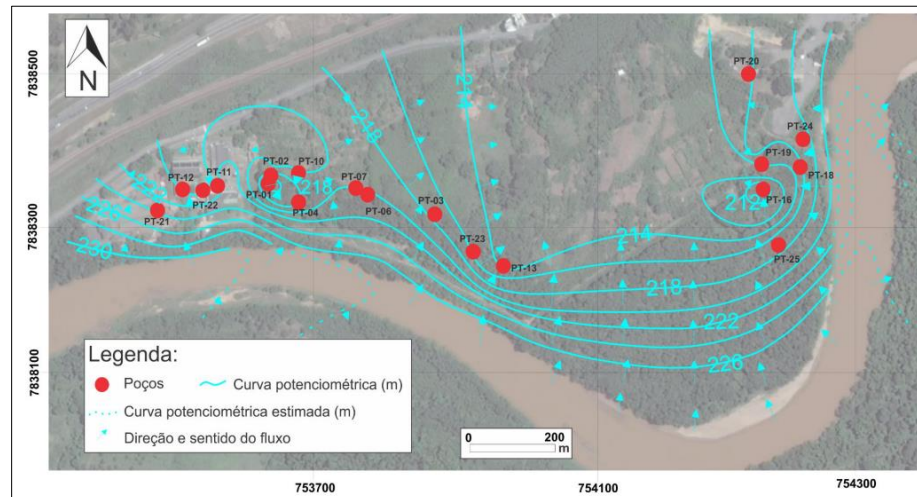


Figura 5 – Exemplo de mapa potenciométrico. (Adaptado de Oliveira, 2018).

## 2.5 INTERAÇÃO COM O FLUXO SUPERFICIAL

Segundo Winter (1998), compreender a interação entre água subterrânea e superficial é essencial para gestores e cientistas da água. A gestão de apenas um componente do sistema hidrológico, como um rio ou um aquífero, é parcialmente eficaz porque cada componente do ciclo hidrológico está em interação contínua com outros. Para o autor, a interação entre águas superficiais e subterrâneas é controlada por diversos fatores entre eles a geomorfologia do terreno, as características hidrogeológicas do aquífero e o clima. A figura 6 apresenta espacialmente como acontece essa interação.

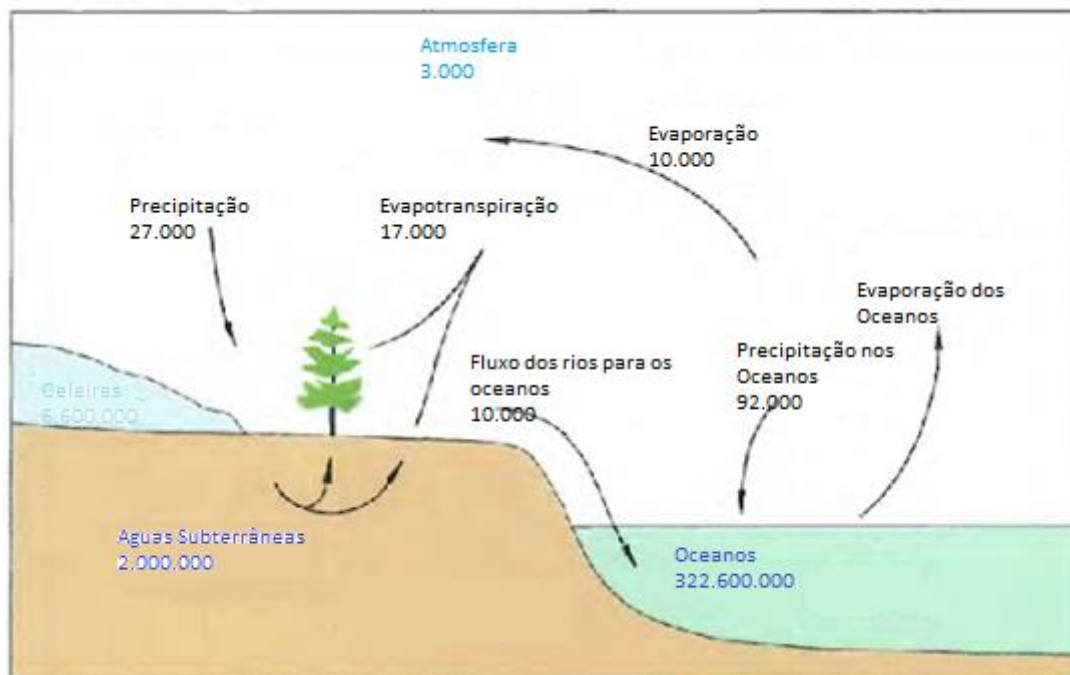


Figura 6 – Esquema identificando os fluxos (em  $m^3/ano$ ) na interação no ciclo hidrológico e as reservas de água (atmosfera, gelo e águas subterrâneas). Adaptado de Winter (1998).

Os padrões de infiltração também são afetados pelas características geológicas em função do tamanho, forma e orientação dos grãos de sedimentos.

### 2.5.1 Controles Geomorfológicos, Hidrogeológicos e Climáticos

As variações na superfície topográfica são muitas vezes refletidas na superfície potenciométrica dos aquíferos livres. Além disso, a condutividade hidráulica ( $K$ ) determina o padrão de fluxo da água subterrânea que, sobretudo, sofre a influência climática já que a chuva é a principal fonte de recarga da maioria dos aquíferos.

Tóth (1963) identificou três sistemas de fluxo d'água subterrânea em uma bacia hidrográfica, os quais foram denominados de sistema de fluxo local, intermediário e regional. No fluxo local, a água se move próximo à zona de descarga, que pode ser uma nascente, barragem ou lago. O sistema de fluxo intermediário é caracterizado por um ou mais altos e baixos topográficos localizados entre zonas de recarga e descarga. Já no fluxo regional a água percorre maiores distâncias e geralmente a descarga está associada a grandes rios, lagos, ou mesmo ao oceano (Figura 7).

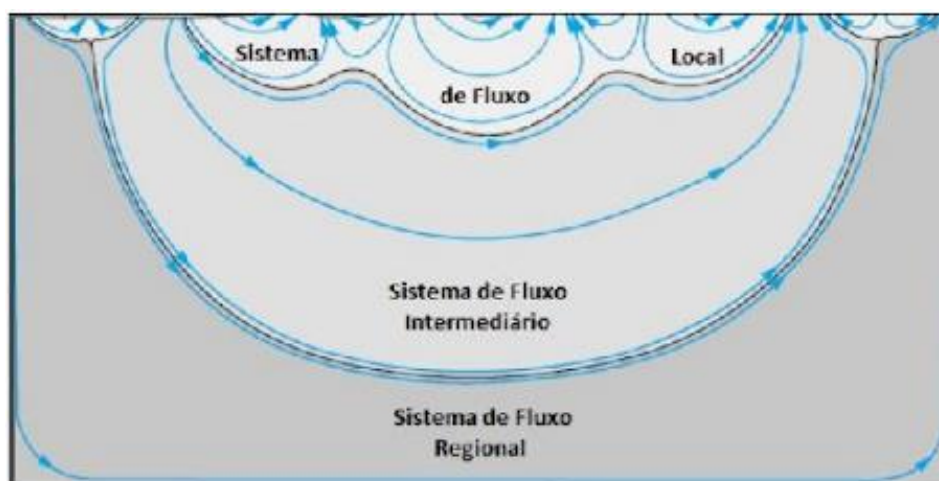


Figura 7 - Sistemas de Fluxo de Águas Subterrâneas. (Adaptado de Tóth, 1963).

Áreas com declividades acentuadas tendem a ter fluxo local predominante, enquanto áreas mais planas têm sistemas de fluxo predominantemente intermediário e local. A interação de nascentes, lagos e áreas alagadas (brejos, pântanos) com a água subterrânea é governada pela posição dos corpos d'água com relação ao sistema de fluxo d'água subterrânea (SOPHOCLEOUS, 2002).

O nível da água subterrânea tem uma estreita relação com os rios. Aqueles que recebem água dos aquíferos são chamados rios efluentes. Os influentes são aqueles que recarregam os aquíferos (KARMANN, 2000) conforme apresentado na Figura 8.

De acordo com Cunha (2017) é importante ressaltar que um rio pode ser efluente ou influente dependendo do período do ano, e do trecho do rio. No período seco, quando a água que está no curso d'água é praticamente o escoamento de base, verifica-se a condição efluente, no entanto, no período chuvoso o rio pode contribuir para o aquífero tornando-se influente.

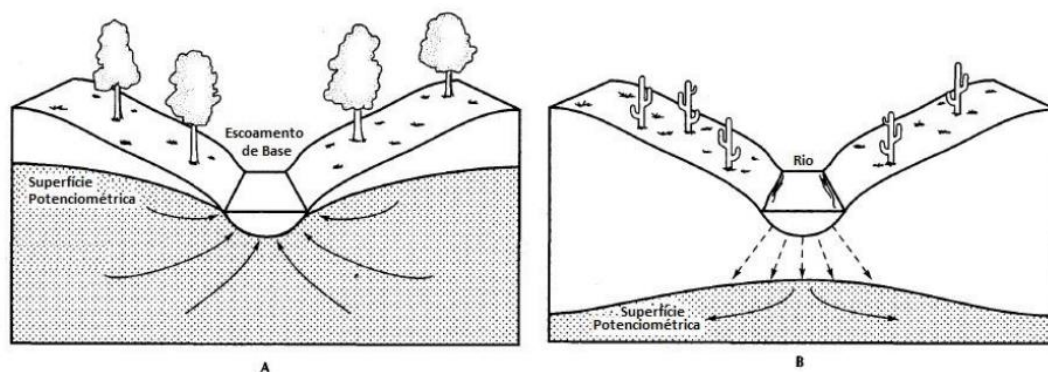


Figura 8 – Esquema mostrando o rio efluente (A) e influente (B). Adaptado de Fetter, 2001.

### 2.5.2 Intrusão da Cunha Salina

A maioria das grandes cidades brasileiras se localiza em áreas costeiras e faz uso de águas subterrâneas, porém nesses locais a exploração deve ser feita de modo bastante cauteloso, para evitar problemas com a intrusão marinha (Feitosa et al, 2008).

Intrusão marinha é o nome do avanço da cunha salina quando a cunha da água do mar avança e se mistura com as águas doces do aquífero (Cruz e Silva Jr., 2006). Portanto, as águas salinas ou salobras mesclam-se com relativa facilidade com as águas doces, o que eleva o risco de degradação da qualidade da água. Quando a água do mar penetra em um aquífero, basta apenas uma relação de 2% do volume de água do mar para 98% de água doce para toda a mistura não apresentar mais as características adequadas de potabilidade (Custodio, 1987). Em estado natural, antes de qualquer bombeamento, existe um gradiente hidráulico no aquífero que introduz um fluxo de água doce em direção ao mar, o que mantém a cunha salina em posição de equilíbrio. A água salgada, por possuir maior densidade, forma uma cunha penetrando pela parte inferior da região de água doce. A água doce permanece em contínuo escoamento em direção ao mar, esta pressão consegue manter a posição da cunha salina equilibrada, sendo esta a zona de mescla. O bombeamento excessivo da água continental rompe o equilíbrio e ocorre o avanço da cunha (Feitosa et al., 2000).

Existe uma fragilidade quanto às áreas costeiras, onde os aquíferos podem ser facilmente contaminados, gerando um problema que pode ser irreversível. O intenso estresse dos recursos hídricos na região litorânea é causado pelo interesse de moradia na proximidade

das praias, concentração de grandes cidades na costa do Brasil e até mesmo o lazer indiscriminado (Silva Jr. et al., 2000).

A figura 9 mostra como a implantação de poços de bombeamento em áreas costeiras afeta o equilíbrio da interface salina.

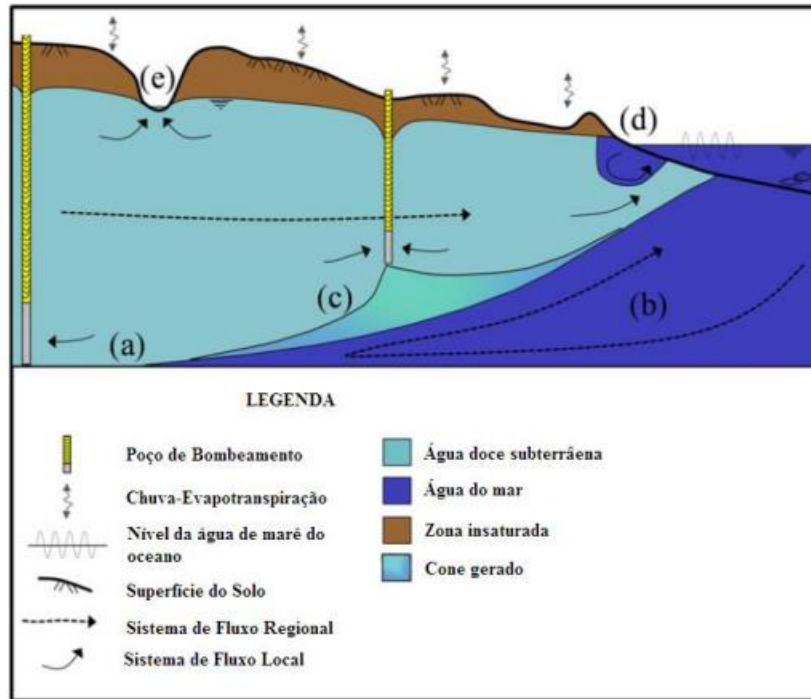


Figura 9 - (a) direção do fluxo da intrusão de cunha da água do mar; (b) Circulação de acordo com a densidade na zona da água do mar; (c) Formação de cone devido ao bombeamento de água; (d) Zona de recirculação da água superior do mar; (e) Afloramento na superfície das águas subterrâneas. Adaptado de Werner (2013).

Os problemas com os aquíferos costeiros devem ser encarados como um problema de gerenciamento (Feitosa et al., 2000), visto que é uma circunstância que pode causar o esgotamento das águas subterrâneas, assim como aumenta o risco da intrusão salina. Por representarem uma forma segura de armazenamento de água, as águas subterrâneas deveriam ter um controle maior e mais conservador quanto ao seu uso. Pequenas mudanças na carga e de fluxo podem causar grandes mudanças em aquíferos costeiros. A superexploração, por exemplo, pode agravar o avanço da cunha salina e destruir o aquífero como alternativa de fonte de abastecimento de água doce, portanto há a necessidade de gerenciamento adequado (GURGEL et al., 2004).

## 2.6 GEOFÍSICA APLICADA À HIDROGEOLOGIA

Para Braga (2016), a Geofísica, quando aplicada em estudos envolvendo as águas subterrâneas representa um subsídio fundamental na gestão e no planejamento para captação visando ao abastecimento, monitoramento e remediação de áreas contaminadas. O uso de métodos geoeletricos é uma possibilidade nesse contexto, considerando a sensibilidade de



mensuração indireta de parâmetros físicos alteráveis em presença de poluentes em solos e águas subterrâneas e a ampla cobertura para investigação em termos espaciais de forma rápida a um custo relativamente reduzido, quando comparado a técnicas tradicionais diretas de investigação. Os métodos geofísicos utilizados são os sísmicos, potenciais, eletromagnéticos, geotérmicos e geoeletricos, sendo que este último é o mais utilizado para mapeamento de aquíferos.

Os aquíferos sedimentares compostos por sedimentos inconsolidados e rochas sedimentares, ou seja, os aquíferos granulares são compostos por extratos arenosos, geralmente paralelos à superfície do terreno. A figura 10 mostra a metodologia recomendada por Braga (2006) para este tipo de aquífero que é a Sondagem Elétrica Vertical (SEV)/Eletrorresistividade (ER) e SEV ER - Polarização Induzida (IP) e seus produtos gerados.

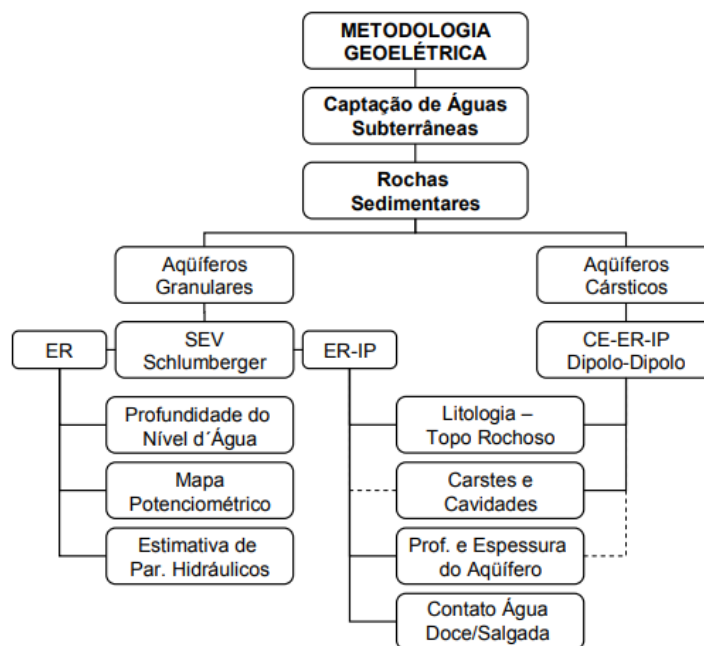


Figura 10 - Metodologia e produtos na captação de água subterrânea – Rochas Sedimentares. (Adaptado de Braga, 2006).

Na captação de águas subterrâneas, visando abastecimento, em terrenos cristalinos, o aquífero é constituído por falhas e/ou fraturas nas rochas, normalmente não paralelas à superfície do terreno, cujo objetivo principal da geofísica é o de posicionar os falhamentos e/ou fraturamentos em superfície, indicando o sentido de mergulho (Braga, 2006).

A técnica mais adequada sugerida, para a locação de poços para a captação em aquíferos de rochas cristalinas é o caminhamento elétrico – arranjo dipolo dipolo (CE-DD), com os métodos da eletrorresistividade e polarização induzida. A técnica do SEV, pode ser utilizada em situações específicas, com menor detalhe do que a técnica do CE. A figura 11

apresenta a metodologia recomendada em estudos visando à captação de águas subterrâneas em rochas cristalinas, com os principais produtos a serem obtidos. Com destaque para a determinação de falhas e fraturamentos.

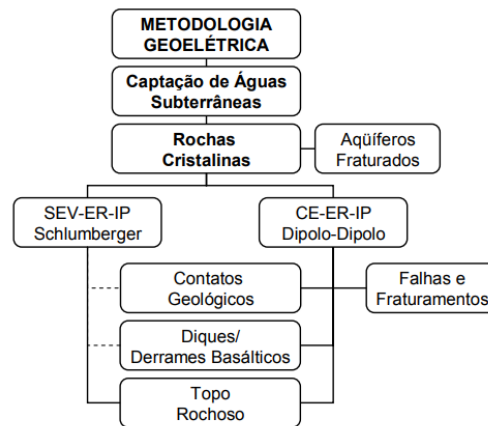


Figura 11 - Metodologia e produtos na captação de água subterrânea – Rochas Cristalinas. (Adaptado de Braga 2006).

O aquífero fraturado é composto por rochas compactas, nas quais a água ocorre ocupando fissuras, fendas ou fraturas desta rocha. Através do CE, pode-se posicionar, em superfície, a zona de anomalia condutora (associada aos falhamentos e/ou fraturamentos saturados), bem como estimar o mergulho da estrutura identificada. Recomenda-se, a utilização do arranjo dipolo-dipolo, com no mínimo três linhas topográficas de levantamento, espaçamento entre os dipolos  $x = 40$  metros e, no mínimo, cinco níveis de investigação, os quais atingiriam a uma profundidade teórica total de 120 metros, satisfatória para se identificar anomalias significativas (Braga, 2006).

## 2.7 TIPOS DE AQUÍFERO QUANTO AO MEIO

### 2.7.1 Fraturado

A permeabilidade dos aquíferos fraturados é dada pelas fraturas das rochas, portanto ocorrem em muitos tipos de formação rochosa. Segundo Feitosa et al., (2008) os meios porosos dominados por fraturas podem ser classificados em 4 categorias:

- 1 Formação fraturada;
- 2 Meio simplesmente fraturado;
- 3 Meio de dupla porosidade; e
- 4 Meio heterogêneo



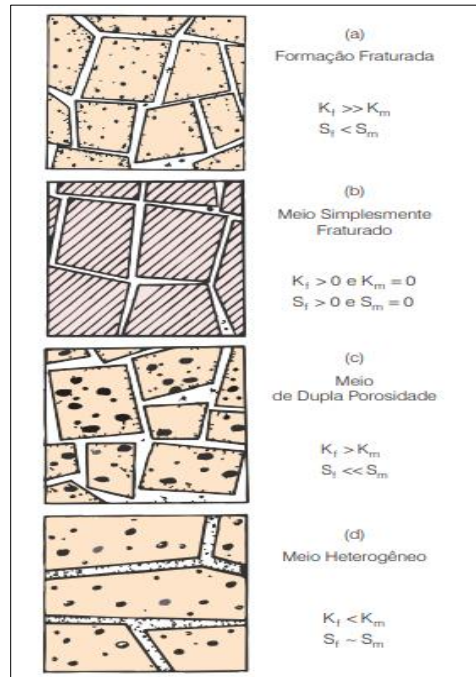


Figura 12- Classificação dos meios fraturados (Feitosa et al., 2008).

### 2.7.2 Intergranular

Os aquíferos intergranulares são compostos pelas rochas que contêm espaços vazios entre seus grãos minerais que a compõem. A porosidade dos aquíferos intergranulares é conhecida também como primária ou original (Feitosa et al., 2008).

### 2.7.3 Cárstico

Os aquíferos cársticos são o resultado de um processo chamado carstificação o qual envolve diversos fatores hidrogeológicos e principalmente como mecanismo básico, a dissolução de uma rocha carbonática (solúvel) fissurada (Feitosa et al., 2008).

## 2.8 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

### 2.8.1 Breve panorama dos cenários brasileiro e mundial de água subterrânea

De acordo com Gomes e Pereira (2020), a água subterrânea corresponde, aproximadamente, a cerca de 96% de toda a água doce disponível no mundo para consumo. Este manancial de suma importância é responsável pelo abastecimento de parte significativa da população mundial. Países como Arábia Saudita, Dinamarca e Malta, por exemplo, utilizam exclusivamente a água subterrânea para o abastecimento humano. Já na Áustria, Alemanha, Bélgica, França, Hungria, Itália, Holanda, Marrocos, Rússia e Suíça, pouco mais de 2/3 da água distribuída para a população provém dos aquíferos, o que equivale a valores em torno de 70% do consumo total desses países (MMA/SRH, 2007). É um cenário de alerta, uma vez que há um aumento da demanda sobre os aquíferos em nível mundial. O crescimento

populacional mundial aliado ao manejo incorreto dos recursos hídricos tem contribuído para a escassez, tanto superficial quanto subterrânea.

Ainda segundo Gomes e Pereira (2020), o maior desafio da população mundial no Século XXI será o de manter protegidas as reservas de água subterrânea dentro de um ambiente sustentável, já que no cenário atual os recursos têm sofrido grande desgaste devido às ações antrópicas, assim como há grande fragilidade nas medidas mitigatórias dos danos ambientais. Incrementando este indesejável cenário, presencia-se também as mudanças climáticas as quais interferem no regime de chuvas e por consequência alteram negativamente as recargas dos aquíferos. Estudos realizados pela NASA, no período entre 2003 e 2013, de caráter inédito, identificou um cenário preocupante para os principais aquíferos do mundo (FRANKEL, 2015). Existem 37 aquíferos de grande importância mundial, sendo que 21 deles encontram-se sob condição de *stress* hídrico, ou seja, com extração de água superior à recarga (entrada de água pelas chuvas) de acordo com a figura 13.

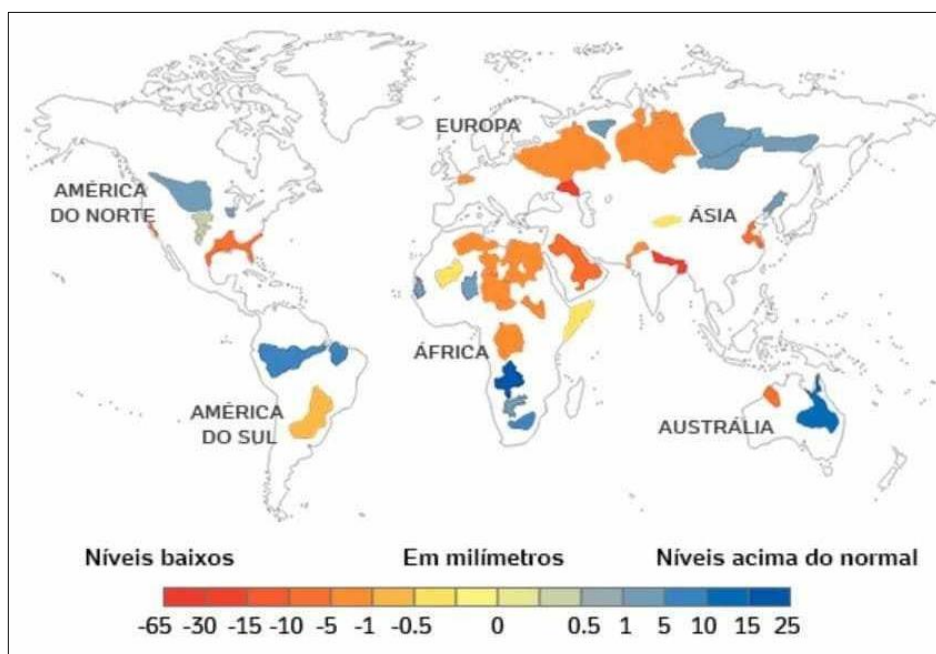


Figura 13– Estimativa de nível de água em aquíferos mundiais. (Fonte: Richey et al., 2015; Frankel, 2015).

No Brasil os aquíferos vêm sendo bastante explorados, especialmente nos últimos 20 anos, indicando que o cenário pode se agravar em poucas décadas, apesar do país dispor de uma imensa reserva permanente de água subterrânea, cujos valores até 2010 eram estimados em 112.300 km<sup>3</sup> de água, distribuídos da seguinte forma por região:

- a) 42.830 km<sup>3</sup> na região amazônica;
- b) 18.670 km<sup>3</sup> no nordeste; e
- c) 50.800 km<sup>3</sup> na região centro-sul/sudeste.

Essa distribuição demonstrava pouco conhecimento sobre os aquíferos amazônicos. Entretanto pesquisadores da Universidade Federal do Pará calcularam que o potencial de armazenamento na região chega a  $162.520 \text{ km}^3$ , destacando-se o Aquífero Alter do Chão, em relação aos aquíferos Solimões e Içá. Isso significa um aumento de  $119.690 \text{ km}^3$  em comparação com os  $42.830 \text{ km}^3$  anteriormente definidos, formando assim o que passou a ser chamado Sistema Aquífero Grande Amazônia – SAGA (Abreu et al., 2013; Lages, 2016).

Com o incremento do potencial de reserva de água subterrânea em  $119.690 \text{ km}^3$ , o valor total atual estimado passa para  $231.990 \text{ km}^3$  em todo o país.

Considerando um cenário em que todos os órgãos outorgantes do país adotassem o critério geral de exploração de 20% ou 25% das reservas renováveis, ainda assim o valor é bastante expressivo. Por exemplo, no caso do Sistema Aquífero Guarani – SAG (região centro-sul), que apresenta potencial de recarga anual ou reserva renovável de  $160 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$  possui uma reserva explorável de  $40 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$ , considerando 25%. No caso de 20% essa reserva passa para  $32 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$ . Em se tratando do Sistema Aquífero Grande Amazônia (SAGA), com volume 3,5 vezes superior ao SAG, a reserva explorável chega a  $140 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$  (25% da reserva renovável) ou a  $112 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$  (20% da reserva explorável). Presente na região Nordeste, o Aquífero Urucuia, localizado em grande parte no oeste da Bahia, envolve extensa porção da margem esquerda do rio São Francisco, como também o Sistema Aquífero Serra Grande/Pimenteiras/Cabeças, integrante da bacia do rio Parnaíba que abrange os estados do Piauí e Maranhão e parte nordeste do estado do Tocantins. Estudos de caráter hidrogeológico têm mostrado a existência de uma variação considerável na reserva explorável desses aquíferos, certamente associada às oscilações nas taxas de recarga, com valores entre  $2,25$  e  $5,24 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$  e média de  $4,07 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$  para o Urucuia, de acordo com Gaspar (2006) e de  $6,19 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$ , de acordo com Costa et al. (2012) e  $9,52 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$ , de acordo com Aguiar (2017) para o Sistema Serra Grande/Pimenteiras/Cabeças. Outra região do país com grande potencial em reservas de água subterrânea é a do Pantanal Mato-grossense, na região do estado do Mato Grosso do Sul, onde estão presentes os aquíferos Bauru, Serra Geral e Guarani, que, conjuntamente com outros, formam uma reserva expressiva de água subterrânea, com potencial renovável da ordem de  $50 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$  e reserva explorável de  $10 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$ , considerando a retirada de 20% do total de recarga anual, de acordo com normas vigentes do governo estadual do Mato Grosso do Sul (Mato Grosso do Sul, 2010; IMASUL, 2015).

Ainda que exista uma grande disponibilidade de água subterrânea no país, é seguro necessário que seu consumo seja de forma racional e controlada, já que a recarga dos

aquíferos está diretamente relacionada com o regime de chuvas, o qual tem se apresentado cada vez mais irregular e imprevisível frente às mudanças climáticas em curso no Planeta.

Deve-se considerar também a distribuição irregular da população em relação aos aquíferos. Por exemplo, no caso da região norte, que detém pouco mais de 2/3 ou 70% de toda a reserva de água subterrânea do país, mas com uma população correspondente a apenas 8,9% do total. A região centro-sul (sudeste/sul e centro-oeste), por sua vez, possui 21,9% da reserva total de água subterrânea e uma população em torno de 63,8% do total, Já a região nordeste, possui a penas 8,1% de toda água subterrânea do país e cerca de 27,3% da população, conforme a tabela 1.

Tabela 1 Distribuição da população e da água subterrânea por região brasileira, com os respectivos valores numéricos e percentuais. Adaptado de Gomes e Pereira (2020). Fonte: Feitosa et al (2008) ; Abreu et al.,(2013) ; IBGE (2018).

Região	População (milhões de pessoas)	%	Reservas água	
			subterrânea (Km <sup>3</sup> ) <sup>1,2</sup>	%
Norte	18,62	8,9	162.520	70
Centro- Sul	133,15	63,8	50.800	21,9
Nordeste	56,73	27,3	18.670	8,1

É evidente que o Brasil possui uma reserva bastante expressiva de água subterrânea, mas se não for manejada de forma sustentável, pode ficar comprometida a médio e longo prazo. Embora exista uma vasta legislação acerca da proteção dos recursos hídricos, entre eles os subterrâneos, o país padece de uma política de gestão efetiva e integrada, com uma visão de holística envolvendo os municípios, os estados e a união. Isso pode ser explicado, por exemplo, pela falta de controle de perfuração de poços profundos em quase todos os estados, pela ausência de um plano de proteção das áreas de afloramento ou de recarga de aquíferos, pela falta de uso controlado e racional da água nos setores agrícola, urbano e industrial, que assim contribuem para o aumento da pressão de uso dos aquíferos (Gomes e Pereira, 2020).

### 2.8.2 Gestão integrada dos recursos hídricos

As águas superficiais e subterrâneas não são recursos isolados, mas sim estão interligados no ciclo hidrológico, interagindo mutuamente. Desta forma, devem ser gerenciados de forma integrada e não isoladamente.

Muito embora a Lei Federal 9.433/1997 (Lei das Águas) traga como instrumento de gestão a integração entre os recursos hídricos, ainda estão muito incipientes os estudos hidrogeológicos das águas subterrâneas nos órgãos gestores brasileiros.

No Brasil poucos estados utilizam algum critério relacionado à disponibilidade hídrica dos aquíferos para a concessão das outorgas, fato que abre uma lacuna na integração entre as águas uma vez que para as águas superficiais não há outorga sem um balanço hídrico, mas a questão é onde fica a disponibilidade hídrica subterrânea dentro deste balanço?

Os estados do Mato Grosso do Sul e Paraná, por exemplo, adotam como vazão outorgável, 20% das reservas renováveis dos aquíferos, seguindo a orientação da ANA, sendo que o Paraná utiliza o critério de 10% das reservas renováveis para os poços do Sistema Aquífero Guarani.

Em São Paulo, a Resolução CRH 52/2005 traz em seus artigos as seguintes relações:

*Artigo 10 - A investigação confirmatória sobre a quantidade de água em aquíferos livres será expressa pela relação entre os fatores consumo (C) e disponibilidade (Q), pelas equações discriminadas no APÊNDICE II podendo ser utilizados outros métodos mais completos, quando disponíveis.*

*§1º - A relação entre os fatores C (consumo) e Q (disponibilidade) permitirá quantificar o saldo hídrico subterrâneo da bacia ou sub-bacia hidrográfica, sendo que, se a relação C/Q for maior ou igual a 0.75, a área será definida como área crítica quanto à disponibilidade da água subterrânea e passível de ser classificada como Área Confirmada de Restrição e Controle (ARC-CO) à captação e uso das águas subterrâneas.*

*§2º - No caso de aquíferos confinados, onde a recarga dá-se, apenas, em parte da bacia hidrogeológica, os critérios para definição do saldo hídrico serão estabelecidos pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE).*

O Amazonas, através da Resolução CERH 01/2016, estabelece os critérios de outorga definindo rebaixamentos máximos de acordo com as finalidades. Por exemplo, para Abastecimento Público, Indústria, Irrigação e Mineração o rebaixamento permitido é de até 45 metros. Comércio e serviços, rebaixamento máximo de 40 metros e uso doméstico, de 10 metros.

### 2.8.3 Arcabouço legal

Examinando a Constituição Federal de 1988, em seu artigo 26 é destinado aos Estados a dominialidade das águas subterrâneas e, conseqüentemente, a gestão e regulação dos seus usos:

*“Art. 26 - Incluem-se entre os bens dos Estados:*

*I - as águas superficiais ou subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito, ressalvadas, neste caso, na forma da lei, as decorrentes de obras da União;” (Constituição Federal, 1988).*

Muito embora o artigo 22 da Constituição deixe claro que compete privativamente à União legislar sobre as águas, o seu artigo 24 permite que Estados Municípios e União legislem concorrentemente sobre a defesa do solo e dos recursos naturais, proteção do meio ambiente e controle da poluição. Assim como também o artigo 23 da Carta Magna diz que compete às três esferas proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas, conforme segue:

*“Art. 22. Compete privativamente à União legislar sobre:*

*IV - águas, energia, informática, telecomunicações e radiodifusão;*

*Art. 23. É competência comum da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios:*

*VI - proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas;*

*Art. 24. Compete à União, aos Estados e ao Distrito Federal legislar concorrentemente sobre:*

*VI - florestas, caça, pesca, fauna, conservação da natureza, defesa do solo e dos recursos naturais, proteção do meio ambiente e controle da poluição;” (Constituição Federal, 1988).*

Destaca-se ainda o artigo 25 (da Constituição Federal de 1988) que oportuniza aos Estados a organizarem-se e regerem-se pelas Constituições e leis que adotarem, observados os princípios da Constituição Federal, conforme segue:

*“Art. 25. Os Estados organizam-se e regem-se pelas Constituições e leis que adotarem, observados os princípios desta Constituição.*

*§ 1º São reservadas aos Estados as competências que não lhes sejam vedadas por esta Constituição.” (Constituição Federal, 1988).*

Neste sentido, em relação aos recursos hídricos, o artigo 171 da Constituição do Estado do Rio Grande do Sul (1989) dispõe:

*“Art. 171 - Fica instituído o Sistema Estadual de Recursos Hídricos, integrado ao sistema nacional de gerenciamento desses recursos, adotando as bacias hidrográficas como unidades básicas de planejamento e gestão, observados os aspectos de uso e ocupação do solo, com vista a promover:*

*I - a melhoria de qualidade dos recursos hídricos do Estado;*

*II - o regular abastecimento de água às populações urbanas e rurais, às indústrias e aos estabelecimentos agrícolas.*

*§ 1.º O sistema de que trata este artigo compreende critérios de outorga de uso, o respectivo acompanhamento, fiscalização e tarifação, de modo a proteger e controlar as águas superficiais e subterrâneas, fluentes, emergentes e em depósito, assim como racionalizar e compatibilizar os usos, inclusive quanto à construção de reservatórios, barragens e usinas hidrelétricas.*

*§ 2.º No aproveitamento das águas superficiais e subterrâneas será considerado de absoluta prioridade o abastecimento das populações.*

*§ 3.º Os recursos arrecadados pela utilização da água deverão ser destinados a obras e à gestão dos recursos hídricos na própria bacia, garantindo sua conservação e a dos recursos ambientais, com prioridade para as ações preventivas. (grifo nosso, Constituição do Estado do Rio Grande do Sul, 1989).*

Com o objetivo de assegurar o controle do uso e dos parâmetros de qualidade das águas subterrâneas e superficiais, foi promulgada em 08 de janeiro de 1997, a Lei Nº 9.433 (regulamentada pelo Decreto Nº 2.612/98) a qual estabeleceu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e instituiu o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Neste contexto, a água passou a ser considerada como bem dotado de valor econômico e que sua exploração deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas, sua gestão ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público e dos usuários. É importante observar que com relação à gestão das águas subterrâneas existe a particularidade que vai de encontro com o conceito de unidade de gestão uma vez que a bacia hidrográfica é a unidade territorial definida como base para a implementação da PNRH e atuação do SINGREH, e esta, na maioria dos locais, não é espacialmente coincidente com a bacia hidrogeológica (Corrêa, 2011).

O CNRH, através da Resolução Nº 15 de 11 de janeiro de 2001, estabeleceu diretrizes para a gestão das águas subterrâneas, considerando a atuação dos diversos agentes (municipais, estaduais e federais) que detêm competências que interferem na quantidade e na qualidade da água subterrânea. A resolução, portanto, buscou o preenchimento de algumas lacunas deixadas nas legislações anteriores, especialmente relacionadas ao enquadramento dos corpos de água subterrânea, outorga, cobrança e do gerenciamento integrado por meio de

Sistema de Informações de Recursos Hídricos (SINGREH) nos âmbitos federal, estadual e do Distrito Federal.

A Resolução Nº 15/2001 estabelece ainda que os SINGREHs das duas esferas (Federal, Estadual e Distrital) deverão promover a uniformização de diretrizes e critérios para a coleta de dados e elaboração de estudos hidrogeológicos necessários à identificação e caracterização da bacia hidrogeológica, conforme o artigo 4º da referida resolução, e os Comitês de Bacias Hidrográficas envolvidos deverão buscar o intercâmbio e a sistematização dos dados gerados (Freire, 2002). Também de responsabilidade dos sistemas é a proposição de mecanismos de estímulo aos Estados, Municípios e ao Distrito Federal para a proteção das áreas de recarga dos aquíferos e a adoção de práticas de reuso e de recarga artificial com vistas ao aumento das disponibilidades hídricas e da qualidade da água. Estas práticas deverão resultar no fomento de estudos para o desenvolvimento dos usos racionais e práticas de conservação dos recursos hídricos subterrâneos, assim como a proposição de normas para a fiscalização e controle das mesmas.

A Resolução Nº 22, de 24 de maio de 2002, também do CNRH, estabelece algumas diretrizes complementares para os Planos de Recursos Hídricos, e no que tange a água subterrânea destaca os seguintes aspectos:

1. Considerar os usos múltiplos, as peculiaridades do sistema aquífero e os aspectos quantitativos e qualitativos relacionados ao mesmo, de modo a promover o desenvolvimento sustentável;
2. Com a finalidade de se considerar a gestão integrada dos recursos, deverá constar nos Planos de Recursos Hídricos a caracterização dos aquíferos e as inter-relações com os demais corpos hídricos superficiais e subterrâneos e com o meio ambiente de modo geral;
3. As informações e os dados sobre as águas subterrâneas devem constar nos planos e incluir, no mínimo, por sistema aquífero existente: a) caracterização espacial; b) cômputo das águas subterrâneas no balanço hídrico; c) estimativas de recargas e descargas, tanto naturais quanto artificiais; e d) estimativas de reservas permanentes.

Em nível mundial, Corrêa (2011) aponta como é gerenciado o recurso hídrico em alguns países como descrito a seguir:

➤ Alemanha

Na Alemanha as águas superficiais e subterrâneas são utilizadas até o limite que não prejudique o uso de outros usuários e sua cobrança data da década de 70. Para todos os usos é



necessária a expedição de uma licença ou a aquisição de direito permanente. As licenças podem ser temporárias ou permanentes, podendo, entretanto, serem cassadas a qualquer momento se a proteção dos recursos assim o justificar. Um direito adquirido, por outro lado, normalmente não pode ser retirado, mas as autoridades levam em consideração os interesses dos outros usuários e o interesse geral pelo recurso. A outorga de direito adquirido é limitada a usos cujos impactos sejam perfeitamente conhecidos e que não seriam satisfeitos com uma licença simples. Na maioria dos estados existe a cobrança pela utilização dos recursos hídricos, além da taxa de esgoto. No estado de Hessen, por exemplo, a cobrança pela retirada de água subterrânea para abastecimento público é de US\$ 0,30/m<sup>3</sup>, para abastecimento industrial US\$ 0,50/m<sup>3</sup> e para uso em refrigeração US\$ 0,70/m<sup>3</sup>. Parte dessa taxa estadual é aplicada em projetos de conservação e recuperação de ecossistemas.

➤ França

Na França a cobrança pelo uso da água ocorre desde 1964 e o valor é estabelecido pelo Conselho de Administração da Agência de Água, baseando-se nos investimentos previstos para os planos de bacias. A cobrança para os usuários domésticos e industriais considera três elementos básicos: o volume de água derivado no período de estiagem; o uso consuntivo (o produto do valor anterior por um fator de consumo); e o local de captação. No caso do usuário agrícola, a cobrança tem como base o volume de água captado durante a estação da estiagem. Os valores cobrados por captação de água bruta variam, em função da bacia, de US\$ 0,50 a US\$ 1,6/mil m<sup>3</sup> para captação de água superficial e de US\$ 1,6 a 1,8/mil m<sup>3</sup> para água subterrânea. A experiência da França demonstrou que a cobrança tornou-se possível somente quando se obteve um consenso entre as diversas regiões e que aquelas onde a situação era considerada mais crítica, a aceitação, de modo geral, ocorreu com maior naturalidade.

➤ Holanda

A Holanda é considerada um dos países mais industrializados da Europa, mas também possui em grande parte de seu território agricultura intensiva. Apesar da suficiente disponibilidade de recursos hídricos, os níveis de água subterrânea estão sendo rebaixados devido ao grande aumento da exploração para utilização nos processos agro-industriais. O sistema de gestão do uso dos recursos hídricos, portanto, é baseado em dois pontos chave: grande número de organizações que exercem a gestão qualitativa e quantitativa da água (o que ocasiona um alto nível de descentralização); e uso de ferramentas comunicativas de consenso tais como consultas, recomendações, planejamentos e acordos voluntários. A estrutura legal que rege a utilização da água superficial e da água subterrânea não é integrada, ou seja, ocorre

por meio de instrumentos diferentes, o que não significa que a avaliação seja feita de forma separada. O principal documento usado para a exploração de água subterrânea é o Ground Water Act. De modo geral, o documento estabelece que as grandes abstrações devam requerer um documento de permissão, as médias o chamado registro e as pequenas abstrações não necessitam de qualquer autorização. Em geral, as províncias que compõem o país (total de 12) definem os limites de extração de água de suas regiões e as permissões são delegadas às denominadas waterboards, uma vez que essas são responsáveis pela gestão da água superficial, e em muitos aquíferos da Holanda o nível destes depende diretamente dos níveis da água superficial. Assim, observa-se que as captações de água subterrânea no país são consideradas, em alguns locais, complexas uma vez que ocasionam efeitos negativos diretos nos fluxos de base de drenagens superficiais.

➤ Índia

Na Índia a exploração da água subterrânea ocorre, na maior parte, por meio de fazendeiros proprietários de poços em locais onde há uma alta demanda. Embora seja reconhecido que a venda de água por fazendeiros no país já ocorra há séculos, os primeiros registros oficiais datam de 1960. Com o acelerado crescimento econômico registrado no país especialmente na última década, os investimentos na exploração de água subterrânea têm se voltado para o desenvolvimento de mecanismos para reduzir as perdas nos processos de extração e transporte. Observa-se, portanto, que não há uma legislação para a gestão do uso da água subterrânea e os preços são determinados pelo custo de extração e pela elasticidade da demanda.

➤ Estados Unidos

Nos Estados Unidos a outorga de água subterrânea é feita de diferentes formas nos estados, sendo que, em geral, está vinculada à propriedade da terra. Atualmente, o país ainda se encontra em transição da Regra Inglesa para a Regra Americana que, conforme abordado anteriormente, leva em consideração a exploração sustentável do recurso pelo proprietário da terra. Alguns estados do oeste americano definem como públicas as águas fronteiriças e o direito de exploração de água subterrânea é concedido com base no tipo de uso, bem como as outorgas individuais, e são lançadas de acordo com a ordem de solicitação.

➤ Chile

De acordo com a legislação chilena, atualmente regida pela Lei Nº 1.122 de 1981, toda a água no território é de propriedade do Estado onde o mesmo outorga uma concessão de

direito de aproveitamento da água (subterrânea ou superficial) a particulares, sem prioridades para uso. A lei, chamada de Novo Código de Águas, concede os direitos de uso de modo permanente ao titular, tendo para isso se fundamentado na teoria econômica do livre mercado, onde a eficiência e melhoria do produto assumem melhores condições na medida em que existe a concorrência. Assim, a lei permite a transferência da outorga entre outros usuários, desde que o uso permaneça o mesmo. Ressalta-se, contudo, que a cobrança data da década de 50, quando o primeiro código foi criado e permaneceu em vigor por quase 20 anos, tendo sido substituído pelo Código de Águas de 1969 e, por fim, pela Lei Nº 1.122/81.

➤ Colômbia

A cobrança para qualquer tipo de uso da água é legalmente permitida na Colômbia desde 1942, embora tenha sido implementada com muitas restrições e com valores bastante baixos somente a partir de 1974. Assim, as poucas cobranças aplicadas tinham a função de cobrir exclusivamente os custos de operação dos sistemas de monitoramento. Nos poucos casos em que se conseguiu superar as restrições e a aplicação da cobrança foi bem sucedida, consta que a atuação induziu à mudanças nos padrões de uso da água, especialmente com reduções no consumo e nos aspectos relacionados à poluição.

➤ Costa Rica

A chamada Ley das Aguas de 1942 da Costa Rica determina que as águas do país são de domínio público, propriedade nacional, e as águas consideradas como privadas são aquelas derivadas da chuva e que caem em propriedade particular, de modo que podem ser aproveitadas por meio de obras que as armazenem. Ainda, as águas subterrâneas são consideradas como pertencentes ao proprietário da terra. Somente não é necessária a concessão nos casos em que a água seja destinada ao abastecimento de populações (inclusive no interior das propriedades) para uso doméstico e suprimento de necessidades ordinárias. Para todos os demais usos é necessária a concessão de outorga, que vigora por um período máximo de 30 anos, podendo caducar nos casos em que não seja explorada por um período consecutivo de 3 anos ou que mantenha um uso diferente daquele para o qual foi outorgada durante um período de 3 a 5 anos. As tarifas diferem de acordo com o uso e com a origem do recurso, se a captação é superficial ou subterrânea.

#### 2.8.3.1 Outorga de Direito de Uso da Água

O direito de uso dos recursos hídricos (outorga) é um dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos instituído pela Lei Federal Nº 9.433/ 1997 – Lei das Águas – e

que tem o objetivo de assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à ela.

### *DOS INSTRUMENTOS*

*Art. 5º São instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos:*

...

*III - a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos;*

...

A outorga é o ato administrativo mediante o qual o poder público outorgante (União, estado ou Distrito Federal) faculta ao outorgado (requerente) o direito de uso de recursos hídricos, por prazo determinado, nos termos e nas condições expressas no respectivo ato (ANA, 2011).

No âmbito estadual no Rio Grande do Sul, a Lei Estadual Nº10.350, de 30 de dezembro de 1994, em seu artigo 29, estabeleceu a obrigatoriedade da outorga para os usos que alterem as condições qualitativas e quantitativas das águas superficiais ou subterrâneas.

O Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento (DRHS), parte da matriz institucional de gestão dos recursos hídricos no Estado, através do Conselho de Recursos Hídricos é o órgão que normatiza os processos de pedido de outorga.

O Decreto Estadual Nº 42.047/2002 regulamenta o gerenciamento e a conservação das águas subterrâneas e dos aquíferos no Estado do RS. O decreto traz em seu artigo segundo, a necessidade de aprofundar os estudos hidrogeológicos bem como aponta na direção da integração entre águas subterrâneas e superficiais.

*Art. 2º As águas subterrâneas serão objeto de programas permanentes de pesquisa, conservação e proteção, visando ao seu melhor aproveitamento.*

*Art 3º Incluem-se no gerenciamento das águas subterrâneas as seguintes ações:*

*I Avaliação dos recursos hídricos subterrâneos e o planejamento do seu aproveitamento racional;*

*II Aplicação de medidas relativas à proteção e conservação dos recursos hídricos subterrâneos.*

*Parágrafo Único - As interações com as águas superficiais, observadas no ciclo hidrológico, sempre serão consideradas na administração do aproveitamento das águas subterrâneas.*

### 2.8.3.2 Critérios de Outorga

No Estado do Rio Grande do Sul, o critério para outorga de águas superficiais é estabelecido na Resolução CRH 141/2014, que institui o Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH) em seu artigo 11, onde se lê:

*Art.11. Enquanto não estiver concluído o Plano de uma determinada Bacia Hidrográfica, a vazão de referência para orientar a outorga de direito de uso da água será aquela com garantia de 90% (noventa por cento) de permanência — Q90. (Resolução CRH 141/2014).*

Para as águas subterrâneas o critério analisado é baseado nos dados dos ensaios de bombeamento. Se o poço produz a vazão demandada e apresenta uma curva estável, a outorga é concedida.

Em 2018, o DRHS/SEMA (Portaria SEMA 110/2018) implantou o Sistema de Outorga do Rio Grande do Sul (SIOUT RS) onde todos os processos de solicitação de outorgas passaram a ser exclusivamente online. O SIOUT RS permite *uploads* dos documentos necessários para a obtenção da Portaria de Outorga, bem como os técnicos analistas utilizam o sistema para suas análises e apontamentos das eventuais inconsistências.

Pelo SIOUT RS é possível obter a Portaria de Autorização Prévia automaticamente, sem passar pela análise dos técnicos do DRHS. A falta de uma vazão outorgável para as águas subterrâneas permite que ocorram as perfurações deliberadamente em todo o Estado. Atualmente existem 5.927 portarias de Autorização Prévia emitidas automaticamente pelo SIOUT, destes, apenas 1.744 obtiveram a Portaria de Outorga (SIOUT RS, 2022). Essa lacuna que demonstra a irregularidade das captações é facilitada, dentre outras razões como a falta de cadastramento por parte das perfuradoras e, também, por não existir a vazão limitadora outorgável do aquífero.

Desta forma se faz necessário estabelecer limites para exploração da água subterrânea. Entretanto, no DRHS, a Divisão de Planejamento (DIPLA) que é a responsável pelos estudos hídricos e estabelecimento de diretrizes de gestão carece de hidrogeólogos em sua equipe, o que leva a buscar na terceirização os serviços necessários, através de licitação pública.

### 2.8.3.3 Termo de Referência (TR)

Para a contratação de obras ou serviços, a administração pública deve abrir uma licitação pública para ampla concorrência. A licitação é um procedimento administrativo onde

deve ser observada a igualdade entre os participantes e ser selecionada a proposta mais vantajosa para administração pública.

A base constitucional mais genérica da obrigatoriedade de licitar encontra-se no inciso XXI do artigo 37 da Constituição Federal de 1988:

*Artigo 37, inciso XXI – Reservados os casos especificados na legislação, as obras, serviços e alienações serão contratados mediante processo de licitação pública que assegure igualdade de condições a todos os concorrentes, com cláusulas que estabeleçam obrigação de pagamento, mantidas as condições efetivas da proposta, nos termos da lei, o qual somente permitirá as exigências de qualificação técnica e econômica indispensáveis à garantia do cumprimento das obrigações;*

A lei que regulamenta as licitações da administração pública é a Lei Federal Nº 8.666/1993 alterada pela Lei Federal Nº 14.133/2021, que estabelece que as modalidades são descritas como o Pregão Eletrônico, Leilão Eletrônico, Concorrência, Concurso e Diálogo Competitivo.

Os estudos hidrogeológicos podem ser definidos como serviços técnicos especializados e de grande valor, por isso o recomendável é que o certame seja feito por concorrência do tipo técnica e preço, onde serão avaliados os quesitos técnicos das empresas e os melhores orçamentos.

No Brasil encontram-se poucos editais de licitação cujos objetos são as contratações de estudos hidrogeológicos. Em geral são estudos mais voltados para a regularização e cadastro de poços e descrição geológica do aquífero, mas poucos buscam o balanço hídrico ou estimativas de recarga.

Desta forma este trabalho visa fornecer os subsídios necessários para que possa ser elaborado um TR especificamente para determinação de vazão outorgável.

### 3 METODOLOGIA

Foi utilizada como método a pesquisa bibliográfica que objetivou mapear os métodos de cálculo de recarga de aquíferos presentes na literatura e analisar a produção acadêmica referente ao assunto e o que tem sido produzido em dissertações de mestrado, teses de doutorado, publicações em periódicos e comunicações em anais de congressos e de seminários.

Realizou-se a busca por publicações que contemplassem a temática de recarga de aquíferos. As bases de referência de dados foram Google Acadêmico (<https://scholar.google.com.br/>), Scientific Electronic Library Online – Scielo (<http://scielo.org/php/index.php>) e no portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes (<http://periodicos.capes.gov.br/>).

A partir desta primeira seleção, utilizou-se como critério para uma filtragem mais específica, a leitura dos títulos de cada produção e seleção daquelas em que ocorresse obrigatoriamente a presença dos termos “recarga” e “aquíferos”, ou em que houvesse relação com balanço hídrico de aquíferos ou vazões outorgáveis para águas subterrâneas.

Após a leitura das publicações foram analisadas as bibliografias utilizadas e feito uma compilação das mais citadas e mais relevantes utilizadas no meio acadêmico.

Procurou-se embasar a escolha dos métodos para cálculo de recarga de aquíferos, principalmente, em trabalhos testados no Estado do Rio Grande do Sul. Desta forma, destaca-se a tese de doutorado de Bortolin (2018), cujo estudo abrangeu a Bacia Hidrográfica do Taquari Antas, localizada na porção norte do estado.

#### 3.1 DESENVOLVIMENTO DOS TRABALHOS

Os métodos escolhidos para fazer parte do trabalho compõem a forma de obter um modelo conceitual de estimativa de recarga, parâmetro fundamental para a construção da política de outorgas.

Os valores de estimativa de recarga devem envolver estudos de mecanismos de fluxos de água subterrânea em um sistema hidrológico, que pode ser realizado por meio da construção de modelos conceituais. A análise cuidadosa de dados climatológicos, de vazão dos rios, de uso do solo, de níveis de água subterrânea, da química das águas superficiais e subterrâneas, das propriedades físicas e hidráulicas do solo, é determinante e faz parte do primeiro passo para melhorar a compreensão dos fenômenos envolvidos no sistema hidrológico. O desenvolvimento de um modelo conceitual dos processos de recarga possui diferentes etapas.

Em um modelo conceitual de recarga é necessário considerar os fluxos das águas superficiais e das águas subterrâneas e como eles interagem. Esse tipo de interação é observado através da diferença de carga hidráulica entre as águas subterrâneas e as águas superficiais, de acordo com a Lei de Darcy. Além disso, o tipo de solo deve ser avaliado, pois elevados valores de condutividade hidráulica permitem maiores taxas de recargas localizadas ou, ainda, facilita, o fluxo de água do aquífero para o rio (Bortolin, 2018).

De acordo com Bortolin (2018), não há um método capaz de medir diretamente a recarga subterrânea e para que se obtenha uma confiabilidade é preciso empregar uma variedade de métodos, reduzindo as incertezas.

A seguir são descritos diferentes métodos utilizados para estimativa de recarga, considerando as suas limitações e variáveis envolvidas, baseados no trabalho testado por Bortolin (2018) e que abrange de forma bem ampla as variadas metodologias utilizadas.

### 3.2 BALANÇO HÍDRICO

O balanço hídrico é o método mais amplamente utilizado uma vez que exige dados facilmente disponíveis e que consiste na contabilização dos valores de entradas e saídas e a variação do armazenamento de volumes de água no aquífero. A equação geral utilizada é a seguinte:

$$P = ET + \Delta S + R_{off} + D \quad \text{Equação 5}$$

Onde P é a precipitação;

ET, a evapotranspiração, que inclui a evaporação e transpiração das plantas;

$\Delta S$  é a variação de armazenamento no volume de controle;

$R_{off}$  é o escoamento direto (precipitação que não infiltrou);

D é a drenagem para fora do volume de controle.

A grande dificuldade do método do balanço hídrico para a avaliação da recarga está na determinação das componentes da variável excedente (D) e do  $R_{off}$ . Wanfried e Hirata (2005), apresentaram uma metodologia para definir a variável de escoamento superficial ( $R_{off}$ ), baseada nos estudos de Fenn et al. (1975). Neste método, os autores aplicam um coeficiente à precipitação mensal que depende do tipo de solo e declividade topográfica da bacia, conforme equação 2 e quadro 1.

$$R_{off} = C' \cdot P \quad \text{Equação 6}$$

Onde:  $C' = \alpha \cdot C$

Quadro 1: Valores de C e  $\alpha$  em função do tipo de solo, declividade e estação do ano.



Tipo de solo	Capacidade de campo	Estação seca	Estação úmida
Arenoso C=0,30	0 a 2	0,17	0,34
	2 a 7	0,34	0,5
Argiloso C=0,40	0 a 2	0,33	0,43
	2 a 7	0,45	0,55

Fonte: adaptado de Wanfried e Hirata (2005)

Outro método utilizado para estimar o escoamento superficial é o método do número da curva (CN) do *US Soil Conservation Service* (NRCS, 2004), que são calculados com base na equação 3. O tipo de solo, uso da terra, e o conteúdo de água no solo antecedente, determinam o valor de CN.

$$ROff = (P - 0,2S) / (P + 0,8S) \quad \text{Equação 7}$$

Onde: P = Precipitação (L); e

S = calculado conforme equação 8 abaixo.

$$S = 25400 CN - 254 \quad \text{Equação 8}$$

Os valores de CN para diferentes tipos de solo e usos do solo são apresentados no quadro 2, com os quatro grupos hidrológicos:

A (baixo potencial de escoamento);

B (moderado potencial de escoamento);

C (alto potencial de escoamento); e

D (muito alto potencial de escoamento).

Quadro 2- Valores do CN atribuído a cada complexo hidrológico

Uso do Solo	Condição hidrológica	Grupo Hidrológico do Solo			
		A	B	C	D
Culturas Anuais	Má	70	79	84	88
	boa	65	75	82	86
Pastagem	Média	49	69	79	84
Solo Exposto	-	77	86	91	94
Área Urbana	-	59	74	82	86
Mata		35	56	70	77

Fonte: TR-55 (1986) e Sartori et al., (2005)

Szilagyi et al. (2003) propuseram uma metodologia simplificada utilizando um índice de fluxo de base, também aplicada por Mourão (2007) e Freitas (2010), conforme mostra a equação 5.

$$R = (P-ET) \times BFI$$

Equação 9

Onde:

P = Precipitação

ET = Evapotranspiração

A fração de fluxo de base, em inglês *Base Flow Index* (BFI), corresponde à razão entre o fluxo de base e a vazão total. O valor de BFI pode ser extraído por técnicas manuais ou automáticas a partir de hidrogramas.

### 3.3 MÉTODOS FÍSICOS

As estimativas de recarga também podem ser realizadas obtendo-se dados físicos das zonas saturadas e não saturadas. Os métodos em zonas saturadas são amplamente utilizados devido à facilidade de obtenção dos dados, sendo que a técnica mais empregada é a Variação dos Níveis de Água (VNA). Já as técnicas que envolvem dados de zona não saturada não são comumente utilizadas, mas oferecem algumas vantagens distintas, destacando-se a utilização de lisímetros, do método de Plano de Fluxo Nulo e o emprego da Lei de Darcy (Bortolin, 2018).

#### 3.3.1 Zona Não Saturada

Estes métodos produzem estimativas de taxas de drenagem na área denominada de zona não saturada. A suposição comum é que o escoamento da água acabará por atingir o lençol freático, que conforme Healy (2010), pode haver um longo intervalo de tempo sobre o qual a água atravessa determinada profundidade. Estas análises costumam ser pontuais com alto custo de implementação e exigem uma instrumentação intensiva que pode estar sujeito a erros de medição. Por outro lado, estes métodos têm a capacidade única de fornecer uma visão detalhada sobre os processos de recarga e os fatores que influenciam as taxas de recarga (Bortolin, 2018).

##### a) Lisímetros

Lisímetros são recipientes preenchidos com solo com ou sem vegetação, isolados hidrologicamente para fins de medição dos componentes do balanço hídrico. Eles são construídos em balanças sensíveis capazes de medir pequenas mudanças no peso que representam a precipitação e as mudanças de armazenamento de água (SCANLON et al., 2002).

Devido às restrições de alcance e limitações na mobilidade, os lisímetros são menos utilizados para estimar recarga, servindo como referência para comparação entre diferentes métodos (WENDLAND e CUNHA, 2003).

b) Plano de Fluxo Nulo (*Zero-flux plane*)

O balanço de água no solo pode ser simplificado igualando a recarga a mudanças de armazenamento de água no solo que está abaixo do plano de fluxo nulo (ZFP). Conforme Scanlon et al. (2002), o ZFP separa o movimento da água para cima (evapotranspiração) e para baixo (drenagem). O método foi inicialmente proposto por Richards et al. (1956) e tem sido aplicado em vários estudos (DELIN e HERKELRATH, 2005; SCHWARTZ et al., 2008). O armazenamento de água é determinado a partir de medições do conteúdo de água em várias profundidades dentro da zona não saturada.

c) Método de Darcy

A lei de Darcy é usada para calcular recarga R no meio não saturado, de acordo com a equação 6 e 7:

$$R = -K(\theta) \partial h / \partial z \quad \text{Equação 10}$$

$$\theta = \theta(\psi) \text{ e } h = \psi + z \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

K é a condutividade hidráulica,

h, a carga total,

$\psi$ , o potencial mátrico (umidade do solo),

z, a coordenada vertical e

$\theta$ , o conteúdo de umidade.

Para aplicar a equação de forma adequada são necessárias medidas (ou estimativas) do gradiente vertical de carga, bem como, da condutividade no perfil do solo. Conforme Rabelo (2006), a determinação da condutividade em laboratório é particularmente difícil, devido a heterogeneidade, variação com a umidade e sistema de coleta de amostra.

### 3.3.2 Zona Saturada

No meio saturado, o método mais conhecido é o de Variação do Nível de Água (VNA) também chamado de variação da superfície livre (*Water Table Fluctuation*, WTF). O método de VNA baseia-se na premissa de que os níveis das águas subterrâneas em aquíferos livres se elevam devido à recarga, a qual pode ser calculada de acordo com a equação 12:

$$R = Sy \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad \text{Equação 12}$$

Em que  $S_y$  é o rendimento específico e  $\Delta H$  é a mudança na altura do lençol freático para um intervalo de tempo  $\Delta t$ .

A aplicação da equação 10 para cada elevação individual do nível freático irá fornecer uma estimativa de recarga total (bruta). Essa recarga é chamada de total ou bruta porque não levadas em consideração as saídas de água do aquífero durante o intervalo de tempo de aplicação do WTF. Para determinar a recarga total,  $\Delta H$  é definido como a diferença entre o pico da curva de ascensão e o ponto mais baixo da curva de recessão antecedente, extrapolada até o instante do pico (Bortolin 2018, apud HEALY, 2010), como mostra a Figura 14.

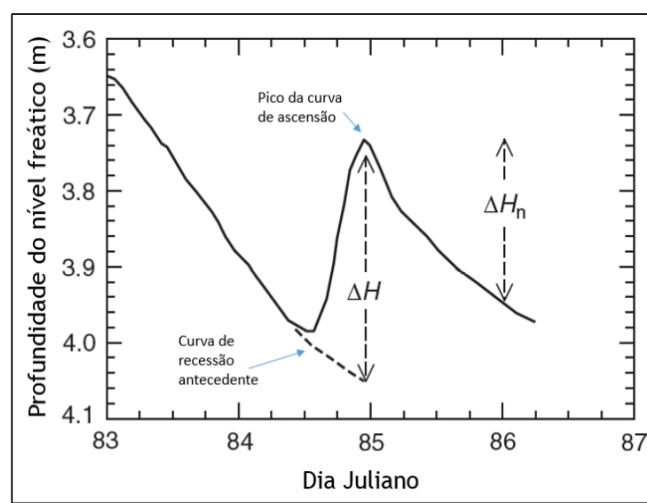


Figura 14 – Determinação do  $\Delta H$ . Fonte: Adaptado de Healy (2010).

### 3.3.3 Métodos baseados em dados de águas superficiais

Para as áreas úmidas, os dados de vazão de águas superficiais são amplamente utilizados uma vez que são sistemas conectados (WINTER et al., 1998; HEALY, 2010).

A figura 15 ilustra as formas de escoamento existentes. Além do escoamento de base (subterrâneo) e superficial, há a existência de um escoamento denominado de subsuperficial (interflow) cujo escoamento é relativamente mais rápido que o fluxo de base, mas normalmente mais lento que o escoamento superficial. Em regiões com altas taxas de infiltração e terrenos íngremes, o escoamento subsuperficial pode ser um processo dominante de reação de aumento de níveis de água em função da precipitação ocorrida, mostrando a importância da contribuição da água armazenada no solo. O escoamento subsuperficial (interflow) foi mostrado experimentalmente por Hewlett e Hibbert (1963) sendo que para sua ocorrência é necessário um solo de alta permeabilidade em sua superfície (FREEZE; CHERRY, 1979).

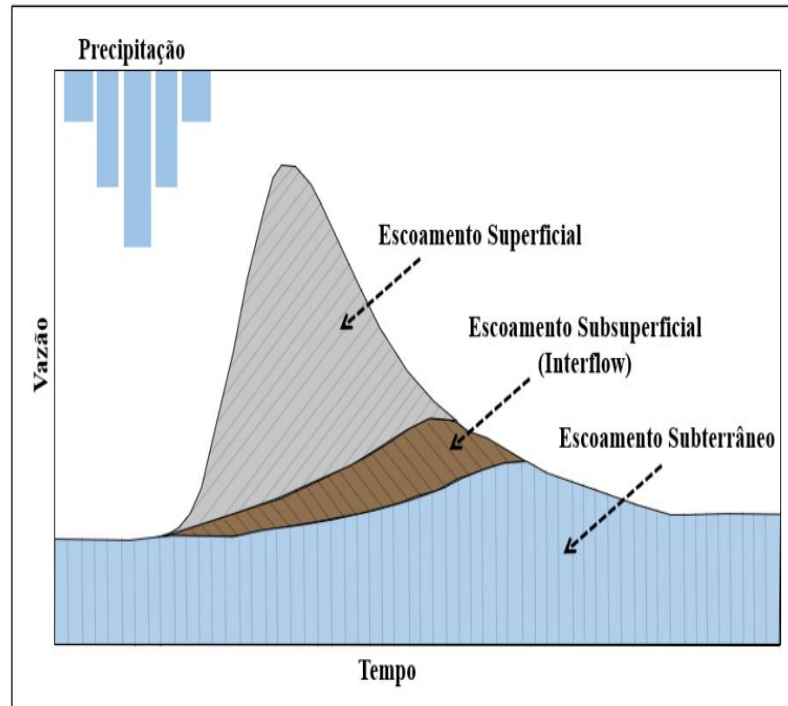


Figura 15– Diferentes origens de escoamento de um rio. Fonte: Modificado de Maidment (1993).

O uso de medições de escoamento de base para estimar a recarga é baseado na abordagem do balanço hídrico, no qual a recarga é equiparada à descarga. Entretanto, deve-se considerar que esta afirmação pode não ser adequada quando taxas de bombeamento, evapotranspiração e percolação profunda contribuem de forma significativa no equacionamento do balanço (SCANLON et al., 2006). Em geral este escoamento é representado por um índice de escoamento de base, ou BFI (*Base Flow Index*), o qual corresponde à relação de longo prazo entre o escoamento de base a vazão total (ECKHARDT, 2008). Para a separação de escoamento é muito comum usar o conceito de curva de recessão do hidrograma (figura 16) que contém informações sobre o comportamento dinâmico da interação entre águas subterrâneas e superficiais e as propriedades hidráulicas de aquíferos não confinados (BRUTSAERT e NIEBER, 1977; WITTENBERG, 1999; DEWANDEL et al., 2003). Estas curvas descrevem a taxa na qual a vazão observada em um rio diminui entre os eventos de chuva e, para fins práticos, podem ser consideradas como uma aproximação para o atraso do armazenamento de vazão em bacias hidrográficas (Bortolin, 2018).

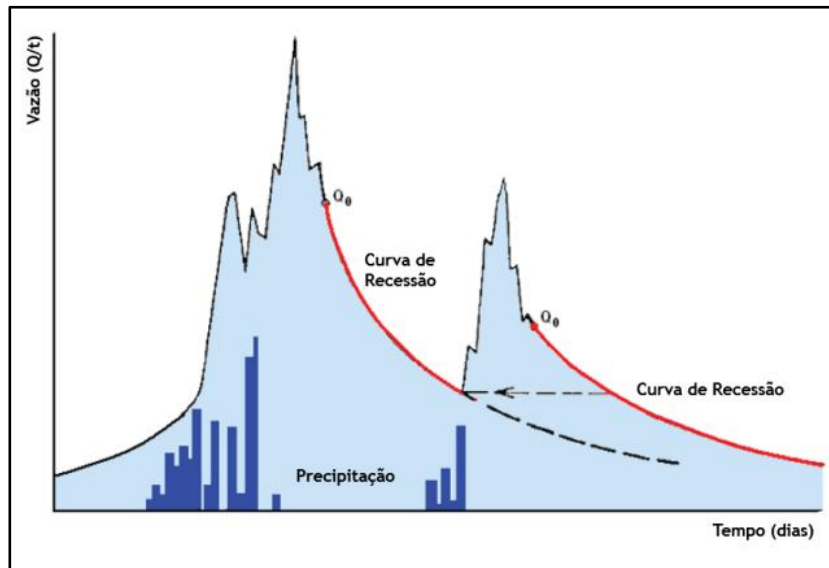


Figura 16– Definição da curva de recessão (Kulman, 1990 – Adaptado de Gregor e Malik, 2012).

Existem vários métodos de análise e técnicas de extração de segmentos de recessão, do inglês *Recession Analysis Methods* (RAMs), baseados em soluções analíticas e modelos conceituais estabelecidos, exemplos que podem ser encontrados nos trabalhos de Boussinesq (1904), Maillet (1905), Coutagne (1948) e Wittenberg (1999).

Para análise do escoamento de base, neste trabalho, estão descritos: o uso de curvas de permanência e curvas de recessão, e métodos empíricos de separação de escoamento.

### 3.3.4 Uso de curvas de permanência

De acordo com Bortolin (2018), curvas de permanência descrevem a relação entre a magnitude e frequência de ocorrência de descarga em rios. São usadas em vários estudos hidrológicos e também podem ser empregadas para análise de fluxo de base em uma bacia hidrográfica. Vários índices de escoamento de base têm sido propostos para representar a variabilidade do fluxo subterrâneo utilizando a curva de permanência, como exemplo a relação  $(Q_{25}/Q_{75})^{0,5}$  (STRICKER, 1983),  $(Q_{20}/Q_{90})$  (ARIHOOD e GLATFELTER, 1991),  $\log(Q_{50}/Q_{90})$  (NELMS et al., 1997).

Smakhtin (2001) sugeriu que a relação  $Q_{90}/Q_{50}$  pode ser utilizada como uma estimativa de BFI, excluindo-se os efeitos de área da bacia, relação também empregada por Collischonn e Fan (2014) em estudo de separação de escoamento na região centro-oeste e sul do Brasil.

### 3.3.5 Softwares para separação de um hidrograma

Recentes avanços em softwares facilitaram bastante o processo de separação automática de um hidrograma, removendo grande parte da subjetividade, reduzindo a quantidade de tempo requerida para análise, além de permitir a análise de hidrogramas mais complexos

(Bortolin, 2018 apud PETTYJOHN e HENNING, 1979; INSTITUTO DE HIDROLOGIA, 1980; WAHL e WAHL, 1995; NATHAN e MCMAHON, 1990; RUTLEDGE, 1998; ARNOLD et al., 1995; ARNOLD e ALLEN, 1999; SLOTO e CROUSE, 1996; LIM et al., 2005; ECKHARDT, 2005).

a) PART

O método PART usa o particionamento do hidrograma para estimar o registro diário da descarga de água subterrânea, baseado na curva de recessão antecedente (RUTLEDGE, 1998). O escoamento de base é definido como sendo igual a vazão em dias de recessão e, em seguida, interpola-se linearmente os dias restantes do hidrograma, como apresenta a Figura 18 (Bortolin, 2018).

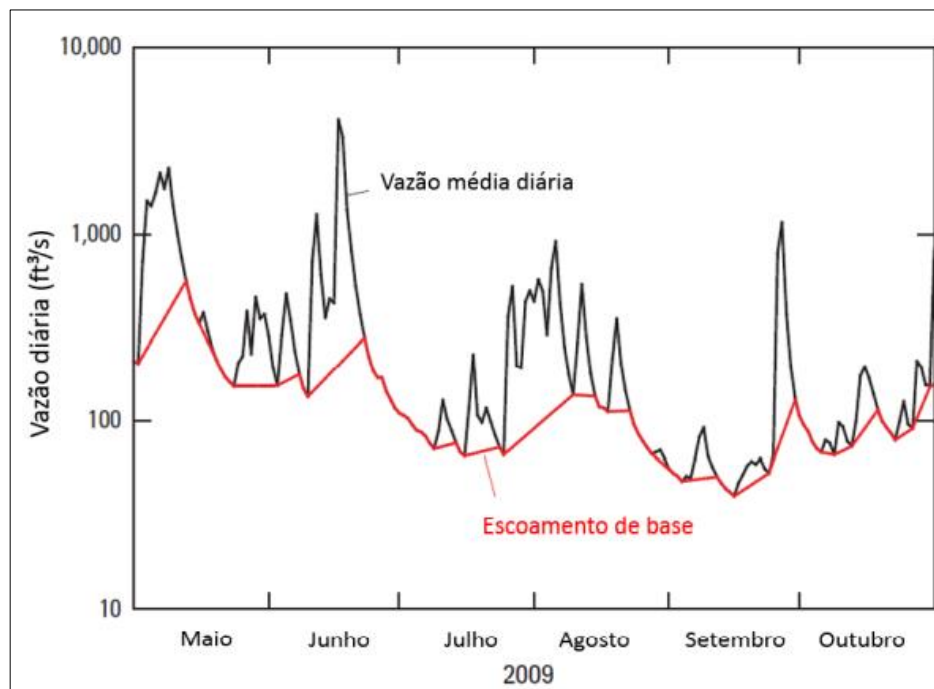


Figura 18 - Hidrograma mostrando os resultados de separação do escoamento pelo método PART Fonte: Modificado de Nelms et al (2015)

O escoamento de base é equivalente ao escoamento superficial rápido quando o número de dias de recessão é maior que  $N$  e a taxa de descarga do aquífero corresponde a um valor menor que o ciclo de  $0,1 \log$  por dia, sendo que  $N$  é a duração aproximada de escoamento superficial de Linsley et al. (1982), que depende da área em  $\text{km}^2$  (Bortolin, 2018):

$$N = 0,83A^{0,2}$$

b) HYSEP

O método HYSEP (SLOTO e CROUSE, 1996) automatiza três algoritmos de separação de hidrogramas, originalmente desenvolvidos por Pettyjohn e Henning (1979): HYSEP1 -

intervalo fixo, HYSEP2 - deslocamento do intervalo e HYSEP3 – mínimo local (Bortolin, 2018).

Cada método usa um intervalo de dias  $2N^*$  para encontrar o hidrograma correspondente às vazões mínimas durante esse período. Sloto e Crouse (1996) utilizaram o símbolo "\*", para indicar que o intervalo utilizado não é exatamente igual ao dobro de N, mas corresponde ao número inteiro mais próximo entre 3 e 11 (Bortolin, 2018).

O método HYSEP1 determina o menor valor de vazão no intervalo  $2N^*$  e assume esta descarga para todos os dias do intervalo. O hidrograma de base é construído ligando os valores atribuídos para cada intervalo (Bortolin, 2018).

Com o método HYSEP2, o escoamento de base diário é definido como a menor descarga diária que ocorre dentro do intervalo que se estende a partir de  $0,5(2N^*-1)$  centrado no dia de interesse (Bortolin, 2018).

Já o método HYSEP3, os valores mínimos são definidos como sendo aqueles que possuem o menor valor do que todos os outros dias dentro do intervalo. Os valores de escoamento de base são determinados por interpolação linear entre os mínimos locais adjacentes (Bortolin, 2018).

### c) BFI

O programa BFI (WAHL e WAHL, 1995) consiste em dois métodos (padrão e modificado) e segue um conjunto de procedimentos originalmente propostos pela British Institute of Hydrology (Instituto de Hidrologia, 1980a, b) em que o registro de vazões é dividido em intervalos de N-dias de comprimento (Bortolin, 2018).

Este método proposto pelo Instituto de Hidrologia também é chamado de Suavização de Mínimos (*Smoothed Minima Technique*) - UKIH, cuja técnica é explanada melhor nos trabalhos de Piggott (2005) e Aksoy et al. (2009). Wahl e Wahl (1995) explicam que durante cada intervalo de N-dias, a vazão mínima é identificada e comparada com valores mínimos adjacentes. Se um determinado mínimo é menor do que o fator de teste de ponto de inflexão do hidrograma,  $f$ , então, esse mínimo é designado como um ponto de inflexão. Esses pontos são então conectados para construir o hidrograma de fluxo de base (Bortolin, 2018).

Para o método de BFI-padrão, o valor de N corresponde a 5 dias e  $f = 90\%$ . No método BFI modificado, o parâmetro  $f$  é substituído por um índice diário recessão,  $K'$ , definido como:

$$K' = f \cdot 1 \cdot N$$

O que equivale a 0,979 com base nos valores padrão utilizados para os parâmetros N e  $f$  no método BFI-padrão.



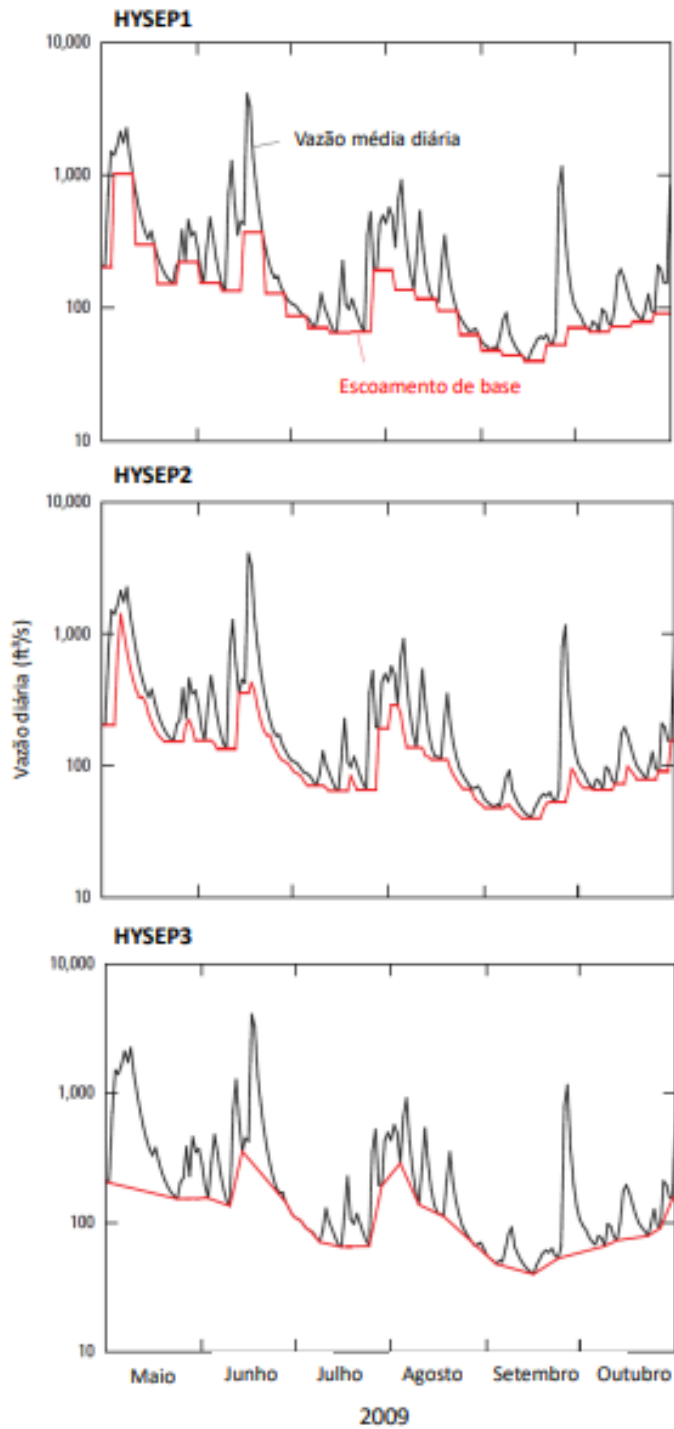


Figura 17- Hidrogramas mostrando os resultados de separação do escoamento pelo método HYSEP Fonte: Modificado de Nelms et al., (2015).

A Figura 18 apresenta a separação de escoamento para os dois métodos de BFI.

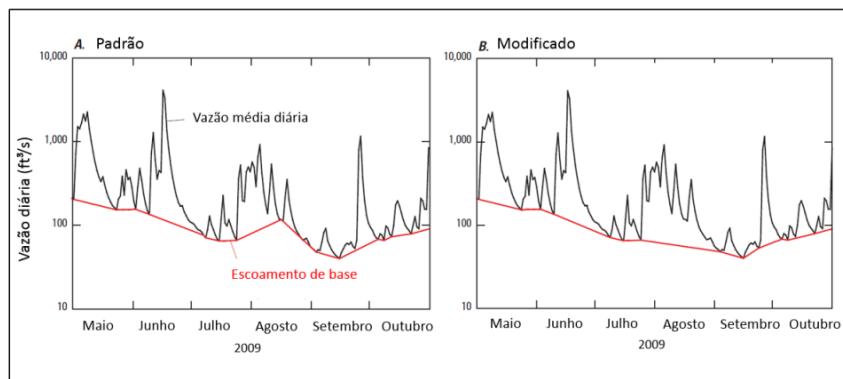


Figura 18- Hidrogramas mostrando os resultados de separação do escoamento pelo método BFI Padrão e modificado Fonte: Modificado de Nelms et al (2015)

#### d) Filtros Digitais

Outra abordagem para a separação do hidrograma utiliza a técnica de filtros digitais (NATHAN e MCMAHON, 1990; ARNOLD et al., 1995; CHAPMAN, 1999; ECKHARDT, 2005). Esta técnica remove muito da subjetividade de separação manual, proporcionando reprodutibilidade consistente dos resultados alcançados. Na aplicação dos filtros supõe-se que a vazão total ( $y$ ) de um hidrograma é a soma do escoamento superficial ( $f$ ) e escoamento de base ( $b$ ) (Bortolin, 2018).

Alguns programas são utilizados para aplicação da técnica como o RECESS (RUTLEDGE, 1998). Lim et al. (2005) elaborou um programa web para separação automática dos hidrogramas denominado WHAT (<http://cobweb.ecn.purdue.edu/~what/>), no qual o usuário pode escolher trabalhar com o modelo HYSEP3, o modelo BFLOW ou usar a técnica de Eckhardt.

Outros autores, como Matiuzzi et al. (2015) ao estudarem sub-bacias com arcabouço geológico pouco permeável da bacia hidrográfica do Rio Ibicuí, no estado do Rio Grande do Sul, encontram valores de recarga que variaram entre 88,4 mm/ano e 314,9 mm/ano (13% e 33% da precipitação efetiva, e 6% e 17% da precipitação total, respectivamente). Melati et al. (2018) encontraram valores que variaram de 11 a 32% da precipitação total anual em bacias do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) na região do Paraná (Bortolin, 2018).

#### 3.3.6 Método de análise do deslocamento da curva de recessão

Este método foi inicialmente proposto por Rorabaugh (1964) e está baseado no pressuposto de que um aquífero livre pode ser descrito por um fluxo unidimensional a partir de uma fronteira com fluxo nulo, na borda do aquífero até o rio (Figura 21).

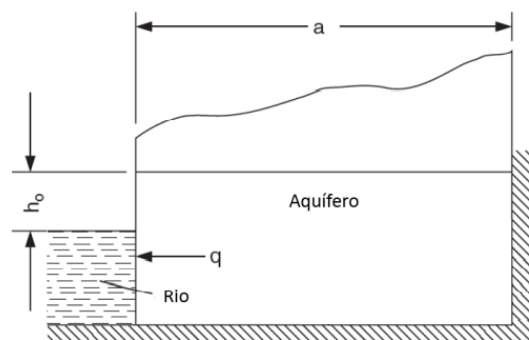


Figura 21– Representação esquemática de um sistema rio-aquífero, na qual está baseado o modelo de Rorabaugh (1964) Fonte: modificado de Healy (2010)

A água subterrânea desloca-se na direção do eixo  $x$ , perpendicular ao rio. Recarga, transmissividade, e rendimento específico são considerados uniformes, assim como a distância do rio até a borda limite do aquífero ( $a$ ). Inicialmente a carga hidráulica de aquífero é igual ao do rio (Bortolin, 2018).

Este método é pertinente devido à sua fundamentação teórica, pois inclui variáveis de águas subterrâneas. Uma desvantagem desse método está associada ao tempo para realizar as estimativas de recarga para cada pico encontrado na hidrógrafa e também à subjetividade envolvida na extrapolação manual da linha de recessão (CHEN e LEE, 2003). Para reduzir o tempo de cálculo e diminuir a subjetividade, foi desenvolvida uma série de programas automatizados, destacando-se os softwares RECESS e RORA (BARLOW et al., 2015), os quais estão disponíveis no website do *United States Geological Survey* (<http://water.usgs.gov/ogw/gwsw.html>) (Bortolin, 2018).

O *software* RECESS possibilita o cálculo do índice de recessão ( $K$ ), enquanto o *software* RORA utiliza o método de deslocamento da curva de recessão, proposto por Rorabaugh (1964), para estimar a recarga subterrânea. O programa RECESS é utilizado para determinar o índice de recessão e para definir a curva mestre de recessão (CMR) da análise dos dados de vazão. É utilizado para a análise da recessão da vazão durante o tempo em que não está ocorrendo a recarga da água subterrânea, quando todo o fluxo provém da descarga da água subterrânea e quando o perfil do nível de distribuição da água subterrânea se encontra próximo do estável. O programa utiliza um processo de interação repetitiva de muitos períodos selecionados de recessão contínua determinando uma regressão melhor ajustada para a taxa de recessão como uma função do logaritmo do fluxo, utilizando os coeficientes da equação para obter a CMR. A recessão será linear no gráfico do logaritmo do fluxo em função do tempo, sendo que a taxa de recessão pode ser expressa como o índice de recessão, em dias por ciclo de log (Bortolin, 2018 apud RUTLEGDE, 1998).

Há discussões na literatura quanto às diversas limitações do método RORA para estimar recarga das águas subterrâneas. Healy (2010), comenta que "poucos aquíferos estão em conformidade com todas as suposições inerentes à dedução do método de deslocamento da curva de recessão". Halford e Mayer (2000) e Halford (2008) questionam a utilização da equação para determinar a duração do escoamento superficial a partir de uma bacia, a utilização de registros de vazão para estimar um índice de recessão adequado (K), e os efeitos dos fatores hidrológicos, tais como armazenamento, sobre a identificação dos picos de recarga em um registro de vazões. Rutledge (2007) concluiu que o método estima a recarga líquida, que representa a recarga total menos evapotranspiração da água subterrânea. Não obstante, vários estudos como os de Rutledge e Mesko (1996), Arnold e Allen (1999), Chen e Lee, (2003), Risser et al., (2005) descobriram que o método de deslocamento por curva de recessão produziu estimativas consistentemente maiores do que outras técnicas de análises de hidrogramas (Bortolin, 2018).

Quando possível, os métodos devem ser combinados com outros tipos de dados para confirmar a interação hidráulica dos sistemas de águas subterrâneas e superficiais, tais como medições simultâneas de níveis de águas subterrâneas, medidas de infiltração, ensaios de infiltração e traçadores químicos (STONESTROM e CONSTANTZ, 2003; ROSENBERRY e LABAUGH, 2008; EDDY-MILLER et al., 2012).

A Figura 19 apresenta um guia para avaliar a adequabilidade do uso dos métodos de separação de escoamento a partir da avaliação do hidrograma, a qual indica que são apropriados para escala de tempo anual, em bacias com declividades iguais ou superiores a 1% e sem nenhuma utilização de água superficial ou subterrânea. Também apresenta uso apropriado para bacias menores que 1295 km<sup>2</sup> e que possuam séries de vazões completas com mais de 1 ano de registros (Bortolin, 2018).

Condições de escoamento				Unidades Hidrogeológicas		Tamanho da bacia em km <sup>2</sup>		
Ganho	Perda	Perene	Intermitente	Única	Múltiplas	≤2,6	>1 e ≤ 1295	>1295

Escala de tempo do período de análise			Declividade da bacia, em %	
Menos que um mês (diária, horária, evento)	Mensal ou sazonal	Anual ou maior	< 1	≥ 1

Utilização de água superficial ou subterrânea			Tamanho da série de vazoes	
Nenhuma	Relativamente pequena (pouca influência nas condições de baixo fluxo)	Substancial (Grande influência nas condições de baixo fluxo)	Completa e < 1 ano de registros	Completa e ≥ 1 ano de registros

Figura 19 – Guia para identificar a adequabilidade do método de análise de águas superficiais ao estudo. Fonte: Modificado de Barlow et al. (2015)

### 3.3.7 Métodos de Traçadores

O uso de traçadores é importante na aquisição de informações sobre a extensão das áreas de recarga, características do escoamento subterrâneo e transporte de contaminantes (ZHU et al., 2003). Os traçadores possuem uma variedade de aplicações em estudos hidrológicos (COOK e HERCZEG, 1998; SCANLON et al., 2002) tais como:

- fornecer estimativas quantitativas e identificando as fontes de recarga;
- fornecer informações sobre o tempo de deslocamento da água; e
- avaliar a importância dos caminhos preferenciais;

-fornecer informações sobre a dispersão hidrodinâmica possibilitando dados para calibração de modelos numéricos de escoamento de águas subterrâneas e de transporte de solutos. Segundo Scanlon et al. (2002) os traçadores são classificados em três categorias: traçadores ambientais naturais, traçadores históricos e traçadores aplicados. Nesta pesquisa serão descritos apenas os métodos do cloreto e isótopos de oxigênio e hidrogênio, como exemplos de traçadores ambientais (Bortolin, 2018).

#### 3.3.7.1 Balanço de Cloretos

O uso de traçadores geoquímicos, que se baseia no balanço de massa de cloretos (*Chloride Mass Balance - CMB*), constitui uma técnica de estimativa de recarga de aquíferos

utilizada mais frequentemente em regiões de climas áridos e semiáridos, onde tem se mostrado bastante adequada (SCANLON et al., 2006).

### 3.3.7.2 Isótopos

Isótopos são nuclídeos com o mesmo número de prótons e diferentes números de massa devido à variação no número de nêutrons, sendo que estes podem ser divididos em estáveis e instáveis ou radioativos (SANTIAGO et al., 2008). Os isótopos mais utilizados em estudos ambientais e hidrogeológicos são o  $^{13}\text{C}$  estável e o  $^{14}\text{C}$  radiogênico; oxigênio ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ); hidrogênio (D/H); nitrato ( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ); sulfato ( $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$  e  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ), estrôncio ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) e ainda o boro, cloro e lítio, entre outros (Bortolin, 2018).

### 3.3.8 Modelos de Simulação

De acordo com Bortolin (2018), os modelos de simulação são amplamente utilizados em todos os tipos de estudos hidrológicos, e alguns destes modelos podem ser utilizados para estimar a recarga. A capacidade preditiva de modelos pode ser usada para avaliar como as mudanças no clima, uso da água, uso da terra e outros fatores que podem afetar as taxas de recarga (HEALY, 2010). A maioria dos modelos de simulação, incluindo modelos de bacias e aquíferos são baseados de alguma forma na equação do balanço hídrico. É importante que o modelo seja calibrado para ajustar as variáveis utilizadas na resolução do problema.

Dentre os mais usados destacam-se os seguintes modelos:

- 1 - SWAT (ARNOLD et al., 1998);
- 2 - MIKE-SHE (GRAHAM et al., 2006);
- 3 - PRMS (LEAVESLEY et al., 1983);
- 4 - WEAP;
- 5 - SMAP;
- 6 - BALSEQ;
- 7 - MGB; e
- 8 - Modelo Hidrológico de Grandes Bacias, MGB-IPH

Vale destacar o WEAP (*Water Evaluation and Planning System*) como um sistema importante de suporte ao gerenciamento integrado dos recursos hídricos que incorpora modelos de estimativa de recarga e faz uma análise das principais demandas tendo como base informações relativas às principais atividades econômicas desenvolvidas no sistema hidrológico, além de realizar uma análise da disponibilidade hídrica atual e de prever cenários (YATES, 2005).

O Modelo Hidrológico de Grandes Bacias, MGB-IPH, descrito por Collischonn (2001) e Collischonn et al. (2007) é um modelo amplamente utilizado na modelagem de bacias hidrográficas de grandes extensões com resultados satisfatórios tanto para bacias em regiões de solos argilosos com chuvas bem distribuídas (ALLASIA et al., 2006; COLLISCHONN et al., 2007, SIQUEIRA et al., 2018), como para bacias de solos arenosos com grandes períodos de seca (GETIRANA et al., 2010; PONTES, 2017; FLEISCHMANN, 2018). O modelo também pode ser aplicado em bacias menores, ainda que careça de estudos que comprovem efetivamente sua eficiência.

### 3.3.9 Técnicas de Regressão

De acordo com Bortolin (2018), além destes modelos de simulação de bacia, Helsel e Hirsch (2002) abordam o uso de técnicas de regressão para estimar recarga levando em consideração tempo e espaço. Geralmente, as equações assumem a forma de:

$$R = aX1 + bX2 + c \quad \text{Equação 13}$$

Onde a, b, e c são coeficientes determinados por análise de regressão e X1 e X2 são parâmetros que refletem as características independentes de bacias, como a textura do solo, a permeabilidade, a altitude, a vegetação, e geologia, ou climáticas, tais como temperatura e precipitação. As características da bacia hidrográfica, como área de drenagem da bacia, precipitação e índice de fluxo de base devem ser usados como variáveis explicativas. Características de bacias hidrográficas, como precipitação, cobertura do solo, declividade e solos, também foram usadas para estimar o BFI. Haberlandt et al. (2001), por exemplo, descobriram que o BFI está fortemente correlacionado às características topográficas, pedológicas, hidrogeológicas e de precipitação. Mazvimavi et al. (2008) consideraram a cobertura de encostas e pastagens em bacias hidrográficas e Ahiablame et al. (2013) desenvolveram uma equação de regressão para estimativa de BFI usando níveis de água e solos do grupo hidrológico B e C. Zhang et al. (2013) usaram dados de precipitação, área da bacia e tipos de solos do grupo A para estimar valores de BFI e escoamento de base. Para que a recarga seja encontrada é necessário que se tenha uma série com valores de recarga conhecido. Uma vez que este valor não pode ser medido, mas estimado por alguma das técnicas apresentadas anteriormente, existe uma grande incerteza ao utilizar dados para estimar a recarga. Alguns estudos de estimativa através da aplicação de equação de regressão são apresentados por Cherkauer e Ansari (2005), Lorenz e Delin (2007), Gebert et al. (1996), Zangh et al. (2013).

### 3.3.10 Uso de satélites e sistemas de informações geográficas

O uso de imagens de satélite e sistemas de informações geográficas têm permitido realizar estudos complementares aos métodos anteriores, contribuindo na análise de áreas de recarga e descarga bem como na avaliação da quantidade de armazenamento. Richey et al., (2015) utilizaram informações do satélite GRACE para mostrar que as águas subterrâneas presentes em grandes aquíferos do planeta são exploradas a taxas maiores que a recarga natural. A missão GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), de responsabilidade conjunta das agências espaciais dos Estados Unidos da América (NASA) e Alemanha (DLR), foi lançada em 17/03/2002, com o objetivo de permitir a obtenção do campo gravitacional terrestre, em alta resolução, em função da variação da massa, que é relacionada à variação do conteúdo de água estocada no continente e no oceano. Henry et al. (2011) e Buma et al. (2016) usaram dados de armazenamento de água terrestre do GRACE corrigida para a umidade do solo empregando o modelo de sistema de assimilação de dados, o *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS), para obter anomalias de armazenamento de águas subterrâneas mensais e recarga líquida anual. As informações de umidade do solo que são importantes para compreensão e estimativa do processo de recarga, também podem ser obtidas pelos dados do satélite da missão *Soil Moisture Active Passive* (SMAP)/NASA como visto nos trabalhos de Disseldorp et al., (2013) e Yee et al., (2016).

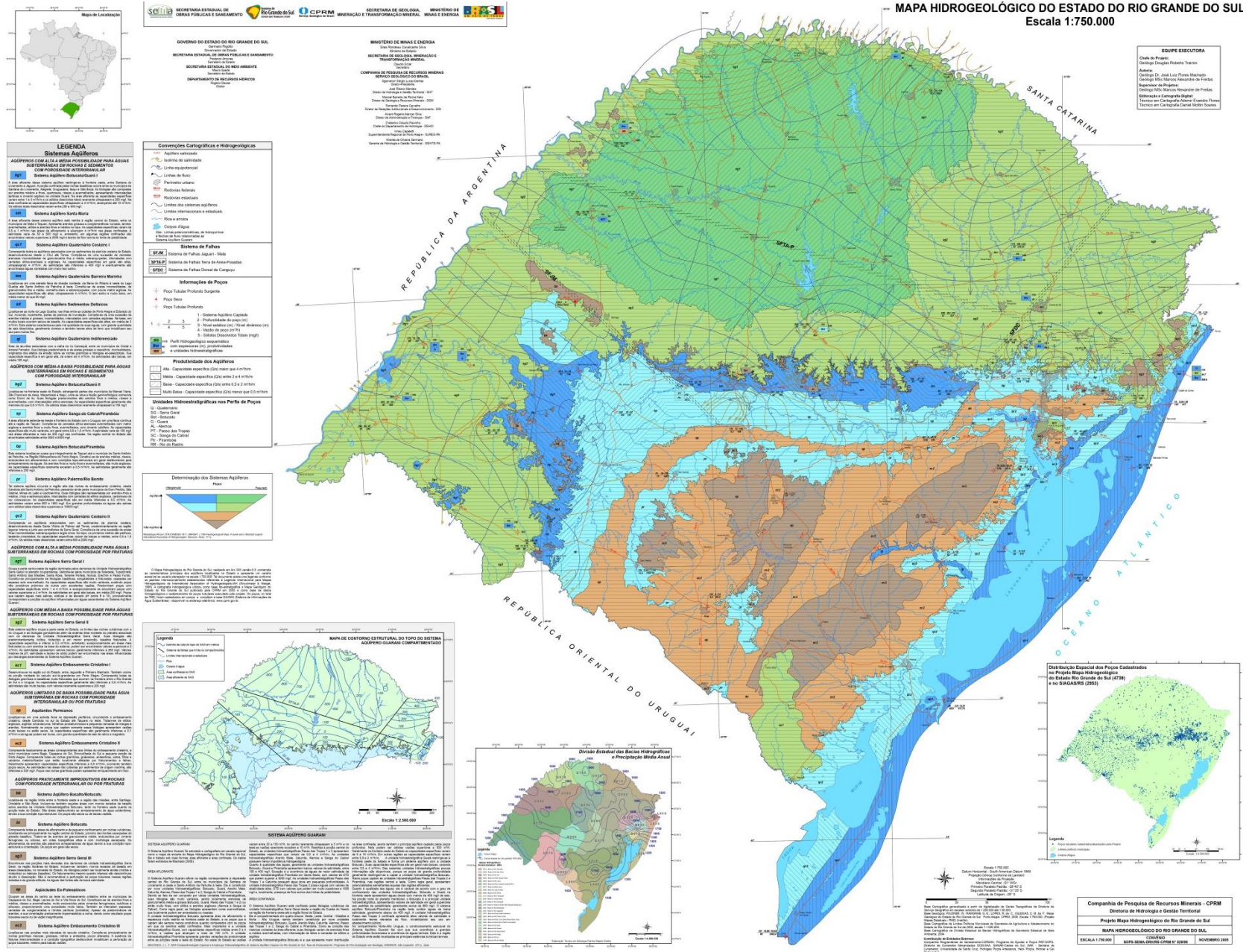
Apesar da utilização destas informações serem empregadas em áreas com maior tamanho, os dados podem ser empregados em conjunto com os outros métodos para melhorar as estimativas de recarga, porém não possuem o refinamento adequado em áreas que necessitam de melhor detalhamento (Bortolin, 2018).

## 3.4 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi direcionado aos sistemas aquíferos identificados e definidos no Estado do Rio Grande do Sul e descritos no Mapa Hidrogeológico do Estado (CPRM,2005), conforme a figura 20.



Figura 20– Mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul, adaptado de CPRM, 2005.



## 4 RESULTADOS

Os métodos para o cálculo das estimativas de recarga, como vimos são bem variados. Cada um deles possui alguma restrição seja em termos de escala, precisão ou disponibilidades de dados e equipamentos suficientes para inserção das variáveis.

Segundo Bortolin (2018), os métodos baseados em águas superficiais e em zona saturada são mais aplicáveis a regiões de clima úmido, enquanto os métodos de zona não-saturada, possuem melhor aplicabilidade em regiões áridas. Os métodos baseados em zona não saturada, geralmente, estimam recargas sobre pequenas áreas, diferentemente dos outros métodos. Aqueles baseados em zona saturada, originalmente estimam a recarga com maior confiança que os métodos baseados nas outras zonas, devido ao fato dos métodos de zona saturada estimarem a recarga real, enquanto os que são baseados nas outras zonas, estimarem a recarga potencial (SCANLON et al., 2002; HEALY, 2010).

Não obstante as particularidades de cada método, Bortolin (2018) recomenda que a recarga seja estimada por um conjunto de métodos e seus resultados comparados sempre levando em consideração a adequabilidade do seu uso, como mostra a Tabela 21, organizada a partir dos referenciais abordados.

<b>Método</b>	<b>Categoria</b>	<b>Escala Espacial</b>	<b>Escala Temporal</b>	<b>Tipo de Recarga</b>
Balanço Hídrico	Balanço Hídrico	Regional	Mês / Ano	Potencial
Lisímetros	Zona não saturada	Pontual	Dia a anos	Potencial
Plano de Fluxo Nulo	Zona não saturada	Pontual	Dia a anos	Potencial
Método de Darcy	Zona não saturada	Pontual	Média de Longo Prazo	Potencial
Variação do Nível de Água	Água Subterrânea	Local	Dia a anos	Real
Métodos de separação empírica (filtros digitais)	Água Superficiais	Bacia Hidrográfica	Anos	Líquida
Deslocamento da curva de recessão (RORA)	Água Superficiais	Bacia Hidrográfica	Anos	Líquida
Balanço de Cloretos	Traçadores	Pontual	Anos	Real
Isótopos	Traçadores	Regional	Anos	Real
Modelos de Simulação	Balanço Hídrico	Bacia Hidrográfica	Dia a anos	Potencial
Técnicas de regressão	Baseado em Águas Superficiais e/ou Balanço Hídrico	Regional	Anos	Potencial
Uso de satélites	Sensoriamento Remoto	Regional	Anos	Potencial / Líquida

Figura 21 – Adequabilidade dos métodos de estimativa de recarga (adaptado de Bortolin, 2018).

Desta forma, para a elaboração do TR direcionado ao cálculo da estimativa de recarga, deve-se abordar o conjunto de métodos e ficar a critério do órgão contratante a escala a ser analisada.

#### 4.1.1 Estudos que devem compor cálculo de estimativa de recarga

A seguir serão elencados os estudos necessários para estimativas de recarga.

##### 4.1.1.1 Seleção da área de estudo

A unidade do estudo será a Bacia Hidrográfica e suas sub-bacias, cujos limites serão descritos e georeferenciados e entregues em arquivos de softwares Gis, preferencialmente ArcGis em suas versões atualizadas.

##### 4.1.1.2 Descrição geológica e hidrogeológica

As descrições geológicas e hidrogeológicas devem ser realizadas com base nos respectivos mapas da CPRM e trabalhos acadêmicos na área que descrevam suas litologias, formações estratigráficas e os sistemas aquíferos presentes na área, bem como a descrição mineral das formações;

##### 4.1.1.3 Geomorfologia

Os dados geomorfológicos e suas derivações, tais como declividade, curvatura vertical e horizontal, forma do terreno devem ser obtidos a partir de imagens disponíveis pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), no banco de dados TOPODATA (VALERIANO, 2008). A declividade poderá reclassificada com o uso do software Idrisi Selva 17.0, de acordo com as classes definidas pela Embrapa (1999), como mostra o Quadro 26.

Relevo	Faixa de declividade (%)
Plano	0 a 3
Suave ondulado	3 a 8
Ondulado	8 a 20
Forte Ondulado	20 a 45
Montanhoso	45 a 75
Escarpado	Acima de 75

Quadro 3- Limites de classes de declividade – Fonte: Embrapa 1999.

##### 4.1.1.4 Caracterização do solo

A caracterização do solo poderá ser feita com base nos dados da Embrapa (2006) e Streck (2008), a fim de permitir a identificação das características e propriedades dos solos e posteriormente sua influência na determinação de taxas de recarga.



#### 4.1.1.5 Caracterização física e morfométrica

A fim de avaliar os parâmetros fisiográficos tais como área, perímetro, densidade de drenagem, comprimento de rio principal entre outros será realizada a partir da análise de modelos digitais de elevação do Shuttle Radar Topography Mission - SRTM, utilizando os softwares IDRISI Selva 17.0 e ArcGis 10.2.

#### 4.1.1.6 Mapeamento do uso e cobertura do solo da região de estudo

Deverão ser utilizadas imagens do satélite Landsat 8, com resolução espacial de 30 metros. Os procedimentos metodológicos relacionados com o processamento das imagens de satélite devem incluir o recorte, a classificação e a quantificação das diferentes classes de uso e cobertura do solo presentes na paisagem, tais como vegetação nativa, exótica, campo, solos expostos, agricultura, áreas urbanas e lâminas de água. Com esses dados deve ser realizada uma interpretação visual da forma, textura, tonalidade/cor e comportamento espectral das unidades que compõem a paisagem. Na interpretação visual das imagens de satélite, são definidos os elementos que compõem a paisagem, ou seja, as classes de uso e cobertura do solo. A classificação das imagens de satélite deve ser realizada de forma supervisionada, utilizando o algoritmo pixel a pixel de Máxima Verossimilhança Gaussiana que utiliza apenas a informação espectral de cada pixel para agrupar regiões homogêneas.

#### 4.1.1.7 Caracterização climática da bacia e/ou sub-bacia

Deve ser realizada uma descrição climática da bacia e/ou sub-bacia com base em fontes de dados de instituições oficiais ou trabalhos acadêmicos.

#### 4.1.1.8 Inventário de poços

O inventário dos poços deve ser realizado com o conjunto de dados do SIOUT RS, SIAGAS, Rede RIMAS ou base de dados de concessionárias de abastecimento de água. Cada poço deverá estar georreferenciado (coordenadas), apresentar perfil construtivo e geológico, número e localização das entradas de água, nível estático, nível dinâmico, vazão, capacidade específica, transmissividade, entre outros dados. Caso existam poços que não possuam informações de transmissividade e capacidade específica, mas que tenham dados de testes de bombeamento, o cálculo dos parâmetros poderá ser feito com o uso do softwares a critério da contratada. Todos os dados serão organizados em um banco de dados com uso de Excel a fim de possibilitar a caracterização hidrogeológica da área de estudo.

#### 4.1.1.9 Caracterização geológica estrutural (Somente para as áreas com aquíferos fraturados)

A caracterização geológica estrutural poderá ser realizada com base na interpretação de modelos digitais de elevação (MDE) obtidos do SRTM refinados para resolução espacial

de 1 arco-segundo (~30 m) e complementados com imagens do satélite ASTER-GDEM com mesma resolução espacial. A partir destes MDE deve ser derivado o relevo sombreado, produzido em 2 azimutes diferentes: 315° e 45°, com elevação de 45° e exagero vertical de 3 vezes. Para traçar os lineamentos utilizar o software Global Mapper v. 17, com escala de imagem de 1:50.000, ou outro a critério da contratada, desde que a contratante aprove a sua utilização. Esses produtos serão utilizados na identificação dos lineamentos morfoestruturais existentes na região, e parâmetros como orientação, densidade, tamanho e cruzamento. Os dados de orientação podem ser elaborados com o software Rockworks v. 16, ou outro software a critério da contratada, desde que autorizado pela contratante.

#### 4.1.1.10 Mapa de densidade de lineamentos e de drenagem;

Para composição do mapa de densidade de lineamentos e de drenagem, poderá utilizar-se o método de densidade de linhas, disponível no software ArcGis 10. Para isso, a região abrangida deverá ser dividida em células com dimensões iguais de 500 m<sup>2</sup>, contabilizando o número de lineamentos e de cursos de água inseridos em cada célula, sendo possível gerar um mapa de densidade contendo a delimitação em diferentes faixas de intervalo.

#### 4.1.1.11 Mapa potenciométrico

O mapa potenciométrico poderá ser elaborado com o software Surfer V.8. Para avaliar o sentido do fluxo subterrâneo a ferramenta utilizada é o Mapa de Superfície Potenciométrica (MSP). O MSP é definido como um lugar geométrico no qual se identifica pontos da altura do nível d'água de um aquífero e a cota da superfície do terreno. A diferença entre o nível d'água (nível estático) e a cota do terreno é o resultado do valor da carga hidráulica em um determinado ponto do aquífero. De maneira geral o mapa da superfície potenciométrica consiste na direção do fluxo da água subterrânea. A área a ser escolhida para a elaboração do mapa potenciométrico pode variar de regional à local. Desta forma, pode ser adotada a unidade de bacia, e conforme a disponibilidade de dados de poços, compor os mapas localmente dentro da bacia.

#### 4.1.1.12 Tratamento estatístico de dados;

Conforme Dutra (2018) as informações de chuvas e vazão, e estações meteorológicas com dados de temperatura e evaporação cujos dados devem ser tratados estatisticamente através de:

- Medidas de tendência central: média e mediana;
- Medida de dispersão: desvio padrão; e
- Máximos e mínimos.

#### 4.1.2 Critérios para modelagem da cunha salina

A determinação da cunha salina é importante para encontrar uma vazão outorgável dos poços em aquíferos costeiros. Isto se explica por que a exploração de poços pode causar um recuo do nível freático e conseqüentemente o avanço da cunha salina. Desta forma é fundamental o conhecimento deste comportamento. Neste caso, a estimativa de recarga em conjunto com o estudo da cunha salina formarão os requisitos básicos para a determinação dos serviços descritos no TR. A estimativa de recarga seguirá o mesmo roteiro do item anterior. O mapeamento da cunha salina será realizado com o método geolétrico que é o mais recomendável para os trabalhos em aquíferos sedimentares.

##### 4.1.2.1 Método geolétrico

Deverá ser utilizado o método geofísico de eletrorresistividade para pesquisa indireta do subsolo visando à locação da cunha salina. O método de eletrorresistividade deverá ser empregado utilizando as técnicas da sondagem elétrica vertical (SEV) e do caminhamento elétrico (CE, também chamado perfil de resistividade ou exploração horizontal). Na execução de tais técnicas, serão utilizados os arranjos de eletrodos dos tipos: quadripolo linear simétrico AIVINB de Schlumberger para a SEV e um arranjo dipolo-dipolo para o CE.

Para fins de correlacionar o avanço/recuo com a recarga do aquífero e sua exploração, os estudos geofísicos deverão ser realizados em um conjunto de campanhas que devem levar em consideração os meses chuvosos e os de estiagem e os meses em que a população aumenta no litoral.

#### 4.1.3 Métodos a serem utilizados para a estimativa de recarga

Após os estudos de caracterização local, os métodos escolhidos para comporem o conjunto que deve estimar a recarga dos aquíferos é descrita a seguir:

##### 4.1.3.1 Método do Balanço Hídrico

Neste método serão utilizadas diferentes estudos de autores variados, para fins comparativos.

1 – Método 1 - A primeira análise é baseada nos estudos de Wanfried e Hirata (2005) que fizeram uma adaptação do modelo de Fenn et al. (1975). A variação de armazenamento ( $\Delta ARM$ ) é calculada com as equações apresentadas a seguir:

$$ARM_n = CAD \times \exp(\text{Neg acum}/CAD) = CAD \times \exp(\sum(P - ETP)_n/CAD) \quad \text{Equação 14}$$

Sendo:

$ARM_n$  - armazenamento no mês “n”

CAD - armazenamento máximo no solo. Segundo Thorntwaite & Mather (1955), CAD varia de 25 mm a 400 mm, podendo ser adotado 100 mm.

P - precipitação média mensal no mês “n”(mm)

ETP - evapotranspiração potencial (mm)

Neg acum - somatório anual dos negativos acumulados até o mês “n”.

Nos meses em que  $(P-ETP)<0$ , utiliza-se a equação abaixo:

$$ARM_n = ARM_{n-1} \times \exp \left( \sum (P - ETP)_n / CAD \right) \quad \text{Equação 15}$$

Se houver um ou mais meses com  $(P-ETP)>0$ , mas com valores insuficientes para elevar o ARM até o valor de CAD, deve ser utilizada a equação a seguir.

$$ARM_n = ARM_{n-1} + (P - ETP)_n \quad \text{Equação 16}$$

Para início dos cálculos, é necessário escolher um mês no fim do período de estiagem e antes do início do período chuvoso, utilizando inicialmente a equação:

$$ARM = M / 1 - \exp ( N CAD) \quad \text{Equação 17}$$

Sendo: ARM - armazenamento no mês

M - somatório de  $(P-ETP)$  positivos em mm

N - somatório de  $(P-ETP)$  negativos em mm

A ETR é calculada pelas seguintes equações:

$$ETR = ETP \text{ se } ((P - ETP) > 0) \quad \text{Equação 18}$$

$$ETR = P + ABS(\Delta ARM) \text{ se } ((P - ETP) < 0) \quad \text{Equação 19}$$

O escoamento superficial (Roff) é obtido aplicando-se o coeficiente de escoamento superficial ( $C'$ ) à precipitação mensal:

$$Roff = C' . P$$

$$C' = \alpha . C$$

C é o coeficiente que determina o quanto de água precipitada escorrerá em superfície, em função do litotipo. O  $\alpha$  é determinado em função da declividade e da estação do ano, seca ou úmida, conforme mostra a Tabela 27, apresentada nos estudos de Carvalho (2013) adaptado de Fenn et al. (1975).

Tipo de solo	Declividade (%)	Coeficiente $\alpha$	
		Estação seca	Estação úmida
Arenoso (C=0,35)	< 3	0,43	0,65
	3 a 7	0,54	0,7
	>7	0,6	0,7
Argiloso (C=0,45)	<3	0,53	0,63
	3 a 7	0,65	0,75
	>7	0,70	0,85

Tabela 2- Classificação do escoamento superficial - Fonte: Adaptado de Fenn (1975) e Carvalho (2013).

2 – Método 2 - A segunda análise do método de balanço hídrico se baseia na proposta simplificada apresentada por Castany (1975) e Steehenius (1985), considerando o termo de infiltração eficaz. Nos cálculos serão efetuadas as seguintes considerações:

- a) Parcela de água retida no solo  $C = 100 \text{ mm}$ ;
- b)  $ETR = PPT$ , se  $PPT < ETP$
- c)  $Ie = PPT - ETR$ , depois de esgotada a capacidade de retenção de água no solo.

3 - Método 3 - O terceiro método do balanço hídrico está sustentado na proposta simplificada apresentada por Szilagyi et al. (2003), conforme a equação:

$$R = (P - ETR) \times BFI \qquad \text{Equação 20}$$

Os dados de BFI são calculados utilizando o método de filtro digital de Eckhardt (2005), com valor de  $BFI_{max}$  encontrado pelo filtro inverso proposto por Colischon e Fan (2014).

4 - Método 4 - Outra técnica utilizada para cálculo de balanço hídrico é a utilização do valor do CN para prever o escoamento superficial (NRCS, 2004). Para tanto, devem ser utilizados os valores de CN definidos em literatura para os diferentes usos do solo e tipos de solos, conforme metodologia de Sartori et al., (2005).

De acordo com a Embrapa (2010), para uma estimativa correta da evapotranspiração no cálculo de balanço hídrico, existem várias metodologias desenvolvidas, entretanto, poucas possuem aplicação prática para todas as condições climáticas, sendo necessário o ajuste dos coeficientes das equações. Abaixo, a figura 28 descreve os métodos existentes.



Método empírico	Variáveis necessárias	Escala temporal	Limitações do método
Método de Penman-Monteith	$T_{\min}^f, T_{\max}^f, UR_{\min}^f, UR_{\max}^f, RS, VV$	D	<b>Prós:</b> método universal para obtenção dos valores de evapotranspiração de referência. <b>Contras:</b> utiliza muitas variáveis meteorológicas, impossibilitando seu cálculo.
Método de Thornthwaite	$T_{\min}^f, T_{\max}^f$	M	<b>Prós:</b> método muito utilizado para obtenção do balanço hídrico climático mensal. <b>Contras:</b> apesar de utilizar apenas dados de temperatura, seu cálculo é apenas para escala temporal mensal.
Método de Hargreaves	$T_{\min}^f, T_{\max}^f$	D	<b>Prós:</b> utiliza apenas dados de temperatura e pode ser usado para obtenção diária da evapotranspiração. <b>Contras:</b> não é recomendado para regiões com condições climáticas úmidas.
Método de Linacre	$T_{\min}^f, T_{\max}^f, UR_{\min}^f, UR_{\max}^f$	M	<b>Prós:</b> método simplificado do Penman, utilizando menos variáveis meteorológicas.
Método de Camargo	$T_{\min}^f, T_{\max}^f, RS$	D	<b>Prós:</b> metodologia fácil e que necessita apenas de dados de temperatura.
Método de Makkink	$T_{\min}^f, T_{\max}^f, RS$	D	<b>Prós:</b> utiliza apenas dados de temperatura e radiação solar, recomendado para condições climáticas úmidas. <b>Contras:</b> não obtém resultados satisfatórios para condições climáticas áridas.
Método de Priestley & Taylor	$T_{\min}^f, T_{\max}^f, RS$	D	<b>Prós:</b> baseado no método de Penman, utilizando menos variáveis no cálculo. <b>Contras:</b> em climas áridos, onde a advecção de temperatura é mais elevada, tende a subestimar os valores de evapotranspiração.
Método de Benavides & Lopes	$T_{\min}^f, T_{\max}^f, UR_{\max}^f, UR_{\min}^f$	D	<b>Prós:</b> metodologia fácil. <b>Contras:</b> superestima os valores de evapotranspiração observados pelo método de Penman-Monteith para regiões áridas.
Método de Jensen & Hayse	$T_{\min}^f, T_{\max}^f, RS$	D	<b>Contras:</b> desenvolvido para regiões áridas.
Método de Blaney & Criddle	$T_{\min}^f, T_{\max}^f$	D, M	<b>Prós:</b> método recomendado pela FAO quando o método de Penman-Monteith não pode ser calculado. <b>Contras:</b> utilizado apenas para regiões semi-áridas.
Método de Turc	$T_{\min}^f, T_{\max}^f, RS$	D	<b>Prós:</b> apresenta boa estimativa para regiões costeiras e úmidas.
Método de Hamon	$T_{\min}^f, T_{\max}^f$	M	<b>Prós:</b> utiliza apenas dados de temperatura, sendo o seu cálculo muito simples. <b>Contras:</b> tende a superestimar os valores de evapotranspiração para regiões úmidas.
Método de Kharrufa	$T_{\min}^f, T_{\max}^f$	D	<b>Prós:</b> método com cálculo simples
Método de Radiação Solar	$T_{\min}^f, T_{\max}^f, UR_{\max}^f, UR_{\min}^f, RS, VV$	D	<b>Prós:</b> adaptado para condições de umidade e foi inserido um coeficiente que pode ser utilizado para outras condições climáticas. <b>Contras:</b> assim como o método de Penman-Monteith, requer um número maior de variáveis meteorológicas, nem sempre disponível.
Método de Romanenko	$T_{\min}^f, T_{\max}^f, UR_{\max}^f, UR_{\min}^f$	M	<b>Prós:</b> método de cálculo simples e que requer apenas dados de temperatura e umidade. <b>Contras:</b> seus valores são obtidos mensalmente.
Método de Penman	$T_{\min}^f, T_{\max}^f, RS, VV$	D	<b>Prós:</b> método bastante utilizado, com boas estimativas de evapotranspiração quando comparado com o método padrão. <b>Contras:</b> mesmo problema que o método padrão, necessita de um número elevado de variáveis que nem sempre estão disponíveis.
Método do Tanque "Classe A"	$UR_{\min}^f, UR_{\max}^f, VV, E$	D	<b>Contras:</b> método baseado na evaporação obtida pelo tanque classe "A", dependendo do observador, pode conter erros de leitura.
Método do Balanço de Energia	$T_{\min}^f, T_{\max}^f, UR_{\max}^f, UR_{\min}^f, RS$	D	<b>Prós:</b> Basicamente é o mesmo balanço que o método de Penman-Monteith faz em sua metodologia, a diferença é que nesta metodologia não existe o termo aerodinâmico, ou seja, não são necessários dados de velocidade do vento.

Abreviaturas:  $T_{\min}$  - Temperatura mínima,  $T_{\max}$  - Temperatura máxima,  $UR_{\min}$  - Umidade Relativa mínima,  $UR_{\max}$  - Umidade Relativa máxima, RS - Radiação Solar, VV - Velocidade do Vento, E - Evaporação, D - Diário, M - Mensal.

Figura 28 - Resumo geral dos métodos empíricos de estimativa de evapotranspiração. Fonte: Embrapa 2009

#### 4.1.3.2 Métodos baseados na separação de escoamento superficial e subterrâneo

Para estimativa de recarga a partir dados medidos em postos fluviométricos, existem diferentes metodologias de separação de escoamento superficial e subterrâneo, conforme apresentado na Tabela 3.

#	Método	Referência
1	PART	Rutledge (1998)
2	HYSEP1	Sloto e Crouse (1996)
3	HYSEP2	Sloto e Crouse (1996)
4	HYSEP3	Sloto e Crouse (1996)
5	BFI Padrão	Wahl e Wahl (1988)
6	BFI Modificado	Nelms et al., (2015)
7	Filtro Recursivo Digital 1 parâmetro (Bflow)	(Lyne e Hollick, 1979; Nathan e McMahan, 1990; Arnold e Allen, 1999; Arnold et al., 2000)
8	Filtro Recursivo Digital 2 parâmetros (Filtro de Eckhardt)	Eckhardt (2005)
9	Filtro Recursivo Digital Inverso	Collischonn e Fan (2013)
10	Deslocamento da Curva de Recessão (RORA)	Rutledge (1998)
11	Q90/Q50	Smakhtin (2001)
12	Q90/Q50 regional	Collischonn e Fan (2013)

Tabela 3- Métodos de estimativa de recarga a partir de dados de águas superficiais. Adaptado de Bortolin (2006).

#### 4.1.3.3 Uso de modelos de Simulação

O modelo a ser utilizado podem ser o SMAP.

Modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*)

O modelo SMAP utiliza uma estrutura de três reservatórios: um superficial (Rsup), um do solo (Rsolo) e o subterrâneo (Rsub). O armazenamento superficial (Rsup) pode ser matematicamente escrito por:

$$dRsup/dt = P - Es - Ed \quad \text{Equação 21}$$

$$Es = 0 \text{ se } P \leq AI$$

$$Es = (P - AI)^2 / P - AI - S \text{ se } P > AI$$

$$Ed = Rsup (1 - K2), \text{ onde } K2 = 0,5^{1/K2t}$$

Onde Es representa o escoamento superficial direto, obtido pelo método do *Soil Conservation Service* (SCS), Ed a vazão de depleção do escoamento superficial direto, P a precipitação, AI: abstração inicial para o método do SCS, S a abstração potencial, também para o método do SCS. Ed é definido como função do nível do reservatório superficial (Rsup) e K2t o coeficiente de depleção do reservatório superficial, como definido em Lopes (1982). Todas as unidades são em mm, exceto por dt e K2t, que possuem dimensão de tempo (dia).

O reservatório da camada superior do solo ( $R_{solo}$ ) pode ser matematicamente escrito como:

$$dR_{sup}/dt = P - E_s - E_r - Rec \quad \text{Equação 22}$$

$$E_s = E_p \text{ se } IN > E_p$$

$$E_s = IN + (E_p - IN)Ti \text{ se } IN \leq E_p$$

$$Rec = 0 \text{ se } R_{solo} \leq R_{soloM}$$

$$Rec = Crec \times TU \times (R_{solo} - R_{soloM}) \text{ se } R_{solo} > R_{soloM}$$

Onde  $P$  e  $E_s$  conforme definidos acima,  $E_r$  é a taxa de evapotranspiração,  $Rec$  é a recarga do reservatório do subsolo,  $Crec$  o coeficiente de recarga do reservatório do subsolo,  $IN$  é definido como a diferença entre  $P$  e  $E_s$  e é a parcela da precipitação que infiltra,  $TU$  o teor de umidade do solo,  $STR$  a capacidade de campo máxima do solo e  $Capc$  a capacidade de campo máxima do solo em porcentagem (LOPES et al. 1982). O reservatório do subsolo ( $R_{sub}$ ) pode ser escrito matematicamente:

$$dR_{sub} / dt = Rec - E_b \quad \text{Equação 23}$$

$$E_b = R_{sub}(1 - Kk) \text{ com } Kk = 0,5^{(1/Kkt)}$$

Onde,  $E_b$  a vazão do escoamento de base e  $Kkt$  é o coeficiente de depleção do reservatório do subsolo, como definido em Lopes et al. (1982).

$$Q_m = (E_b + E_d)CoefConv \quad \text{Equação 24}$$

Onde é  $CoefConv$  o coeficiente de conversão de mm para  $m^3/s$ , e  $Q_m$  é a vazão na saída da bacia em  $m^3/s$ . Para a calibração do modelo SMAP, Lopes (1999) sugere que seja feita a partir do início do ano hidrológico, pois neste período (seco) a vazão básica e o teor de umidade estão em seus valores mínimos.

#### 4.1.3.4 Variação do Nível de Água (VNA)

Através do inventário de poços, é possível medir a mudança na altura do lençol freático ao longo do tempo. A aplicação do método VNA, calculado conforme a equação, envolve duas etapas:

$$R = S_y \Delta H / \Delta t \quad \text{Equação 25}$$

Em que  $S_y$  é o rendimento específico e  $\Delta H$  é a mudança na altura do lençol freático para um intervalo de tempo  $\Delta t$ .

- Estimativa da elevação do nível de água: Esta estimativa deve ser realizada a partir de três abordagens: gráfica manual, curva mestre de recessão com ajuste linear empregando um código em Matlab e em RStudio (HEPPNER e NIMMO, 2005; NIMMO et al., 2015) e análise aplicada no programa RISE (DELIN et al., 2007).

Pode-se empregar uma abordagem baseada no balanço hídrico (HALL e RISSER, 1993; HEALY e COOK, 2002; WALTON, 2007) dada pela equação:

$$S_y = P - Q - ET / \Delta H(t_j) \quad \text{Equação 26}$$

Onde:

P é a precipitação (mm);

R é recarga (mm);

Q é escoamento superficial (mm); e

ET é a evapotranspiração (mm).

Para o método VNA pode-se aplicar dois métodos estatísticos de análise: auto correlação e correlação cruzada. A primeira trata da persistência de uma série temporal com ela mesma, enquanto a segunda relaciona a precipitação com o aumento do nível de água, avaliando o tempo de resposta.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E DISCUSSÕES

Como se pode perceber ao longo do trabalho, são variados os métodos para cálculo das estimativas de recarga, todavia, poucos foram realmente testados, uma vez que esse levantamento específico ainda é muito incipiente no estado e no Brasil.

Os métodos escolhidos para compor o roll de critérios para cálculo das estimativas de recarga a serem inseridos em um TR, foram aqueles que já tenham sido testados, como por exemplo, os que estão nos estudos realizados por Bortolin (2018). Além dos resultados que se mostraram condizentes e aceitáveis, os dados necessários para alimentar as fórmulas e softwares, estão disponíveis através dos levantamentos pluviométricos e fluviométricos, solo, geologia e hidrologia já existentes.

O método dos traçadores não foi escolhido para compor o TR, pois estes se mostram mais restritivos no uso como por exemplo o método dos Cloretos que são mais eficazes em climas áridos e semiáridos, o que não aplica à região de interesse. Quanto ao método dos Isótopos, estes necessitam de equipamentos mais sofisticados como os espectômetros de massa, o que pode aumentar significativamente os custos dos serviços.

Desta forma para elaboração de um TR cujo objeto é a estimativa de recarga, serão sugeridos diferentes métodos tais como balanço hídrico, separação de escoamento, modelos de simulação e variação dos níveis de água para servirem de subsídios para a elaboração de um modelo conceitual da região estudada.

É importante ressaltar que se optou por tratar somente das estimativas de recarga dos aquíferos focando nas Reservas Renováveis, tendo em vista que o cálculo das Reservas Permanentes é bem mais complexo e de um alto custo, pois exigiria um mapeamento geométrico detalhado do aquífero o que oneraria demasiadamente os serviços a serem contratados.

Muito embora tratar-se de estimativas, o conjunto de estudos permite que se tenha uma aproximação bem tangível com a realidade. Certamente que a disponibilidade de dados é peça fundamental para a diminuição do erro calculável. Uma ação paralela aos estudos hidrogeológicos tratados aqui neste trabalho, seria a ampliação dos poços de monitoramento da rede Rimas, assim como das estações meteorológicas.

Tratou-se aqui apenas do aspecto quantitativo das águas subterrâneas, já que as outorgas no RS estão focadas na análise quantitativa, embora a análise de água seja um

documento obrigatório nos processos de solicitação de outorga, fica a cargo da Secretaria da Saúde dos municípios a fiscalização quanto à potabilidade quando a finalidade dos poços destina-se ao consumo humano.

Outro aspecto a ser considerado como ação necessária paralela é a regularização de poços. No Censo IBGE 2010, foram estimados cerca de 400.000 domicílios no Rio Grande do Sul que são abastecidos por poços ou nascentes. O banco de dados do SIOUT RS conta com 4.941 (março 2022) portarias de outorga concedidas. Desta forma existe um passivo importante de irregularidade, ou seja, de vazões extraídas dos aquíferos sem o conhecimento da gestão de recursos hídricos.

Diante do cenário de aumento considerável do uso de águas subterrâneas para suprir a escassez hídrica que vem aumentando a cada ano, é imperioso que sejam conhecidas as capacidades presentes e futuras destes recursos a fim de evitar um colapso social, econômico e ambiental.

A outorga é um dos principais instrumentos de gestão de recursos hídricos instituído pela Lei das Águas. Essa permissão de uso deve ser compatível com o que o recurso dispõe e disporá para as futuras gerações.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, F. A. M.; CAVALCANTE, I.N.; MATTA, M. A. S. O sistema Aquífero Grande Amazônia - SAGA: um imenso potencial de águas subterrâneas no Brasil. Anais do III Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo. São Paulo: ABAS, 2013. 4p.

AGUIAR, R. B. Caracterização sistemática do Aquífero Serra Grande na porção nordeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba. Universidade Federal do Ceará. Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia. Fortaleza, 2017. 169 fl.: il. Color. Tese (Doutorado).

AHIABLAME, L., CHAUBEY, I., ENGEL, B., CHERKAUER, K., MERWADE, V., Estimation of annual baseflow at ungauged sites in Indiana USA, *Journal of Hydrology* (2012), [s. l.], v. 476, p. 13–27, 2013.

AKSOY, Hafzullah; KURT, Ilker; ERIS, Ebru. Filtered smoothed minima baseflow separation method. *Journal of Hydrology*, [s. l.], v. 372, n. 1–4, p. 94–101, 2009.

ALCALÁ, Francisco J.; CUSTODIO, Emilio. Spatial average aquifer recharge through atmospheric chloride mass balance and its uncertainty in continental Spain. *Hydrological Processes*, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 218–236, 2014.

ALLASIA, Daniel Gustavo et al. Large basin simulation experience in South America. *IAHS PUBLICATION*, [s. l.], v. 303, p. 360, 2006.

ALLEN, Richard G. et al. Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements. In: 1991, Anais... : ASCE, 1991.

ANA; *Cadernos De Capacitação Em Recursos Hídricos Volume 6*. Brasília: ANA 2011.

ARIHOOD, Leslie D.; GLATFELTER, Dale R. Method for estimating low-flow characteristics of ungaged streams in Indiana. [s.l.] : United States Government Printing Office, 1991.

ARNOLD, J. G. et al. Automated Base Flow Separation and Recession Analysis Techniques. *Ground Water*, [s. l.], v. 33, n. 6, p. 1010–1018, 1995.

ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment part i: model development. *Journal of the American Water Resources Association*, [s. l.], v. 34, n. 1, p.73–89, 1998.

ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records. *Journal of the American Water Resources Association*, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 411–424, 1999.

BARLOW, Paul M. et al. U.S. Geological Survey Groundwater Toolbox, a graphical and mapping interface for analysis of hydrologic data (Version 1.0) — User guide for estimation of base flow, runoff, and groundwater recharge from streamflow data. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, [s. l.], n. book 3, chap. B10, p. 27, 2015.

BLACKBURN, G.; MCLEOD, S. Salinity of atmospheric precipitation in the Murray-Darling drainage division, Australia. *Soil Research*, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 411, 1983.

BORGES, V. M. et al. Groundwater recharge estimating in the Serra Geral aquifer system outcrop area - Paraná State, Brazil. *Águas Subterrâneas*, [s. l.], v. 31, n. 4, p. 338, 2017.

BORTOLIN, T. A., Estudo da recarga do Sistema Aquífero Serra Geral na bacia hidrográfica Taquari-Antas / Tese de doutorado IPH/UFRGS. - 2018.

BRAGA, A. C. O. Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia / Antonio Celso de Oliveira Braga. -São Paulo : Oficina de Textos, 2016.

BOUSSINESQ, J. Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des 252 sources. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*. 10, 5– 78, 1904.

BRUTSAERT, W.; NIEBER, J. L. Regionalized drought flow hydrographs from a mature glaciated plateau. *Water Resources Research*, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 637–643, 1977.

BUMA, W.; LEE, S. Investigating the Changes within the Lake Chad Basin Using GRACE and LANDSAT Imageries. *Procedia Engineering*, [s. l.], v. 154, p. 403–405, 2016.

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

CHEN, W.; LEE, C.H. Estimating ground-water recharge from streamflow records. *Environmental Geology*, [s. l.], v. 44, n. 3, p. 257–265, 2003.

CHERKAUER, D. S.; ANSARI, S. A. Estimating Ground Water Recharge from Topography, Hydrogeology, and Land Cover. *Ground Water*, [s. l.], v. 43, n. 1, p. 102–112, 2005.

COLLISCHONN, W. Simulação hidrológica de grandes bacias. 2001. 270 p. Tese de doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, Porto Alegre, 2001.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B.C.; TUCCI, C.E.M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, [s. l.], v. 52, n. 5, p. 878–895, 2007.



COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. Defining parameters for Eckhardt's digital baseflow filter: DEFINING PARAMETERS FOR ECKHARDT'S DIGITAL BASEFLOW FILTER. *Hydrological Processes*, [s. l.], v. 27, n. 18, p. 2614–2622, 2013.

COOK, P. G.; ROBINSON, N. I. Estimating groundwater recharge in fractured rock from environmental  $^3\text{H}$  and  $^{36}\text{Cl}$ , Clare Valley, South Australia. *Water Resources Research*, [s. l.], v. 38, n. 8, p. 11-1-11–13, 2002.

COOK, P. G.; HERCZEG, A. L. *Groundwater chemical methods for recharge studies*. Australia: CSIRO, 1998.

CORRÊA, P. M. 2011. Critérios para a determinação de vazões outorgáveis em mananciais subterrâneos: aplicação no Distrito Federal. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 104p.

COSTA, W. D. Avaliação das reservas, potencialidades e disponibilidade de aquífero. Anais do 10 Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo: ABAS. p. Trabalho 50, p 11, 1998.

COSTA, W. D.; SIQUEIRA, L.; DIAS, R. R.; CARY, L.; ROCHA, W. J. .S.. A gestão das águas subterrâneas na região Sudeste do estado de Tocantins. XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Oct. 2012, Bonito, Brasil. pp.PAP011783, 2012.

CUNHA, V.C.V. Avaliação da Interação Entre Águas Subterrâneas e Superficiais na Bacia do Rio das Fêmeas, Sistema Aquífero Urucuia – Bahia. Dissertação (Mestrado) Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais. Comissão Nacional de Energia Nuclear/ Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 135 p., 2017.

CUSTODIO, E.; 1987. *Groundwater problem in coastal áreas*. Capítulo 2, UNESCO, Belgica, ISBN: 92-3-102415-9.

CRUZ. A.; SILVA JÚNIOR, G.C. & ALMEIDA. G.M. Modelagem hidrogeoquímica do aquífero freático da restinga de Piratininga, Niterói – RJ. *In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, 14, Curitiba, 2006. Anais, v.1, p. 1-19, 2006.

DE LUCENA, L. F.; DA ROSA FILHO, E. F.; BITTENCOURT, A. V. L. A potenciometria do Aquífero Barreiras no setor oriental da bacia do Rio Pirangi-RN e considerações sobre a relação com mananciais superficiais. *Águas Subterrâneas*, v. 18, n. 1, 2004

DELIN, G. N.; HERKELRATH, W. N. Use Of Soil Moisture Probes To Estimate Ground Water Recharge At An Oil Spill Site. *Journal of the American Water Resources Association*, [s. l.], v. 41, n. 6, p. 1259–1277, 2005.

DISSELDORP, D., YEE, M., MONERRIS, A., WALKER, J.. A temporal stability analysis of the Australian SMAP mission validation site. In: International Congress on Modelling and Simulation, 20., 2013. Proceedings [...] Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Adelaide, p. 2869–2875, 2013.

DUTRA, T. O. Análise Multiescala do Potencial Hídrico Subterrâneo na Bacia Hidrográfica Taquari-Antas (RS). Tese de doutorado IPH/UFRGS, 2018.

EDDY-MILLER, C.A., CONSTANTZ, JIM, WHEELER, J.D., CALDWELL, R.R., BARLOW, J.R.B., Demonstrating usefulness of real-time monitoring at streambank wells coupled with active streamgages—Pilot studies in Wyoming, Montana, and Mississippi: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2012–3054, 6 p., 2012.

ECKHARDT, K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 507–515, 2005.

ECKHARDT, K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. *Journal of Hydrology*, [s. l.], v. 352, n. 1–2, p. 168–173, 2008.

FAN, F.; COLLISCHONN, W.; REGINATO, Pedro. Simulação da Superfície de Equilíbrio de Água Subterrânea Aproximada em Escala Regional. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 263–276, 2014.

FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M.; FEITOSA E. C.; DEMETRIO J.G.A.; Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3 ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008.

FENN, D. HANLEY, K., DE GEARE, T. Use of the Water Balance Method for predicting leachate generation from solid waste disposal sites. US Environmental Protection Agency Report. 1975.

FETTER, C. W. Applied hydrogeology. 4 ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001. 598 p.

FILHO, J. P.; ALENCAR, C. A. Estudos Hidrogeológicos e de Modelagem Numérica de Fluxo. Rio de Janeiro. Relatório Ecologus. 2010. 47 p

FRANKEL, T. C. “Nasa data shows the world is running out of water”. *The Independent*, 17/VI/2015.

FREEZE R. A.; CHERRY J. A. Groundwater. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, New Jersey., 1979.

FREITAS, S. M. A. C. Aplicação e técnicas de quantificação da Infiltração e da recarga de aquíferos do alto Rio das velhas (MG). 2010 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.

GARCÍA, M. Gabriela et al. Sources of dissolved REE in mountainous streams draining granitic rocks, Sierras Pampeanas (Córdoba, Argentina). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, [s. l.], v. 71, n. 22, p. 5355–5368, 2007.

GASPAR, M. T. P. Sistema Aquífero Urucuaia: caracterização regional e proposta de gestão. Brasília: UNB/Instituto de Geociências. 2006. 204 p. (Tese de Doutorado nº 76)

GEBERT, Warren A.; KRUG, William R. STREAMFLOW TRENDS IN WISCONSIN'S DRIFTLESS AREA. *Journal of the American Water Resources Association*, [s. l.], v. 32, n. 4, p. 733–744, 1996.

GETIRANA, A. C. V. et al. Hydrological modelling and water balance of the Negro River basin: evaluation based on in situ and spatial altimetry data. *Hydrological Processes*, [s. l.], v. 24, n. 22, p. 3219–3236, 2010.

GOMES, Marco Antonio Ferreira. PEREIRA, Lauro Charlet. Cenário mundial dos recursos hídricos subterrâneos. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. Ano 05, Ed. 08, Vol. 15, pp. 79-97. Agosto de 2020. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/meio-ambiente/cenariomundial>

GREEN, C.; VANGRIENSVEN, A. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. *Environmental Modelling & Software*, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 422–434, 2008.

GURGEL, G.J.B.; MONTENEGRO, S.M.G.L; CABRAL, J.S.P; CAVALCANTI, G.L. Avaliação da Possibilidade da Intrusão Salina na Planície do Recife em Pernambuco. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. (2004).

GRAHAM, D. N., BUTTS, M. B.; FREVERT, D. K. Flexible integrated watershed modeling with MIKE SHE. In: *Watershed Models*, ed. V. P. Singh and D. K. Frevert. Boca Raton, Florida: CRC Press. 2006.

HABERLANDT U; KLÖCKING B; KRYSANOVA V; BECKER A. Regionalisation of the base flow index from dynamically simulated flow components — a case study in the Elbe River Basin, *Journal of Hydrology* Volume 248, Issues 1–4, 15 July 2001, Pages 35-53

HALFORD, K. J.; MAYER, G. C. Problems Associated with Estimating Ground Water Discharge and Recharge from Stream-Discharge Records. *Ground Water*, [s. l.], v. 38, n. 3, p. 331–342, 2000.

HALFORD, K.J., Discussion on “Update on the use of the RORA program for recharge estimation,” *Al Rutledge: Ground Water*, v. 46, n. 1, p. 10–11., 2008.

HEALY, R. W. Estimating groundwater recharge. RU: Cambridge University Press, 245 p. 2010.

HENRY, C. M.; ALLEN, D. M.; HUANG, J. Groundwater storage variability and annual recharge using well-hydrograph and GRACE satellite data. *Hydrogeology Journal*, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 741–755, 2011.

INSTITUTE OF HYDROLOGY, Research report, v. 1 of Low flow studies: Wallingford, United Kingdom, Institute of Hydrology, 1980. 42 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Censo demográfico, 2010.

INSTITUTO DE MEIO AMBIENTE DE MATO GROSSO DO SUL (IMASUL). Disponibilidade hídrica subterrânea. Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Desenvolvimento Econômico, Produção e Agricultura Familiar. 2015. Disponível em < [www.imasul.ms.gov.br/disponibilidade-hidrica-subterranea/](http://www.imasul.ms.gov.br/disponibilidade-hidrica-subterranea/) >. Acessado em 22/11/2021.

JUNIOR, L.O.S; CAETANO, R.C. Ciclo Hidrológico. CPRM, c2016. Disponível em < <http://www.cprm.gov.br/publique/CPRM-Divulga/Canal-Escola/Ciclo-Hidrologico-1376.html> > Acessado em 10/10/2021.

KARMANN, I. Ciclo da água: água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, Wilson et al. Decifrando a terra. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. p. 113-138. il. color. ISBN 8586238147.

LAGES, A. S. Sistema aquífero grande Amazônia: um estudo sobre a composição química das águas das cidades de Itacoatiara e Manacapuru-AM. 2016. 86f. Tese (Doutoramento em Química) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

LEAVESLEY, G.H., LICHTY, R.W., TROUTMAN, B.M., AND SAINDON, L.G., Precipitation-runoff modeling system-User's manual. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 83-4238, 207 p., 1983.

KYOUNG J. L., BERNARD A. E., ZHENXU T., JOONGDAE C., KI-SUNG K., SURESH M., DIBYAJYOTI T. Automated Web Gis Based Hydrograph Analysis Tool, *What. Journal of the American Water Resources Association*, [s. l.], v. 41, n. 6, p. 1407–1416, 2005.

LINSLEY, R. K.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. H. Hydrology for engineers. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1982.

LOPES J., BRAGA B.P.F., CONEJO J.G.L. SMAP – A simplified hydrologic model. Applied modelling in catchment hydrology/ Ed. V.P. Singh. Water Resources Publication, Littleton, Colorado, USA, 167–176 p., 1982.

LORENZ, D. L.; DELIN, G. N. A Regression Model to Estimate Regional Ground Water Recharge. *Ground Water*, [s. l.], v. 45, n. 2, p. 196–208, 2007.

MAIDMENT, D.R. GIS and hydrologic modeling. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T.; ed. *Environmental modeling with GIS*. New York, Oxford University Press, Cap. 14, p. 147-167, 1993.

MAILLET, E. *Mécanique et physique du globe, essais d'hydraulique souterraine et fluviale*. A. Hermann, 1905.

MATO GROSSO DO SUL. Secretaria de Estado de Meio Ambiente, do Planejamento, da Ciência e Tecnologia e Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul. PERHMS. Campo Grande, MS: Editora UEMS, 2010. 194 p.

MAZVIMAVI, D. ;HOKO, Z.; JONKER, L.; NHAPI, I.; SENZANJE, A. Integrated Water Resources Management (IWRM) – From Concept to Practice. *Physics and Chemistry of The Earth - PHYS CHEM EARTH*. 33. 609-613. 10.1016/j.pce.2008.07.001, 2008.

MELATI, M. D., FAN, F. M., & ATHAYDE, G. B. Estudo das interações entre as águas superficiais e subterrâneas na Bacia do Paraná 3 utilizando modelagem hidrológica e separação do escoamento de base. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22.,2018. Florianópolis. Anais [...]. Florianópolis, ABRH, 2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano (MMA/SRH). *Águas subterrâneas – um recurso a ser conhecido e protegido*. Brasília: MMA/ABAS/PETROBRÁS. 2007. 40 p.

MOURÃO M. A. A. *Caracterização Hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG*. 2007. 299 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

NATHAN, R.J.; MCMAHON, T.A. Evaluation of Automated Techniques for Base Flow and Recession Analyses. *Water Resources Research*, 26, 1465-1473, 1990.

NELMS, D. L., HARLOW, G. E. JR. AND HAYES, D. C. Base-flow characteristics of streams in the Valley and Ridge, the Blue Ridge, and the Piedmont physiographic provinces of Virginia. *US Geological Survey Water-Supply Paper 2457*, 1997.

NELMS, D.L., MESSINGER, TERENCE, AND MCCOY, K.J., Annual and average estimates of water-budget components based on hydrograph separation and PRISM precipitation for gaged basins in the Appalachian Plateaus Region, 1900–2011: U.S. Geological Survey Data Series 944, 10 p., 2015.

OLIVEIRA, D.A. (2018) Estudo Hidrogeológico do Aquífero no Bairro Amaro Lanari, em Ipatinga/MG. Monografia (Graduação) - Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 67 p.

PLANO de Enfrentamento à Estiagem. Estado do Rio Grande do Sul, 2021. Disponível em < <https://www.estado.rs.gov.br/upload/arquivos//plano-de-trabalho-estiagem.pdf> >. Acesso em 13/08/2021.

PRUSKI, F.F.; BRANDÃO, V.S., SILVA, D.D. Escoamento superficial. Viçosa: UFV, 2003, 88 p.

PETTYJOHN, W.A., HENNING, ROGER,. Preliminary estimate of ground-water recharge rates, related streamflow and water quality in Ohio: Columbus, Ohio State University, Water Resources Center Project Completion Report 552, 323 p., 1979.

PIGGOTT, A. R.; MOIN, S.; SOUTHAM, C. A revised approach to the UKIH method for the calculation of baseflow / Une approche améliorée de la méthode de l'UKIH pour le calcul de l'écoulement de base. Hydrological Sciences Journal, [s. l.], v. 50, n. 5, 2005.

PONTES,P.R.M.; FAN, F.M.; FLEISCHMANN, A.S.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D.C.; SIQUEIRA, V. A.; JARDIM, P. F. ; SORRIBAS, M. V.; COLLISCHONN, W. MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. Environmental Modelling & Software, [s. l.], v. 94, p. 1–20, 2017.

RABELO, J. L. Estudo da Recarga do Aquífero Guarani no Sistema Jacaré-Tietê. 200 f., 2006. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

RICHEY, A. S.; THOMAS, B. F.; LO, Min-Hui; REAGER, J. T; FAMIGLIETTI, J. S.; VOSS, K.; SWENSON, S. ; RODELL, M.. Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. Water Resources Research, P. 5217 – 5238, 2015.

RISSER, D. W.; GBUREK, W. J.; FOLMAR, G. J. Comparison of Methods for Estimating Ground-Water Recharge and Base Flow at a Small Watershed Underlain by Fractured Bedrock in the Eastern United States. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 31., 2005.

RORABAUGH, M.I., Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow: International Association of Scientific Hydrology Publication 63, p. 432–441. 1964.

ROSENBERRY, D. O., LABAUGH, J. W., HUNT, R. J.. Use of monitoring wells, portable piezometers, and seepage meters to quantify flow between surface water and ground water. In: Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water,

ed. D. I. Rosenberry and J. W. Labaugh. US Geological Survey Techniques and Methods 4-D2, 39–70, 2008.

RUBIN, J.; STEINHARDT, R.. Soil water relations during rain infiltration: I. Theory. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 27, pp. 246–251, 1963.

RUTLEDGE, A. T. Update on the Use of RORA Program for Recharge Estimation. *Groundwater*, v. 45, n. 3, p. 374–382, 2007.

RUTLEDGE, A.T., Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow 215 records—Update: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98– 4148, 43 p., 1998.

RUTLEDGE, A. T. AND MESKO, T. O. Estimated hydrologic characteristics of shallow aquifer systems in the Valley and Ridge, the Blue Ridge, and the Piedmont physiographic provinces based on analysis of streamflow recession and base flow. US Geological Survey Professional Paper 1422-B, 1996.

SANTIAGO, M. F.; FRISCHKORN, H.; Silva, C. M. S. V. , 2008. Métodos Isotópicos in FEITOSA F. A. C. et. al., 2008, Hidrogeologia: conceitos e aplicações, CPRM, 812 p. Il. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 18–39, 2002.

SCANLON, B. R.; KEESE, K. E.; FLINT, A. L.; FLINT, L. E.; GAYE C. B.; EDMUNDS W. M.; SIMMERS, I. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*, [s. l.], v. 20, n. 15, p. 3335–3370, 2006.

SCHWARTZ, R. C.; BAUMHARDT, R. L.; HOWELL, T. A. Estimation of Soil Water Balance Components Using an Iterative Procedure. *Vadose Zone Journal*, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 115, 2008.

SILVA JÚNIOR, G. C.; LOWSBY, M.G.; ALVES, M.G; FERRUCIO, P. L.; MONTEIRO, A. C.; ALMEIDA R. R. A Problemática da Intrusão Marinha nos Aquíferos Costeiros do Leste Fluminense: Um Estudo de Caso - A Região Oceânica de Niterói. CPRM, 2000.

SIMMERS, I.; North Atlantic Treaty Organization (EDS.). Estimation of natural groundwater recharge. Dordrecht; Boston: Norwell, MA, U.S.A: D. Reidel Pub. Co.; Sold and distributed in the U.S.A. and Canada by Kluwer Academic Publishers, 1987.

SIQUEIRA, V.A.; PAIVA, R.C.D.; FLEISCHMANN, A.S.; FAN, F.M.; RUHOFF, A.L.; PONTES, P.R.M.; PARIS, A.; CALMANT, S.; COLLISCHONN, W. Toward continental

hydrologic-hydrodynamic model in South America, *Hidrol. Sistema Terra. Sci.*, 22, 4815-4842, <https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>, 2018.

SLOTO, R.A.; CROUSE, M.Y.. HYSEP—A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96-4040, 46 p., 1996.

SMAKHTIN, V. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, [s. l.], v. 240, n. 3–4, p. 147–186, 2001.

SOPHOCLEOUS, M. Interactions between groundwater and surface water: The state of the science. *Hydrogeology Journal*, v. 10, n. 1, p. 52–67, 2002

STONESTROM, D.A., CONSTANTZ, J.I.M. Heat as a tool for studying the movement of ground water near streams: U.S. Geological Survey Circular 1260, 96 p., 2003

STRICKER, V. Base flow of streams in the outcrop area of southeastern sand aquifer, South Carolina, Georgia, Alabama, and Mississippi. US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 83-4106., 1983.

SZILAGYI, J.; HARVEY, F. E.; AYERS, J. F. Regional Estimation of Base Recharge to Ground Water Using Water Balance and a Base-Flow Index. *Ground Water*, [s. l.], v. 41, n. 4, p. 504–513, 2003.

TÓTH, J. A Theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, v. 68, n. 16, p. 4785–4812, 1963.

TUCCI, C.E.M. Impactos da variabilidade climática e do uso do solo nos recursos hídricos. Agência Nacional de Águas: Câmara Temática sobre Recursos Hídricos - Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas. 150 p., 2002.

UNIVERSIDADE Estadual do Oeste do Paraná; ITAIPU Binacional; AGUASPARANÁ; COMITÊ da Bacia Hidrográfica do Paraná 3. PLANO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARANÁ3. Disponível em < [https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos\\_restritos/files/documento/2020-05/produto\\_03\\_2\\_diagnostico\\_disponib\\_hidricas\\_subterraneas\\_bp3\\_2014\\_v04\\_final.pdf](https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-05/produto_03_2_diagnostico_disponib_hidricas_subterraneas_bp3_2014_v04_final.pdf) >. Acesso em 08/09/2021.

VALENTE C.; GOLART G.; NECTOUX M. Boletim Especial de Estiagem de 2019 a 2021 – Sala de Situação – 26/07/2021 site da SEMA. <https://sema.rs.gov.br/sema-divulga-novo-boletim-sobre-situacao-da-estiagem-no-rs.>, 2021.



YATES, D. et al. WEAP21 – A demand, priority, and preference-driven water planning model. Part 1: Model Characteristics. IWRA, Water International, v. 30, n. 4, p. 487-500, 2005.

WAHL, K.L., WAHL, T.L., Determining the flow of Comal Springs at New Braunfels, Texas, In: Proceedings: of Texas Water 95, August 16–17, 1995, San Antonio, Tex.: American Society of Civil Engineers, p. 77–86., 1995.

WENDLAND, E.; CUNHA, A. T. Estimativa experimental da taxa de recarga para a Zona de Afloramento do Aquífero Guarani, na região de São Carlos - SP. Rev. Bras. Rec. Híd., v. 1, p. 1-12., 2003.

WITTENBERG, Hartmut. Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes. Hydrological Processes, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 715–726, 1999.

WINTER, T. C.; HARVEY, J. W.; FRANKE, O. L.; ALLEY, W. M. Groundwater and Surface Water A Single Resource. U.S. Geological Survey Circular 1139. Denver, Colorado, 1998.

YEE, M. S.; WALKER J. P.; MONERRIS A.; RÜDIGER C.; JACKSON, T. J. On the identification of representative in situ soil moisture monitoring stations for the validation of SMAP soil moisture products in Australia. Journal of Hydrology, [s. l.], v. 537, p. 367–381, 2016.

ZHANG, Y.; AHIABLAME, L.; ENGEL, B.; LIU, J. Regression Modeling of Baseflow and Baseflow Index for Michigan USA. Water, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 1797–1815, 2013.

ZHU, C.; WINTERLE, J. R.; LOVE, E. I. Late Pleistocene and Holocene groundwater recharge from the chloride mass balance method and chlorine-36 data. Water Resources Research, [s. l.], v. 39, n. 7, 2003.