

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Éricklis Edson Boito de Souza

**USO DE MÉTODO GEOFÍSICO NA CARACTERIZAÇÃO DE
PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS SOB EUCALIPTO E CAMPO**

Santa Maria, RS
2021

Éricklis Edson Boito de Souza

**USO DE MÉTODO GEOFÍSICO NA CARACTERIZAÇÃO DE PEQUENAS BACIAS
HIDROGRÁFICAS SOB EUCALIPTO E CAMPO**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Área de Concentração em Silvicultura, como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**.

Orientador: Prof. PhD. José Miguel Reichert

Santa Maria, RS, Brasil
2021

Boito de Souza, Éricklis Edson
USO DE MÉTODO GEOFÍSICO NA CARACTERIZAÇÃO DE PEQUENAS
BACIAS HIDROGRÁFICAS SOB EUCALIPTO E CAMPO / Éricklis
Edson Boito de Souza.- 2021.
97 p.; 30 cm

Orientador: José Miguel Reichert
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2021

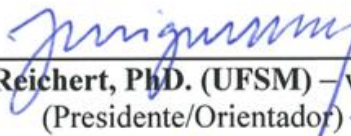
1. Balanço hídrico 2. Hidrologia florestal 3. Meio
subterrâneo 4. Recarga I. Reichert, José Miguel II. Título.

Éricklis Edson Boito de Souza

**USO DE MÉTODO GEOFÍSICO NA CARACTERIZAÇÃO DE PEQUENAS BACIAS
HIDROGRÁFICAS SOB EUCALIPTO E CAMPO**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Área de Concentração em Silvicultura, como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**.

Aprovado em 25 de fevereiro de 2021:



José Miguel Reichert, Ph.D. (UFSM) – videoconferência
(Presidente/Orientador)



Edner Baumhardt, Dr. (UFSM/FW) – videoconferência



Pedro Daniel da Cunha Kemerich, Dr. (UNIPAMPA) – videoconferência

Santa Maria, RS
2021

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à minha família, especialmente aos meus pais, Ernande Vargas de Souza e Cristina Maria Boito.

AGRADECIMENTOS

A realização desse estudo só foi possível por meio do apoio de várias pessoas. Especialmente, agradeço:

- ao professor PhD José Miguel Reichert, pela confiança em mim depositada e por concretizar essa pesquisa. Além disso, agradeço pela dedicação em me orientar durante o período do mestrado;

- aos meus pais, Ernande Vargas de Souza e Cristina Maria Boito, pelo apoio incondicional, em todos os momentos da minha vida;

- ao professor-doutor Pedro Daniel da Cunha Kemerich, pela disposição e atenção em me ajudar, nas idas a campo, pela amizade e os valiosos conselhos. Além disso, agradeço pela participação na banca examinadora;

- ao professor-doutor Edner Baumhardt, pelo incentivo para ingressar na pós-graduação e pela orientação e amizade durante a graduação. Também agradeço pela participação na banca examinadora;

- ao professor-doutor Willian Fernando de Borba, pela ajuda, conselhos e dicas, que agregaram significativamente nesse trabalho. Ademais, agradeço pela amizade;

- ao professor-doutor Maximilian Fries, por meio do Laboratório de Geofísica Aplicada da Universidade Federal do Pampa, pela ajuda com os dados de Geofísica;

- ao analista de Hidrologia Florestal da CMPC, doutor José Carlos de Deus Júnior, pela atenção, confiança e por permitir a condução desse trabalho;

- ao mestre e engenheiro ambiental e sanitaria Gabriel D'Avilla Fernandes, por dedicar grande parte do seu tempo em me ajudar, tornando possível finalizar esse trabalho;

- ao mestre e geofísico Lenon Melo Ilha, pela ajuda nos campos geofísicos;

- ao engenheiro florestal Guilherme Valcorte pelas horas incansáveis de estudos nas disciplinas da pós-graduação e ajuda nas idas a campo;

- à geofísica Marieli Machado Zago, pelo tempo dedicado na ajuda do processamento e interpretação dos dados geofísicos;

- ao mestre e engenheiro florestal Edberto Moura Lima, pelas dicas, conselhos durante o mestrado e ajuda nos campos;

- ao mestre e engenheiro-agrônomo Éderson Diniz Ebling; à mestre e engenheira florestal Franciele de Bastos; à mestre Thais Palumbo Silva, pela ajuda com os dados e nas idas a campo;

- à engenheira florestal Thaynara Diuliane Carvalho Paz pela ajuda no processamento das amostras;

- à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com ensino gratuito e de qualidade, pela oportunidade de concretizar esse trabalho;

- ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Florestal, pela oportunidade e disponibilidade de cursar o mestrado;

- à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio por meio de bolsa de pós-graduação;

- ao Laboratório de Física e Hidrologia do Solo do CCR da UFSM, pelo espaço disponibilizado, permitindo a conclusão deste trabalho;

- à Universidade Federal do Pampa, pela parceria e disponibilidade para utilização dos equipamentos geofísicos, sendo fundamental para a conclusão desse trabalho;

- à CMPC, por oportunizar a realização desse trabalho.

Enfim, agradeço a todos que fizeram parte dessa jornada.

EPÍGRAFE

*"É o que você faz agora que faz a
diferença."*

*Sgt. Struecker (Brian Van Holt)
Filme Falcão Negro em Perigo*

RESUMO

USO DE MÉTODO GEOFÍSICO NA CARACTERIZAÇÃO DE PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS SOB EUCALIPTO E CAMPO

AUTOR: Éricklis Edson Boito de Souza

ORIENTADOR: José Miguel Reichert

A demanda por produtos de origem florestal vem aumentando gradativamente nos últimos anos. Assim, o eucalipto surge como uma fonte de matéria prima essencial para diversos setores da economia global, em razão do seu rápido crescimento e incorporação da biomassa em curto prazo. Devido à utilização dos recursos naturais no ciclo produtivo dessa espécie florestal, torna-se vital a sua gestão adequada. Dessa forma, busca-se um equilíbrio entre a produção e a preservação do meio ambiente. Diante disso, este estudo buscou caracterizar a hidrologia do meio subterrâneo em três pequenas bacias hidrográficas (BHs) com cultivo de eucalipto e campo da Região da Campanha do Estado do Rio Grande do Sul. Essas bacias estão sob o uso de *Eucalyptus saligna* (BEs) com 79,89 hectares, *Eucalyptus benthamii* (BEb) com 82,09 hectares e campo natural antropizado degradado (BC) com 109,36 hectares para atividades de pecuária. O monitoramento das variáveis hidrológicas e hidrogeológicas foi realizado de forma independente nas áreas estudadas; porém, devido ao menor número de falhas, os dados pluviométricos, da BC foram utilizados para o período 01/01/2019 até 15/06/2019. Para análise granulométrica do solo foram coletadas amostras superficiais, onde o teor de areia foi determinado por meio de peneiramento, e os teores de argila e de silte pelo método da pipetagem. Além disso, foi estimada a recarga subterrânea dos poços de monitoramento presente nas BHs (dois em cada), pelo método Water Table Fluctuation, para um período antecedente de 197 dias para cada ensaio geofísico. Portanto, o balanço hídrico em escala de BH também foi analisado no mesmo período determinado para a recarga, obtendo os valores de precipitação e vazão, e estimando a evaporação do solo, a transpiração vegetal e a evaporação da água interceptada pela vegetação. O balanço hídrico no perfil do solo foi calculado para todos os meses de 2019 até 15/06/2020. Para a caracterização do meio subterrâneo foi empregado o método geofísico tomografia por resistividade elétrica, em 19/11/2019 e 04/06/2020, em nove transectos, sendo três em cada BH. A infiltração de água no solo foi obtida por meio do infiltrômetro de Cornell. Com o emprego do método geofísico foi possível determinar a ocorrência de diferenças nas geometrias entre os períodos analisados. A recarga mostrou-se maior para as bacias hidrográficas sob cultivo de eucalipto quando comparadas à recarga da BC. Os valores de precipitação encontrados para os 197 dias antes do primeiro e do segundo ensaio foram de 1.098,5 mm e 478,5 mm, respectivamente. A interceptação foi 248,4 mm, 356,1 mm e 149,4 mm, enquanto a evapotranspiração foi de 624,3 mm, 512,6 mm e 299,5 mm para a BEb, BEs e BC, de modo respectivo, para o período (197 dias) anterior ao primeiro ensaio geofísico. Para o período que antecede a segunda quantificação de precipitação, os valores de interceptação foram de 108,3 mm, 154,9 mm e 65,1 mm e a evapotranspiração foi 347,6 mm, 257,0 mm e 328,7 mm para a BEb, BEs e BC, respectivamente. A análise granulométrica demonstrou valores significativos de areia, classificando o solo como franco arenoso ou franco argiloso arenoso. A partir dos testes de infiltração foi possível verificar que a BC pode apresentar maior escoamento superficial quando comparada as demais, devido à influência da tipologia vegetal em cada BH. Com as análises do balanço hídrico, é possível afirmar que, no intervalo entre os ensaios geofísicos, houve uma redução na disponibilidade de água. Contudo, o balanço hídrico no perfil do solo para o segundo campo mostrou que houve um excedente hídrico, devido à alta precipitação (199,9 mm) no mês anterior. Dessa forma, a técnica geofísica pode ser empregada na caracterização do meio subterrâneo em plantios florestais. Ademais, os resultados relacionam-se com as variáveis hidrológicas que antecederam os campos e sofrem influência do uso e cobertura do solo.

Palavras-Chave: Balanço hídrico. Hidrologia florestal. Meio subterrâneo. Recarga.

ABSTRACT

USING GEOPHYSICAL METHOD TO FEATURE WATERSHEDS UNDER EUCALYPTUS AND GRASSLAND SYSTEMS

AUTHOR: Éricklis Edson Boito de Souza

ADVISOR: José Miguel Reichert

The demand for forest products has gradually increased in recent years. Thus, eucalyptus has emerged as an essential source of raw material for several global economy sectors, mainly due to its rapid growth and biomass incorporation in the short-term. However, natural resources used in the production cycle of this forest species require managing it properly. Thus, finding the balance between production and environmental preservation is necessary. The aim of the current study is to characterize the hydrology of the underground environment of three small watersheds associated with eucalyptus and grassland cultivation in the Campanha region, Rio Grande do Sul State, Brazil. The aforementioned watersheds comprise 79.89 hectares of *Eucalyptus saligna* (EsB), 82.09 hectares of *Eucalyptus benthamii* (EbB), and 109.36 hectares of degraded anthropized natural grassland (GB) used for livestock grazing. Hydrological and hydrogeological variables in the investigated areas were monitored in an independent way, but rainfall data from GB was used for the period from 01/01/2019 to 06/15/2019. Surface soil samples were collected for granulometric analysis; sand content was determined through sieving, whereas clay and silt contents were determined based on the pipetting method. In addition, the underground recharge of monitoring wells (two monitoring wells in each watershed) was estimated based on the Water Table Fluctuation method, by taking into consideration the period of 197 days before each geophysical test. Therefore, water balance at watershed scale was also analyzed in the same period determined for water recharge, based on rainfall and water flow values, as well as on estimates of soil water evaporation, plant transpiration and of the evaporation of water intercepted by plants. Water balance in the soil profile was calculated for all months from 2019 to 06/15/2020. The geophysical method based on electrical resistivity tomography was used to characterize the underground environment on 11/19/2019 and 6/4/2020, in nine transects, three in each watershed. Water infiltration in the soil was measured with Cornell infiltrometer. The geophysical method enabled determining differences in geometries between the analyzed periods. Water recharge was greater in watersheds under eucalyptus cultivation than in GB. Rainfall values recorded for the 197 days before the first and second measurements were 1,098.5 mm and 478.5 mm, respectively. Interception reached 248.4 mm, 356.1 mm and 149.4 mm, whereas evapotranspiration reached 624.3 mm, 512.6 mm and 299.5 mm in EbB, EsB and GB, respectively, in the period (197 days) before the first geophysical test. Rainfall interception by canopy recorded period before the second rainfall measurement reached 108.3 mm, 154.9 mm and 65.1 mm, whereas evapotranspiration reached 347.6 mm, 257.0 mm and 328.7 mm in EbB, EsB and GB, respectively. Granulometric analysis showed significant values for sand, which categorized the soil as sandy loam or sandy-clayey loam. Based on infiltration tests GB can present greater surface runoff than the other watersheds, due to the influence of plant typology in each watershed. Based on the water balance analysis, there was decreased water availability in the interval between the two geophysical tests. However, the water balance in the soil profile of the second test showed water surplus due to high rainfall rates (199.9 mm) in the previous month. Thus, the geophysical technique can be used to characterize the underground environment in forest plantations. Furthermore, the current results were associated with the hydrological variables that preceded the field tests and that are influenced by land use and cover.

Keywords: Forest hydrology. Underground environment. Water balance. Water recharge.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução dos plantios florestais comerciais no Brasil entre 2013 e 2018.	21
Figura 2 – Biomas do estado do Rio Grande do Sul.	22
Figura 3 – Produtividade e rotação média no Brasil e outros países.	25
Figura 4 – Esquema de Caminhamento Elétrico utilizando o Arranjo Dipolo-Dipolo.	31
Figura 5 – Localização da área de estudo. (a) predomínio de <i>Eucalyptus benthamii</i> (BEb); (b) predomínio de <i>Eucalyptus saligna</i> adulto (BEs); (c) campo natural antropizado degradado e pastagem manejada (BC).	35
Figura 6 – Usos do solo da área de estudo.	36
Figura 7 – Classes de solos encontradas na área de estudo.	37
Figura 8 – Litologias presentes na área de estudo, poços da rede SIAGAS (pontos amarelos) e limites da área de aquisição de dados geofísicos (retângulo vermelho).	38
Figura 9 – Sistemas Aquíferos no município de São Gabriel.	39
Figura 10 – Triângulo textural.	40
Figura 11 – Infiltrômetro de Cornell.	41
Figura 12 – Localização dos piezômetros e pluviômetro.	43
Figura 13 – Extrapolação da curva de recessão de um aquífero para utilização do WTF.	45
Figura 14 – Resistímetro <i>Syscal Pro</i> da <i>IRIS Instruments</i> ®.	48
Figura 15 – Aplicação do método geofísico na área de estudo.	49
Figura 16 – Localização das Linhas Geofísicas na área de estudo.	50
Figura 17 – Informações empregadas na interação e descrição geológica. Coluna litológica dos poços tubulares (a) e localização dos poços (b).	53
Figura 18 – Taxa de infiltração na BC na L1 campo 1(a) e campo 2 (b).	55
Figura 19 – Taxa de infiltração na BC na L2 campo 1(a) e campo 2 (b).	56
Figura 20 – Taxa de infiltração na BC na L3 campo 1(a) e campo 2 (b).	56
Figura 21 – Taxa de infiltração na BEs na L4, campo 2.	57
Figura 22 – Taxa de infiltração na BEs na L5, campo 2.	58
Figura 23 – Taxa de infiltração na BEb na L6 campo 1(a) e campo 2 (b).	58
Figura 24 – Precipitação para a área de estudo.	61
Figura 25 – Vazão x precipitação para o período de estudo.	62
Figura 26 – Nível dos poços nas bacias hidrográficas.	65
Figura 27 – Balanço hídrico sequencial adaptado de Thornthwaite and Mather (1955) e nível dos poços de monitoramento para a BEb.	72
Figura 28 – Balanço hídrico sequencial adaptado de Thornthwaite and Mather (1955) e nível dos poços de monitoramento para a BEs.	73
Figura 29 – Balanço hídrico sequencial adaptado de Thornthwaite and Mather (1955) e nível dos poços de monitoramento para a BC.	74
Figura 30 – Seções de eletrorresistividade da campanha de campo em novembro de 2019.	76
Figura 31 – Seções de eletrorresistividade da campanha de campo em junho de 2020.	77
Figura 32 – Seções interpretadas da campanha de campo realizada em novembro de 2019.	78
Figura 33 – Seções interpretadas da campanha de campo realizada em junho de 2020.	79
Figura 34 – a) Seção L4 executada em novembro de 2019; b) seção L4 executada em junho de 2020.	82
Figura 35 – a) seção L7 executada em novembro de 2019; b) seção L7 executada em junho de 2020.	82
Figura 36 – a) Seção L9 executada em novembro de 2019; b) seção L9 executada em junho de 2020.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de resistividade de alguns materiais e rochas.....	32
Tabela 2 – Informações dos poços de monitoramento presente nas bacias hidrográficas.	43
Tabela 3 – Valores de resistividade elétrica da água em diversos ambientes geológicos.	52
Tabela 4 – Valores de resistividade para os diferentes tipos de rochas.....	52
Tabela 5 – Granulometria do solo para as coletas superficiais.....	54
Tabela 6 – Recarga dos piezômetros PZ1 e PZ2 da BEb.	66
Tabela 7 – Recarga dos piezômetros PZ1 e PZ2 da BEs.	67
Tabela 8 – Recarga dos piezômetros PZ1 e PZ2 da BC.....	68
Tabela 9 – Balanço hídrico para os períodos antecedentes aos ensaios geofísicos (197 dias cada): precipitação (P); vazão (Q); interceptação (Int); evaporação do solo e transpiração vegetal (ETa); % em relação ao valor da P.	70
Tabela 10 – Diferença entre os campos da Zona Saturada, Zona 1, Zona 2 e Zona Insaturada.	80

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

%	Porcentagem
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
BC	Bacia hidrográfica com predomínio de campo natural antropizado degradado
BEb	Bacia hidrográfica com cultivo de <i>Eucalyptus benthamii</i>
BEs	Bacia hidrográfica com cultivo de <i>Eucalyptus saligna</i>
BHs	Bacias hidrográficas
CAD	Capacidade de água disponível
CCR	Centro de Ciências Rurais
cm	Centímetros
CMPC	Celulose Riograndense
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DEF	Déficit hídrico
ec2	Embasamento Cristalino II
ec3	Embasamento Cristalino III
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ES	Escoamento Superficial
ETa	Evaporação do Solo e Transpiração Vegetal
ETo	Evapotranspiração de referência
EXC	Excedente hídrico
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
horas/dias	Horas por dia
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INT	Evaporação de água pela vegetação
IRGA	Instituto Rio Grandense do Arroz
km ²	Quilômetro quadrado
LISEM	<i>Limburg Soil Erosion Model</i>
m	Metros
m/s	Metros por segundo
m ²	Metros quadrados
m ³ /ha.ano	Metros cúbicos por hectare por ano
MFS	Manejo Florestal Sustentável
mm	Milímetro
mm/h	Milímetros por hora
NaCl	Cloreto de Sódio
NBR	Norma Brasileira
n°	Número
°C	Graus Celsius
ohm/m	ohm por metro
pr	Palermo/Rio Bonito
Pt	Precipitação
Q	Vazão
R	Recarga
REP	Reposição de água
RET	Retirada de água

RS	Rio Grande do Sul
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
sp	Sistemas Aquíferos Sanga do Cabral/Pirambóia
TI	Taxa de Infiltração
TRE	Tomografia por Resistividade Elétrica
UNIPAMPA	Universidade Federal do Pampa
WTF	<i>Water Table Fluctuation</i>
XIX	Dezenove
ρ	Resistividade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo geral.....	17
1.1.2	Objetivos específicos	17
1.2	JUSTIFICATIVA E HIPÓTESE	18
2	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	CULTIVO DE ESPÉCIES FLORESTAIS.....	19
2.1.1	Indicadores produtivos no Brasil	20
2.2	BIOMA PAMPA	21
2.3	EUCALIPTO	23
2.3.1	Características e manejo do eucalipto	24
2.4	BACIAS HIDROGRÁFICAS	25
2.5	RECARGA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	27
2.6	BALANÇO HÍDRICO	28
2.7	INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA.....	29
2.7.1	Tomografia por Resistividade Elétrica e arranjos de campo	30
2.8	INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO.....	32
3	MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1	CARACTERÍSTICAS DO LOCAL DE ESTUDO.....	34
3.1.1	Usos do solo	35
3.1.2	Solos	36
3.1.3	Caracterização geológica.....	37
3.1.4	Caracterização hidrogeológica	38
3.2	CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO.....	39
3.2.1	Granulometria do solo.....	39
3.2.2	Determinação da infiltração de água no solo	40
3.3	MONITORAMENTO HIDROLÓGICO.....	42
3.3.1	Estimativa da vazão da BEb	44
3.4	ESTIMATIVA DA RECARGA SUBTERRÂNEA	44
3.5	BALANÇO HÍDRICO	46
3.5.1	Balanço hídrico em escala de bacia hidrográfica.....	46
3.5.1.1	<i>Evapotranspiração de referência</i>	<i>47</i>
3.5.1.2	<i>Evapotranspiração real (ETa).....</i>	<i>47</i>
3.5.2	Balanço hídrico no perfil do solo	47
3.6	CARACTERIZAÇÃO DA SUBSUPERFÍCIE.....	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
4.1	MAPEAMENTO GEOLÓGICO	53
4.2	CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO.....	54
4.2.1	Granulometria.....	54
4.2.2	Infiltração de água no solo	55
4.3	MONITORAMENTO HIDROLÓGICO.....	60
4.3.1	Precipitação	60
4.3.2	Vazão.....	61
4.3.3	Níveis da água subterrânea.....	63
4.4	ESTIMATIVA DA RECARGA SUBTERRÂNEA	66
4.5	BALANÇO HÍDRICO	69
4.5.1	Balanço hídrico em escala de bacia hidrográfica.....	69

4.5.2	Balço hídrico no perfil do solo.....	70
4.6	GEOFÍSICA APLICADA À CARACTERIZAÇÃO DA SUBSUPERFÍCIE.....	75
5	CONCLUSÃO.....	84
	REFERÊNCIAS.....	86

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e o crescimento da população mundial resultam em maior demanda por produtos florestais, os quais são requisitados por diversos setores da economia. Assim, as florestas nativas tornam-se alvos para suprir essa necessidade. Entretanto, com a evolução da tecnologia do setor florestal, essa demanda é provida por plantios certificados ambientalmente; logo, pode resultar em maior preservação de florestas naturais.

Apesar do aumento de plantios florestais em escala global, houve redução da área florestal nos últimos 50 anos (JONES et al., 2020). Dessa forma, o Manejo Florestal Sustentável (MFS) surge como alternativa para minimizar impactos oriundos da demanda por madeira. Para Riccioli et al. (2020), as diretrizes atuais do MFS baseiam-se em programas de planejamento capazes de atingir metas do ponto de vista socioeconômico e ambiental. No cenário nacional, Baumhardt (2014) afirma que o setor florestal apresenta dificuldades em compreender e executar o MFS.

A introdução de plantios florestais em áreas com pouca cobertura vegetal altera fatores hidrológicos, como a infiltração e armazenamento de água no solo, a interceptação e entre outros. Embora o conhecimento da hidrologia florestal seja amplo, as mudanças florestais e seus efeitos para hidrologia são pouco documentadas em muitas áreas do mundo. Portanto, há necessidade de estudos geográficos e de longo prazo baseados no monitoramento de locais de florestas e água (JONES et al., 2020). O comportamento ao longo das estações climáticas deve ser estudado, pois podem ocorrer alterações no nível freático e nos índices físicos do solo em decorrência da variabilidade da precipitação, temperatura, umidade relativa do ar, entre outros. Assim, pode haver uma variação na necessidade hídrica para o desenvolvimento da planta.

A implantação de um sistema de monitoramento dos recursos hídricos subterrâneos, que permita obter informações detalhadas sobre o estado atual desses recursos, é imprescindível para o planejamento e gestão, de forma eficiente (BARRETO; GOMES; WENDLAND, 2010). Ademais, para Uil (1999) o monitoramento hidrogeológico deve informar sobre a dinâmica do aquífero em relação às variações sazonais e efeitos antrópicos.

Dessa forma, os impactos hidrológicos do manejo florestal são variáveis, mas geralmente menores, especialmente quando as melhores práticas de manejo são adotadas (SUN et al., 2001). Contudo, Baumhardt (2014) salienta que estudos que relacionam a produção de água em uma pequena bacia hidrográfica sob efeito da silvicultura podem ser divergentes sobre o real efeito da floresta.

Dentre os métodos de monitoramento do meio subterrâneo, os geofísicos têm sido amplamente utilizados (CHANDRA et al., 2010; MCLACHLAN et al., 2017; MANSOUR et al., 2018; KNIGHT; WERNER; IRVINE, 2019; EZEMA; IBUOT; OBIORA, 2020). Os métodos geofísicos surgiram como uma importante alternativa para a investigação não invasiva (ou minimamente invasivas) do subsolo. Ademais, existem várias técnicas geofísicas aplicadas à investigação do meio subterrâneo, com destaque para a técnica conhecida como Tomografia por Resistividade Elétrica (TRE) (FAN et al., 2020). Os mesmos autores complementam que a TRE é uma fonte ativa que usa uma corrente elétrica de baixa frequência para mensurar as distribuições de resistividade elétrica na subsuperfície. Os valores de resistividade elétrica podem ser influenciados pelas propriedades do solo, como, porosidade, teor de argila, umidade do solo, condutividade da água dos poros, entre outros (PARSEKIAN et al., 2015). Assim, a TRE é uma ferramenta que possibilita a obtenção de imagens de estruturas de subsuperfície e processos hidrogeológicos (CHAMBERS et al., 2014).

Diante disso, estudos que integram os recursos hídricos com o cultivo de espécies florestais tornam-se importantes para conhecer os efeitos significativos dessa prática nas variáveis hidrológicas. Com isso, gestores possuem subsídios para tomar decisões e, conseqüentemente, tem-se uma facilitação no emprego do MFS.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

A presente dissertação tem como objetivo geral a caracterização hidrológica do meio subterrâneo de três pequenas bacias hidrográficas com cultivo de eucalipto e campo da Região da Campanha Gaúcha.

1.1.2 Objetivos específicos

Quantificação dos parâmetros hidrológicos e hidrogeológicos em diferentes períodos em bacias hidrográficas com distintos usos;

Identificação do comportamento hidrológico em diferentes períodos do ano em bacias hidrográficas com distintos usos;

Quantificação das variações do nível freático sob o uso florestal e de campo, em distintos períodos do ano;

Identificação da presença de déficit ou excedente hídrico nos períodos antecedentes aos ensaios geofísicos em bacias hidrográficas com distintos usos.

1.2 JUSTIFICATIVA E HIPÓTESE

Este estudo justifica-se pela problemática encontrada pelo setor florestal brasileiro com o uso inadequado dos ecossistemas, pois ainda há dificuldade para a aplicação do manejo florestal sustentável. Estudos regionalizados que identifiquem os reais impactos dessas atividades, em especial sobre os recursos hídricos são necessários. A hipótese do estudo é que, em períodos de déficit hídrico, a bacia hidrográfica florestada com eucalipto apresenta maior zona saturada do solo e maior recarga da água subterrânea em relação à bacia hidrográfica de campo manejado e degradado no bioma Pampa; em períodos com maior disponibilidade de água, a zona saturada do solo é maior na bacia hidrográfica de campo manejado e degradado quando comparada às bacias hidrográficas com eucalipto.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CULTIVO DE ESPÉCIES FLORESTAIS

Mundialmente, as tendências de utilização de produtos florestais resultam em uma crescente demanda por madeira devido ao desenvolvimento industrial e populacional, porém, grande parte da base dessa matéria prima é restrita às florestas nativas (BROWN; BALL, 2000). Os mesmos autores ainda afirmam que, à medida em que as florestas são suprimidas, degradadas ou empregadas para fins comerciais, o ônus colocado em florestas comerciais aumenta proporcionalmente. A cada ano da penúltima década, em nível global, cerca de 13 milhões de hectares de florestas foram convertidos para outros usos ou perdidos por causas naturais (FAO, 2010). O Brasil lidera a lista dos dez países com maior decréscimo anual de área florestal, com uma taxa de supressão 2.126.700 hectares por ano, totalizando 531.675 km² entre 1990 a 2015 (FAO, 2015). Esse valor representa 6,25% da área territorial brasileira. Em relação à evolução da área mundial de florestas plantadas entre os anos de 1990 a 2015, o Brasil ocupa a nona posição na lista, com 7.736.000 hectares de florestas plantadas em 2015, segundo a FAO (2015), representando aumento de 55,2% em comparação a 1990.

Há, portanto, uma tendência global para incentivar o estabelecimento de plantações (WEST, 2014) e é provável que esses plantios produzam uma grande quantidade da madeira utilizada em todo o mundo. Assim, segundo o mesmo autor, as plantações comerciais estão sendo cultivadas para fornecerem vários benefícios ambientais e podem ou não produzir madeira para consumo ao mesmo tempo.

No Brasil, segundo Virgens, Freitas e Leite (2016), as florestas com fins comerciais têm revelado notável destaque no desenvolvimento de produtos, tributos, empregos e renda. Desse modo, pode-se dizer que a categoria é essencial ao provimento de matéria-prima para a evolução da indústria de base florestal. Essa afirmação é corroborada por Moreira e Oliveira (2017), os quais ressaltam que a atividade demonstra alto potencial de expansão, gerando empregos e renda, principalmente no decorrer da sua cadeia produtiva de processamento da madeira, fomentando a obtenção líquida de divisas para o país.

Comumente, as plantações florestais comerciais são estabelecidas em áreas sem nenhuma cobertura vegetal original. Desse modo, tem-se uma contribuição relativa à diminuição do escoamento hídrico superficial e, conseqüentemente, redução da erosão (MAEDA; MEDRADO, 2017). Porém, ao suprimir uma floresta nativa para inserir uma floresta

comercial de eucalipto, ocorre maior escoamento hídrico na superfície e erosão do solo em comparação ao ecossistema natural (DAVIDSON, 1985).

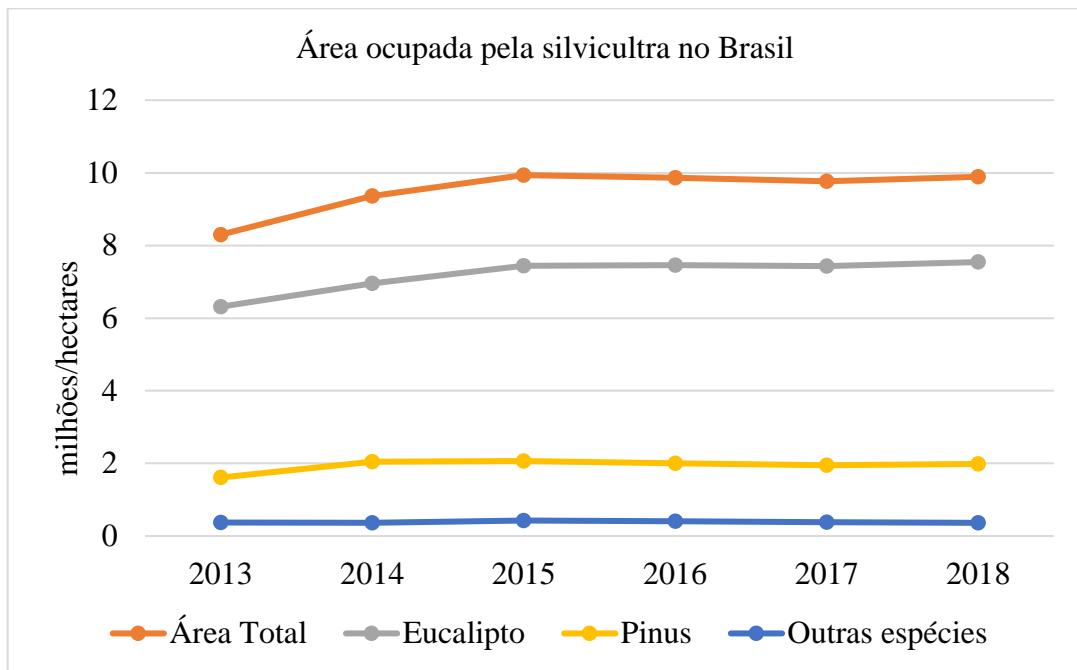
O entendimento da influência das florestas sobre a água do solo é imprescindível para compreender-se o papel da floresta no ciclo hidrológico. Assim, torna-se possível elaborar normas práticas de manejo florestal que visam à manutenção do funcionamento hidrológico em pequenas bacias hidrográficas (LIMA, 2008). Ao adotar práticas de manejo florestal sustentável, é possível utilizar os recursos naturais de forma que não ocorra o desequilíbrio dinâmico do ecossistema (CÂMARA, 2004).

Dessa forma, estudos em pequenas bacias hidrográficas como unidades experimentais e caracterizadas pela ocupação de plantios florestais possuem o objetivo de investigar os efeitos sobre os recursos hídricos são fundamentais para o manejo florestal sustentável. Alguns estudos foram desenvolvidos por Câmara (2004), Baumhardt (2014), Rodrigues et al. (2014), Reichert et al. (2017), Rodrigues et al. (2018), Ebling et al. (2020), Ferreto et al. (2020), Valente et al. (2020), Ferreto et al. (2021) e Bastos et al. (2021), proporcionando informações da influência das atividades florestais no ecossistema das bacias hidrográficas.

2.1.1 Indicadores produtivos no Brasil

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020), em 2018 a área cultivada no Brasil por espécies florestais comerciais foi 9.895.560 ha, sendo que 7.543.542 ha eram do gênero *Eucalyptus*, 1.984.333 ha do gênero *Pinus* e 367.685 ha de outras espécies. A região Sudeste obteve maior destaque no quesito área total cultivada, com 3.190.933 ha, enquanto a região Sul apresentou 1.609.905 ha. Na Figura 1, demonstra-se a evolução da área de plantios florestais comerciais no Brasil no período de 2013 a 2018, com destaque para a eucaliptocultura que obteve um acréscimo de aproximadamente 19%.

Figura 1 – Evolução dos plantios florestais comerciais no Brasil entre 2013 e 2018.



Fonte: Dados do IBGE (2020); gráfico do autor.

A Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2019) afirma que o Brasil apresentou uma produtividade média $36,0 \text{ m}^3/\text{ha.ano}$ para os cultivos de eucalipto. Além disso, mesmo com o impacto da mudança climática no desenvolvimento das plantações, principalmente o desequilíbrio do regime de chuvas em diversas partes do território brasileiro, a produtividade de eucalipto obteve um ganho de 0,5%.

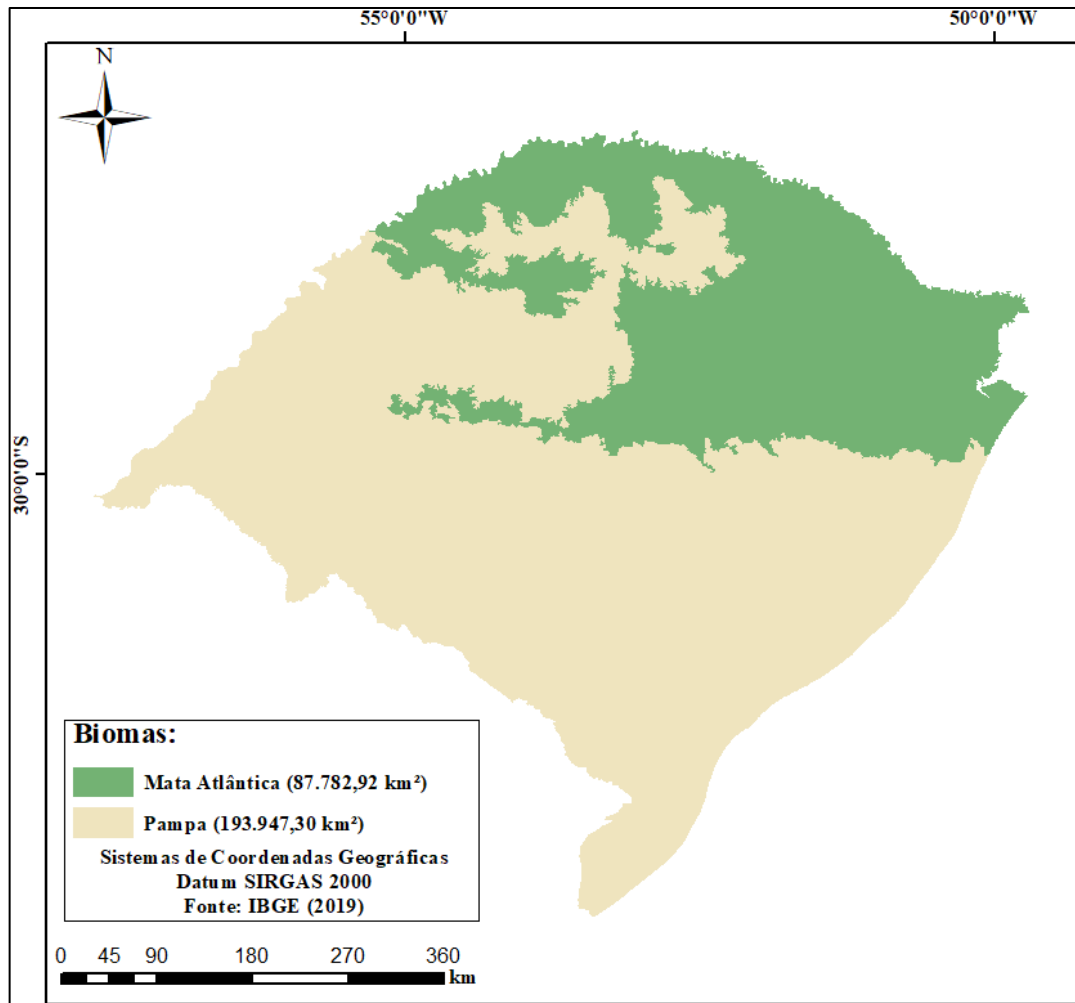
2.2 BIOMA PAMPA

Os campos sulinos são compostos por diferentes conjuntos de ecossistemas, com flora e fauna própria, exibindo um enorme patrimônio cultural, pois associa-se com a sua grande biodiversidade (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2020). Para Boldrini (2010), a diversidade biológica dos campos do estado do Rio Grande do Sul se relaciona, especialmente, à diversidade de solos originários da grande variabilidade geológica, topográfica, pluvial, térmica e de disponibilidade hídrica.

O Bioma Pampa no Rio Grande do Sul, abrange aproximadamente $193.947,30 \text{ km}^2$ (IBGE, 2019), representando 68,83% da área do estado e 2,3% do território nacional (Figura

2). Esse bioma estende-se da metade sul do estado do RS, para o Uruguai e diversas províncias do norte e nordeste da Argentina (SULZBACHER et al., 2018).

Figura 2 – Biomas do estado do Rio Grande do Sul.



Fonte: Adaptação de IBGE (2019).

Os usos tradicionais de terra do Bioma Pampa são para extensas pastagens e agricultura. Porém, houve redução de 26% na área de pastagens naturais entre 1975 a 2005, quando quase três milhões de hectares das áreas de pastagens foram convertidas em outras atividades agrícolas (OLIVEIRA et al., 2017). Os mesmos autores, ainda citam que os campos sulinos sempre apresentaram significância para a produção pecuária; entretanto, ao final do século XIX, essa atividade perdeu importância em comparação à produção de espécies agrícolas de ciclo curto e à silvicultura, devido aos retornos financeiros mais altos e mais rápidos.

A alteração das áreas de pastios naturais em demais usos contribui significativamente para o declínio da fauna dos Campos Sulinos, em termos de dimensão espacial, relevância e irreversibilidade dos impactos (PILLAR, 2009). Ainda, segundo esse autor, a substituição dos campos interfere, direta ou indiretamente, nos ambientes de alto valor biológico, que, por sua vez, associam-se às paisagens campestres, como as áreas úmidas localizadas ao longo das drenagens.

Nesse bioma é observada a predominância de ecossistemas de pastagens, onde as gramíneas formam a vegetação predominante e, próxima aos cursos d'água, a vegetação é mais densa, com a presença de vegetação lenhosa (VASCONCELOS et al., 2018). A produção de gado de corte nessa região é realizada em pastagens naturais, mas essas pastagens não são homogêneas em termos de composição florística, sendo dependentes principalmente das condições do solo e das práticas de manejo (FERREIRA et al., 2011).

O estudo de Pillar (2009) classificou os campos existentes do Bioma Pampa em sete diferentes formações dentro do território do Rio Grande do Sul: campos de barba-de-bode, campos de solos rasos, campos de solos profundos, campos de areais, vegetação savanóide, campos do centro do estado e campos litorâneos. Ademais, o autor afirma que a estrutura da vegetação é amplamente diversa, devido a vários fatores, tais como clima, solo e manejo em que a vegetação está submetida.

2.3 EUCALIPTO

O eucalipto (palavra de origem grega, *eu* + *καλύπτω* que significa “verdadeira cobertura”) é a denominação comum das diversas espécies do gênero *Eucalyptus*, em relação à família das Mirtáceas, que abrange outros 130 gêneros (VITAL, 2007). Segundo Mora e Garcia (2000), a maioria das árvores são típicas de florestas altas, atingindo alturas entre 30 e 50 metros. Essa espécie ocorre de forma natural na Austrália, possuindo cerca de 600 espécies adaptadas a diversas condições de clima e solo. Ademais, duas espécies não são originárias da Austrália, o *E. urophylla* e o *E. deglupta* (MORA; GARCIA, 2000). As sementes do eucalipto começaram a ser disseminadas em nível global no início do século XIX; na América do Sul, o primeiro país a introduzir essa espécie foi o Chile, especificamente em 1823, e, posteriormente, a Argentina e o Uruguai introduziram-no em seu território (MORA; GARCIA, 2000).

Muito questiona-se sobre a introdução do eucalipto no Brasil. Na segunda edição do livro “O Eucalipto” escrito por Edmundo Navarro de Andrade e ampliado por Armando Navarro de Andrade publicado em 1961, cita:

É difícil determinar, com segurança, a data de introdução do eucalipto no Brasil. Até há bem pouco tempo, tinha-se como certo que os primeiros haviam sido plantados no Rio Grande do Sul, em 1.868, pelo Sr. Frederico de Albuquerque e que, no mesmo ano, o então 1º. tenente da Marinha, Pereira da Cunha, mais tarde almirante, plantara vários exemplares na Quinta da Boa Vista, no Rio de Janeiro, onde hoje se acha o Museu Nacional.

Na sessão de 22 de janeiro de 1.869, da Societé Impériale Zoologique d'Acclimatation, de Paris, foi lida uma carta do Sr. Frederico de Albuquerque, pedindo sementes de eucalipto. Numa outra sessão a 24 de setembro do mesmo ano, declarava este brasileiro que tentara a introdução do eucalipto no Brasil e que havia feito as primeiras sementeiras em março de 1.868 e a primeira plantação em 1º. de dezembro desse mesmo ano, referindo-se a um artigo que a tal respeito publicara no jornal "Artista", do Rio Grande. Em outra carta, lida na sessão de 13 de maio de 1.870, dizia o Sr. Albuquerque que, de todos os vegetais que introduzira em seu país, depois da videira, o mais útil, sem dúvida, era o eucalipto. Mencionava, então, como plantadas, as seguintes espécies: *globulus*, *amygdalina* e *polyanthemos*. (ANDRADE; SAMPAIO, 1961, p. 55).

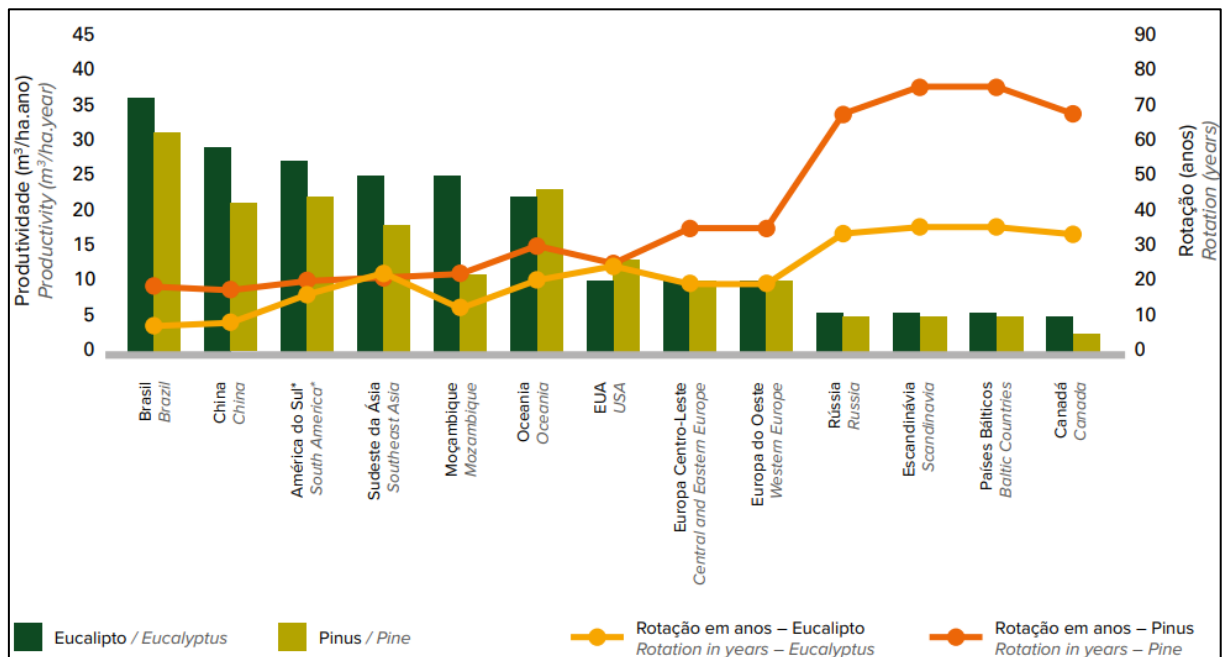
Mora e Garcia (2000) citam Navarro de Andrade como o "Pai da Eucaliptocultura" no Brasil, desenvolvendo trabalhos experimentais de 1904 a 1909, no Horto de Jundiaí (SP), comparando espécies nativas com o eucalipto. Nesses testes, o eucalipto se sobressaiu em relação às outras; assim, ao adquirir novas terras em 1909, a Companhia Paulista de Estradas de Ferro iniciou o plantio de eucalipto em escala comercial.

2.3.1 Características e manejo do eucalipto

A crescente demanda por madeira para diferentes usos, entre eles serraria, laminação, carvão e celulose, contribui significativamente para o desenvolvimento do setor florestal e das propriedades rurais, pois o cultivo de florestas de eucalipto possibilita a todos os tipos de agricultores diversificar a renda na propriedade, por meio dos diferentes tipos de plantios, tais como plantios puros e sistemas integrados de produção, conhecidos como sistemas silvipastoris (SANTAROSA et al., 2014). Para Baumhardt (2014), a escolha correta da espécie para uma região relaciona-se com as condições de clima e solo mais próximas possíveis do local de origem da espécie.

O Brasil tornou-se referência mundial em tecnologia florestal, apresentando a maior produtividade mundial, considerando o volume de madeira produzido por área anualmente. Além disso, é importante salientar que o eucalipto possui uma das rotações mais curtas em relação à produção de outras espécies para madeira, considerando-se o tempo entre plantio e a colheita (Figura 3) (IBÁ, 2019). Segundo o IBGE (2020), no ano de 2018, foram produzidos mais de 77 milhões de metros cúbicos de madeira em toras de eucalipto para produção de papel e celulose.

Figura 3 – Produtividade e rotação média no Brasil e outros países.



*Exceto o Brasil

Fonte: IBÁ (2019).

O cultivo dessa espécie florestal evoluiu consideravelmente nas últimas décadas. Segundo Baumhardt (2014), os cultivos antigos, vestígios de plantações subsidiadas por incentivos fiscais, eram conduzidos com pouco planejamento e com técnicas de preparo do solo já obsoletas, o que, por sua vez, facilitou as formações erosivas presentes nos dias atuais no Rio Grande do Sul, onde o eucalipto era cultivado sob outro formato da legislação ambiental.

Para obter melhor retorno em plantios de eucalipto, se faz necessário o emprego de materiais com boa qualidade genética e boas práticas de manejo, como controle de pragas, adubação, desbaste e entre outras (SANTAROSA, 2014). Santarosa (2014) cita que esses são fatores essenciais para o desenvolvimento adequado e um incremento anual de madeira esperado para o destino final de processamento da madeira.

2.4 BACIAS HIDROGRÁFICAS

A Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, define que a bacia hidrográfica constitui a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e a atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997). Tucci e Mendes

(2006) afirmam que, para cada seção de um curso de água, haverá uma bacia hidrográfica, onde a bacia é todo o território que contribui com os rios por meio da gravidade até chegar ao exutório. Segundo os mesmos autores, essa área define-se pela topografia da superfície; porém, a geologia do subsolo influencia, em parte, a percolação de água no solo, escoando para fora da bacia delimitada topograficamente.

Nesse mesmo sentido, Cruz e Tavares (2009) afirmam que cada bacia hidrográfica terá seus balanços específicos entre disponibilidades e demandas hídricas. Aliado a isso, a disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica, ou seja, a geração de vazões depende da combinação de diversos condicionantes (ambientais e antrópicos), que interferem na eficiência da geração de escoamento (MIGUEZ; VERÓL; GREGORIO, 2017).

Os processos do ciclo hidrológico, tais como a infiltração, deflúvio, evapotranspiração e escoamento superficial e subsuperficial são significativamente influenciados pelas características físicas e bióticas da bacia (TEODORO et al., 2007). Assim, Zuffo e Zuffo (2016) ressaltam que todas as atividades que envolvam água são interdependentes entre si. Ademais, as atividades antrópicas relacionadas ao uso e ocupação do solo, como a urbanização e a agricultura, resultam em impactos que interferem no ciclo hidrológico. Esses processos, interferem, dentre muitos fatores, na disponibilidade hídrica das bacias. O balanço hídrico é essencial para se ter conhecimento sobre a bacia hidrográfica e sua disponibilidade de água. O balanço hídrico determina todos os ganhos e perdas hídricas de um local, sendo possível estimar a quantidade de água disponível (BURIOL, 2009).

Atualmente, há diversas fontes provenientes de atividades antrópicas realizadas na superfície terrestre que expõe de forma direta os recursos hídricos à contaminação. A degradação dos rios, tanto em relação à forma de contaminação quanto assoreamento, decorre do escoamento superficial de sedimentos e poluentes oriundos de atividades agropecuárias, com acréscimo de matéria prima de algas e plantas em função do carreamento de nitrogênio e fósforo provenientes das lavouras e da pecuária em regime confinado (MERTEN; MINELLA, 2002). Assim, a escassez hídrica, ou a disponibilidade, não se restringe apenas a aspectos quantitativos, mas o crescimento exagerado das demandas também afeta os aspectos qualitativos dos recursos hídricos (ZUFFO; ZUFFO, 2016). Para Omer et al. (2020), identificar e compreender a relação entre a escassez dos recursos hídricos e os múltiplos fatores de influência constituem passos importantes para a formulação de políticas informadas em escala global, regional, nacional e local.

As bacias hidrográficas florestadas eram mistificadas, pois acreditava-se que a produção de água era maior do que bacias com outro uso. Entretanto, em bacias hidrográficas com

plantios de espécies florestais há menor descarga fluvial, mas o fluxo mantém-se mais estável e sustentável do que em outras situações (BALBINOT et al., 2008). Para Trimble, Weirich e Hoag (1987), o decréscimo do deflúvio em bacias hidrográficas florestais ocorre devido ao acréscimo das perdas de água por meio evapotranspiração, ou seja, interceptação e transpiração; essa redução ocorre mais em anos secos do que chuvosos.

Novaes, Barros e Costa (1996) apresentaram um quadro comparativo entre espécies agrícolas e o eucalipto (Quadro 1). Assim, os autores salientam que é indiscutível a eficiência hídrica do eucalipto em relação a outras culturas, especialmente as agrícolas. Isso, por sua vez, desmistifica a produção de água em bacias florestadas em comparação a outros usos.

Quadro 1 – Eficiência do uso da água em diferentes culturas vegetais.

Cultura/Cobertura	Eficiência no uso da água (produção por kg de água utilizada)
Batata	0,40 - 0,65 g de bulbos
Milho	0,47 - 1,08 g de grãos
Cana-de-açúcar	1,8 g de açúcar
Feijão	0,5 g de grãos
Trigo	0,9 g de grãos
Cerrado	0,4 g de madeira
Eucalipto	2,9 g de madeira

Fonte: Adaptação de Novaes, Barros e Costa (1996).

2.5 RECARGA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

A água subterrânea é um importante recurso natural para a economia de áreas urbanas e rurais e para o abastecimento seguro de água potável e desempenha um papel fundamental (embora muitas vezes seja subestimada) no bem-estar dos seres vivos e de muitos ecossistemas aquáticos (FOSTER et al., 2002). As pesquisas envolvendo recarga subterrânea são essenciais para estimar a quantidade anual da água subterrânea renovável e têm impacto direto no planejamento e gestão integrada de recursos hídricos (BAUMHARDT, 2014). Para Yenehun et al. (2020), a recarga da água subterrânea é uma das variáveis-chave na gestão do aquífero e uma das mais difíceis de avaliar com precisão aceitável.

O processo de reposição da água subterrânea pode ser afetado por modificações nos cenários de uso e cobertura da terra, pois as mudanças podem alterar os processos hidrológicos no segmento terrestre (ADHIKARI; MOHANASUNDARAM; SHRESTHA, 2020). Além disso, Baumhardt (2014) afirma que a recarga é uma função que atua sobre uma série de

parâmetros que constituem o ciclo hidrológico, como precipitação, infiltração, evapotranspiração, vazão e características morfológicas da bacia hidrográfica.

Um estudo de recarga deve iniciar-se na coleta de dados (climático, hidrológicos, geomorfológicos e geológicos) da área de interesse, e esses dados são utilizados para desenvolver o modelo conceitual de recarga no sistema (MAZIERO, 2005). Posteriormente, os dados devem ser aplicados a um dos diversos métodos para a estimativa da recarga. Healy e Cook (2002) salientam que o conhecimento preciso dos parâmetros de recarga é extremamente importante para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos. Os autores revisaram diversos métodos que podem ser aplicados para estimar a recarga subterrânea, destacando o *Water Table Fluctuation* (WTF) ou, em português, Flutuação da Superfície Piezométrica ou o qual é facilmente compreendido e retorna resultados satisfatórios.

O método WTF tem sido amplamente utilizado para estimar a recarga das águas subterrâneas (HEALY; COOK, 2002; MOON; WOO; LEE, 2004; MAZIERO, 2005; BAUMHARDT, 2014; FAN et al., 2014; YENEHUN et al., 2020). Porém, esse método aplica-se somente aos aquíferos e requer o conhecimento de variáveis como o rendimento específico e das variações do nível da água em função do tempo (BAUMHARDT, 2014). O WTF baseia-se na premissa em que os níveis de água subterrânea em aquíferos não confinados são recarregados pela água que chega ao lençol freático (HEALY; COOK, 2002). Os autores apresentaram o cálculo de recarga por meio da Equação 1.

$$R = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde: R é a recarga; S_y é o rendimento específico; Δt é o tempo em que se deseja obter a variável recarga; e Δh é a diferença de altura do nível freático desde a extrapolação da curva de recessão.

2.6 BALANÇO HÍDRICO

O balanço hídrico é descrito por Tomasella e Rossato (2005) como a soma da quantidade de água que entra e sai de uma parte específica do solo em um determinado tempo. Os autores, ainda definem que o resultado é a quantidade líquida de água que as plantas podem utilizar para o seu desenvolvimento. O balanço hídrico é uma das ferramentas mais comumente empregadas para avaliar indiretamente se a quantidade de água disponível no solo pode atender à demanda

de água das plantas, e estimar o déficit e excedente hídrico, da reposição e da retirada da água do solo (CARVALHO et al., 2011). Jesus (2015) e Passos, Zambrzycki e Pereira (2016) tratam o balanço hídrico como uma das várias formas de monitoramento do armazenamento de água no solo, possibilitando a determinação de épocas de deficiência e excedente hídrico, a reposição e a retirada da água do solo. Dessa forma, é possível relacionar as entradas e saídas de água com o cultivo realizado na área delimitada. Entre todos os elementos variáveis do ciclo hidrológico sendo pluviosidade, infiltração, evapotranspiração real, recarga e escoamento de base segundo Silva e Loureiro (2006), a taxa diária de evapotranspiração apresenta as maiores dificuldades conceituais e técnicas para ser mensurada diretamente.

2.7 INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA

A eletrorresistividade constitui um método geofísico pertencente aos “geoelétricos”. É um método amplamente usado em estudos de geofísica rasa, geotecnia, prospecção de águas subterrâneas e meio ambiente. Seu princípio baseia-se na determinação elétrica dos materiais (solo e rocha) em subsuperfície. Esses materiais possuem propriedades eletromagnéticas ao serem submetidos a correntes elétricas geradas artificialmente (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002). A heterogeneidade dos diversos tipos de solo e rochas no meio geológico atua como “interfaces de contraste” que são detectadas nos valores de resistividade elétrica. Essa propriedade física, devidamente detectada, medida e inserida em modelos ou seções de resistividade serve para caracterizar o grau de alteração, fraturamentos, depósitos minerais e conduzir investigações em diferentes profundidades de forma indireta ou não invasiva.

Esse método pode ser definido pela lei de Ohm (Equação 2).

$$R = \rho \frac{L}{S} \text{ (ohm.s}^{-1}\text{)} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde: L é o comprimento; e S é a seção transversal do condutor.

Temos que R é um coeficiente dependente da natureza e estado físico denominado de eletrorresistividade. Isolando ρ pode-se definir a resistividade elétrica como sendo (Equação 3):

$$\rho = R \frac{L}{S} \text{ (ohm.m}^{-1}\text{)} \quad \text{Equação (3)}$$

Logo, a dimensão da resistividade é um produto de uma resistência elétrica ao longo de um corpo. A resistividade pode ser compreendida como a dificuldade de propagação de uma corrente elétrica em um determinado material, o que tem relação com as leis elétricas que estão associadas aos mecanismos que a corrente elétrica se propaga. Em algum caso de corpos tridimensionais, como a Terra, a corrente elétrica não flui por uma reta, um único caminho, mas se propaga em todas as direções. Aplicando-se a Equação 2 em semi-espaço e a isolando, obtém-se a Equação 4 (SHARMA, 1997):

$$\rho = \pi r \frac{V}{I} \quad (\text{ohm.m}^{-1}) \quad \text{Equação (4)}$$

Onde: V é o potencial; I é a corrente; r é a distância entre o eletrodo de corrente e o ponto que foi medido o potencial; e ρ é a resistividade.

Os métodos geofísicos são amplamente utilizados em estudos ambientais nacionais e internacionais (YIHDEGO; NZIKOU, 2017; GIANG et al., 2018; HUDSON et al., 2018; OSINOWO; FALUFOSI; OMIYALE, 2018; HASAN et al., 2020; OHWOGHERE-ASUMA et al., 2020; ZAGO; FRIES; RAMIRES, 2020). De modo geral, as pesquisas visam identificar possíveis alterações no meio subterrâneo, além do fluxo da água subterrânea e o nível do lençol freático.

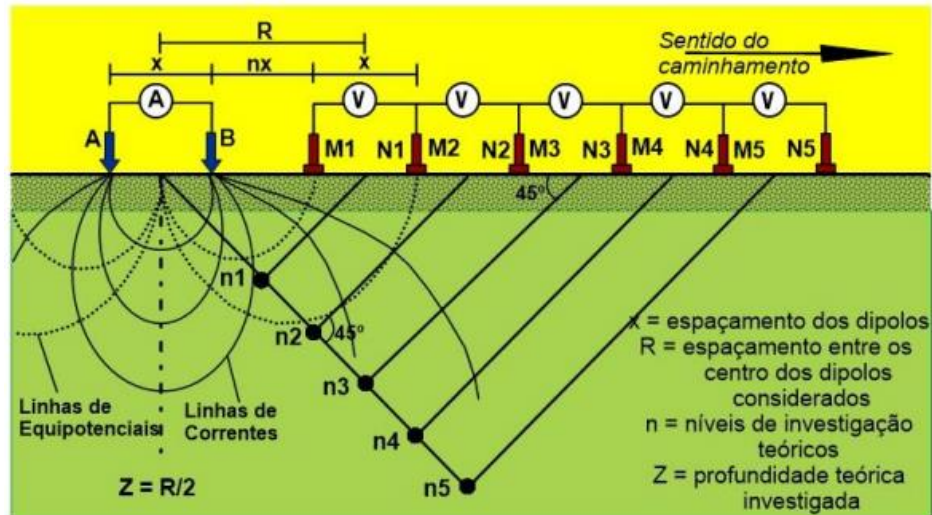
2.7.1 Tomografia por Resistividade Elétrica e arranjos de campo

A técnica da Tomografia por Resistividade Elétrica (TRE) consiste basicamente na obtenção de medidas de resistividade elétrica aparente, ao longo de uma seção/linha, obtendo informações que podem auxiliar a investigação em níveis de profundidade e em continuidade lateral. O desenvolvimento desse arranjo caracteriza-se por um espaçamento igual entre os eletrodos de detecção MN e de injeção AB, com um deslocamento da corrente elétrica e detecção da resistividade aparente, a partir do centro de ambos os dipolos (Figura 4). A profundidade de investigação aumenta na medida em que o espaçamento entre os eletrodos aumenta teoricamente igual a R/2 (SHARMA, 1997).

Braga (1999) apresenta vários tipos de arranjo que podem ser utilizados com essa técnica, desde Polo-Dipolo, Gradiente, Schlumberger, Wenner, Dipolo-Dipolo. Para este trabalho, é proposto a utilização de um arranjo Dipolo-Dipolo, sendo, portanto, descrito apenas

este de forma detalhada. Outras técnicas e arranjos são detalhados em Telford, Geldart e Sheriff (1990), Braga (1999), Sharma (1997) e Kearey, Brooks e Hill (2002).

Figura 4 – Esquema de Caminhamento Elétrico utilizando o Arranjo Dipolo-Dipolo.



Fonte: Adaptação de Braga (1999).

Assim, a corrente elétrica é inserida sobre o solo por meio dos eletrodos, em que essa corrente infiltra no terreno mediante a dois eletrodos; dessa forma, a queda de potencial entre um segundo par de eletrodos é medido (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990). Conseqüentemente, a resistividade elétrica dos materiais é obtida, em que cada material possui valores diferentes. Na Tabela 1, apresenta-se variação dos valores de resistividade para diferentes materiais.

Tabela 1 – Valores de resistividade de alguns materiais e rochas.

Minerais	Resistividade (ohm/m)
Bauxita	200 - 6000
Grafita	$10^{-4} - 5 \times 10^{-3}$
Granito porfirítico (saturado)	$4,5 \times 10^{-3}$
Diabásio	$20 - 5 \times 10^7$
Xisto	$20 - 10^4$
Gnaisse (seco)	3×10^6
Quartzito	$10 - 2 \times 10^8$
Argilas consolidadas	$20 - 2 \times 10^3$
Argilas inconsolidadas úmidas	20
Conglomerados	$2 \times 10^3 - 10^4$
Arenitos	$1 - 6,4 \times 10^8$
Calcários	$50 - 10^7$
Pirita	0,001
Magnetita	6 - 10
Quartzo	$3,8 \times 10^{10} - 1,2 \times 10^{12}$
Argilas*	1 - 1000

*Destaca-se que nas argilas a faixa de variação da resistividade é ampla (1 - 1000 ohm/m).

Fonte: Telford, Geldart e Sheriff, 1990 e Lasfargues, 1957.

2.8 INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

A capacidade do solo em absorver a água é uma das suas principais características, sendo objeto de estudo de diversas pesquisas (MORETTI FILHO; MANFRINATO, 1965). O processo de infiltração constitui o fenômeno na qual a água oriunda da precipitação (natural ou proveniente da irrigação) penetra no solo e se distribui (CABRAL et al., 2016). Assim, conforme descreve Heath (1987), ocorre o movimento da água pela zona aerada ou zona vadosa (presença de ar e água) até a zona saturada (todos os poros estão preenchidos com água). Além desse fenômeno, a água pode se mover na interface da zona saturada e insaturada, pelo efeito de capilaridade (CLEARY, 2007).

O processo de infiltração depende da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar presentes no seu interior (SILVEIRA, LOUZADA; BELTRAME, 2012). Assim, após a entrada de água no solo, o processo de infiltração ocorrerá até atingir a sua capacidade de infiltração, ou seja, todos os poros estejam preenchidos com água (MOLINARI; VIEIRA, 2004). Com base no exposto, solos arenosos tendem a apresentar maiores taxas de infiltração que solos argilosos (ROEHRHS, 2017). Aliado a isso, Seratto et al. (2019) afirmam que, dentre os fatores que influenciam no processo de infiltração de água no solo, se destacam a umidade inicial do solo, a condutividade hidráulica,

as condições da superfície e a presença de camadas impeditivas ao fluxo de água no interior do perfil. Além disso, a topografia do terreno influenciará a velocidade do escoamento e interferirá, de forma direta, na taxa de infiltração de água no solo.

Existem diversos métodos e equipamentos para estimativa da capacidade de infiltração do solo. Dentre esses, destaca-se o infiltrômetro de Cornell, que é amplamente utilizado em estudos de infiltração e escoamento superficial (ES) de água no solo (KEMERICH et al., 2014; ALIZADEHTAZI et al., 2016; SANTI et al., 2016; GHOSH; PEKKAT, 2019; SANTOS et al., 2019; ROY et al., 2020). O infiltrômetro de Cornell é um simulador de chuva, simulando uma chuva de alta intensidade e o escoamento superficial de água no solo é determinado com base na coleta do excesso de água na parte exterior do anel (ZWIERTES et al., 2013). Assim, esse infiltrômetro possui um sistema que regula a entrada de ar, permitindo a simulação de diferentes intensidades de chuva (SANTI, 2007).

3 MATERIAL E MÉTODOS

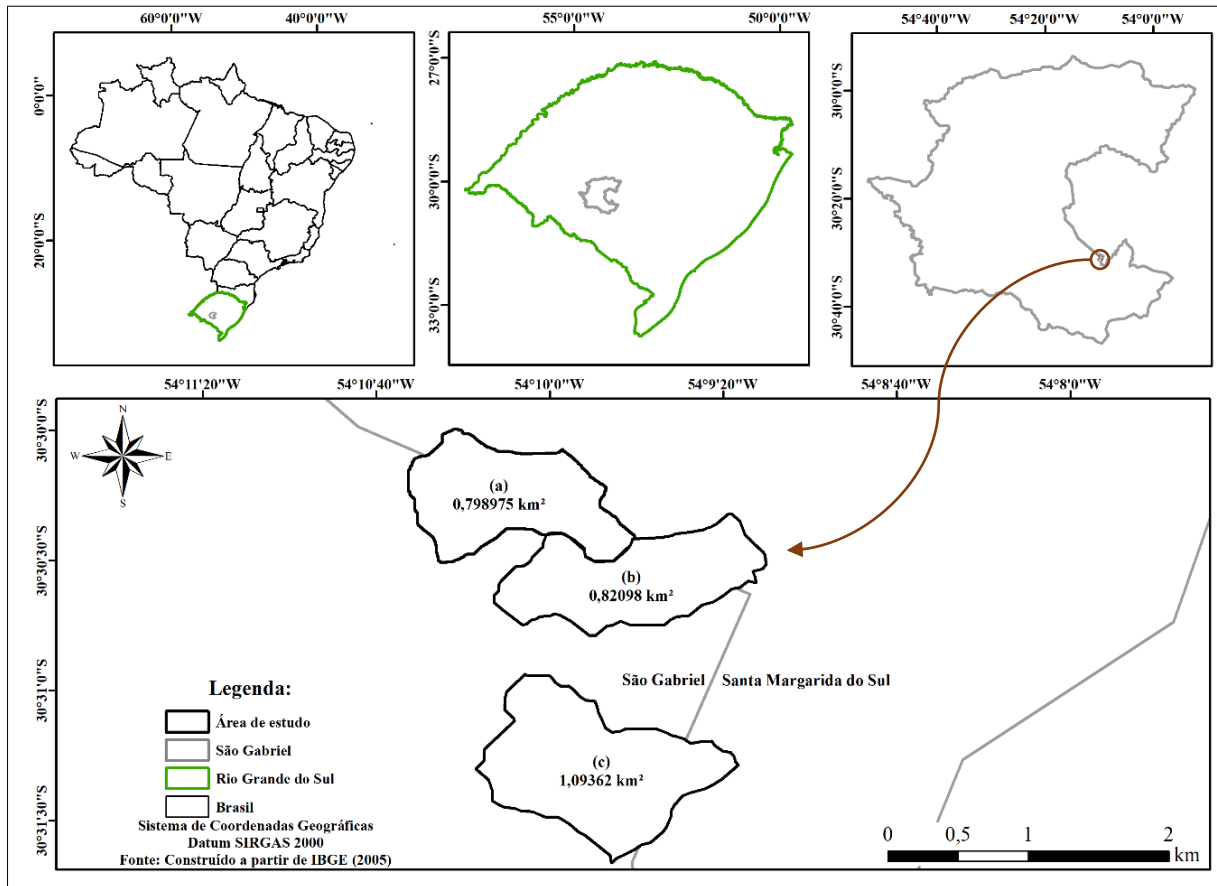
3.1 CARACTERÍSTICAS DO LOCAL DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no município de São Gabriel, na região da Campanha Central do Estado do Rio Grande do Sul, na latitude 30°19'51" S e longitude 54°19'32" W. Situado a uma altitude média de 114 metros em relação ao nível do mar, abrange uma área de 5.019,646 km² e possui 60.425 habitantes (IBGE, 2010). O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cfa, caracterizado como subtropical, com verão quente; a temperatura média anual é de 18,6 °C e a precipitação média anual é de 1.356 mm (MORENO, 1961; ALVARES et al., 2013).

As duas bacias hidrográficas (BH) estudadas com cultivo de eucalipto pertencem à empresa Celulose Riograndense (CMPC), para produção de celulose. A terceira BH é de propriedade particular, com predomínio de campo natural antropizado degradado e pastagem manejada para a pecuária extensiva (FERRETO, 2019). Assim, as pequenas bacias hidrográficas estão situadas entre as Coordenadas Geográficas 30°30'0" S e 54°11'20" W, 30°31'30" S e 54°80'0" W. Além disso, o local de estudo encontra-se próximo à rodovia BR-473, distante aproximadamente 25 quilômetros do centro do município de São Gabriel (Figura 5).

Uma BH é cultivada desde 2006 com *Eucalyptus saligna* (BEs), e posteriormente submetida ao corte parcial de 30% em fevereiro de 2014. A outra BH teve cultivo da mesma espécie até a mesma época de corte da BEs, com corte de 100% da área de plantio, após foi conduzido o plantio de *Eucalyptus benthamii* (BEb) em maio de 2014 (FERRETO, 2019).

Figura 5 – Localização da área de estudo. (a) predomínio de *Eucalyptus benthamii* (BEb); (b) predomínio de *Eucalyptus saligna* adulto (BEs); (c) campo natural antropizado degradado e pastagem manejada (BC).

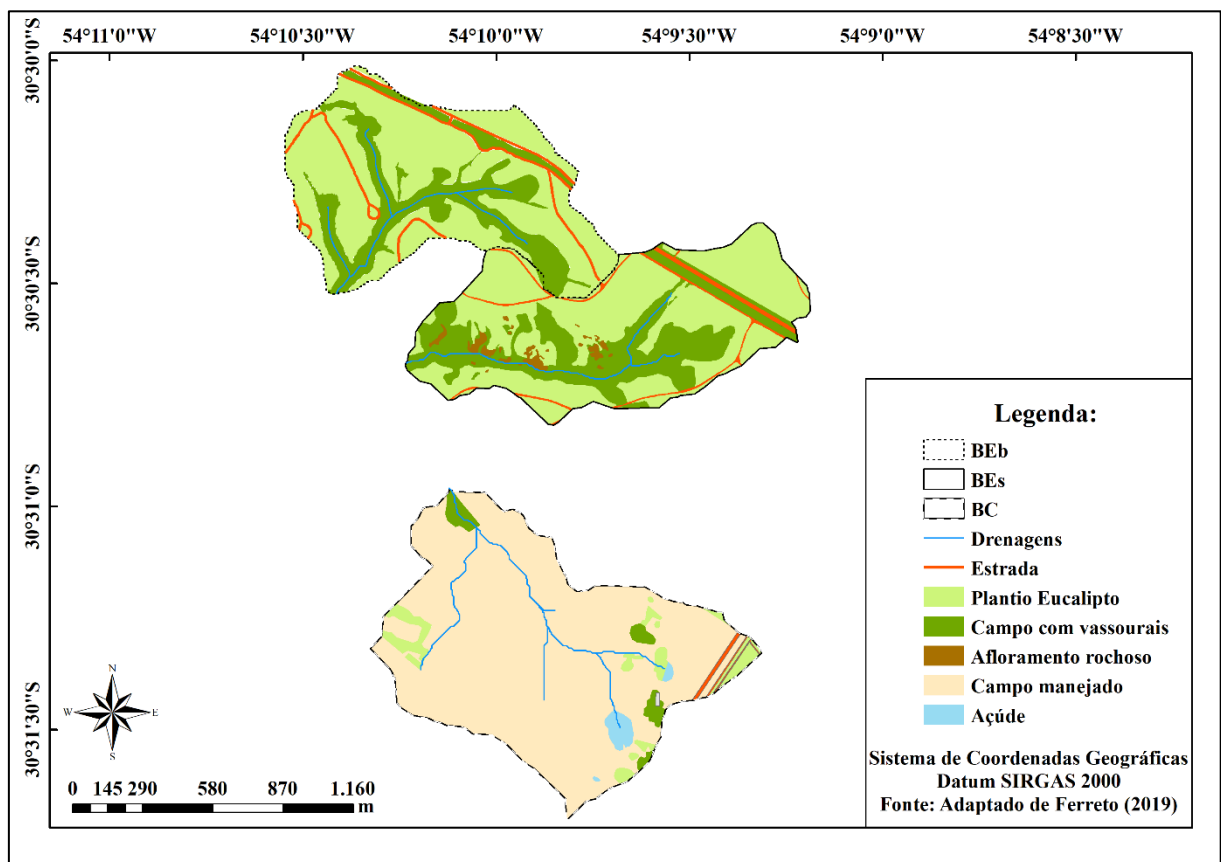


Fonte: Autoria própria.

3.1.1 Usos do solo

Nas BEs têm-se povoamentos clonais de *E. saligna* na ordem de 61,0%, campos com vassourais (30,0%), estradas e aceiros (6,0%) e afloramentos rochosos (3,0%). Na BEb havia predomínio de *E. saligna* (65,0%) até fevereiro de 2014, com o corte total da área de plantio, após foi conduzido o plantio de *E. benthamii*, campo com vassourais (32,0%), estradas e aceiros (2,5%) (FERRETO, 2019) (Figura 6). A BC, na Figura 6, tem o predomínio por campo natural antropizado degradado (71,0%), área com pastagem manejada e cultivada com aveia (24,0%) apenas no inverno, campos com vassourais (2,6%), açude (1,4%) e estradas (1,0%) (FERRETO, 2019). Parte dessa descrição também foi feita por Valente (2018).

Figura 6 – Usos do solo da área de estudo.

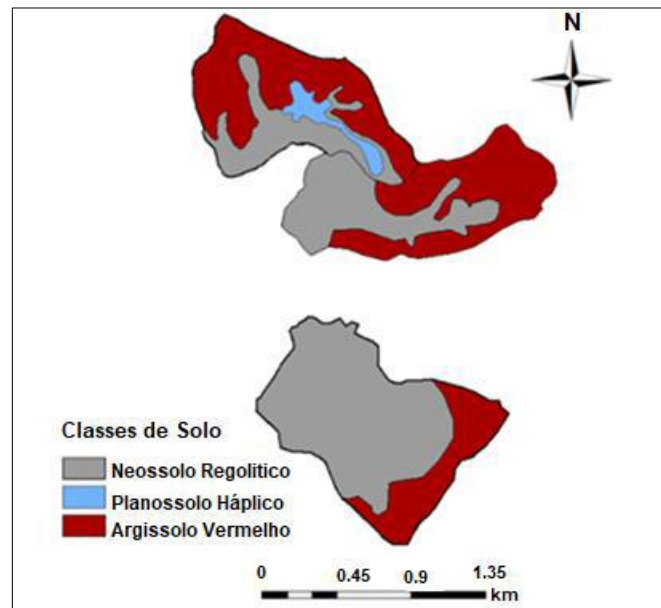


Fonte: Adaptação de Ferreto (2019).

3.1.2 Solos

O material de origem dos solos das BHs é composto de Ortognaisses e Metadioritos, da unidade estratigráfica Complexo Cambaí, e Arenitos e Siltitos, da Unidade estratigráfica Formação Rio Bonito (FERRETO, 2019). O autor supracitado elaborou os mapas de classificação dos solos por meio do levantamento de amostras de solo georreferenciadas e coletou amostras em diferentes posições na paisagem; assim, seguiu um agrupamento das amostras pelas suas características físicas e morfológicas. O mesmo autor encontrou três ordens de solos nas três bacias hidrográficas, sendo elas, Argissolos Vermelhos, com profundidades rasas e predominante nos interflúvios suaves e na parte mais alta da paisagem. Em encostas declivosas, encontraram-se os Neossolos Regolíticos e, nas áreas baixas, os Planossolos Háplicos, consoante Figura 7.

Figura 7 – Classes de solos encontradas na área de estudo.



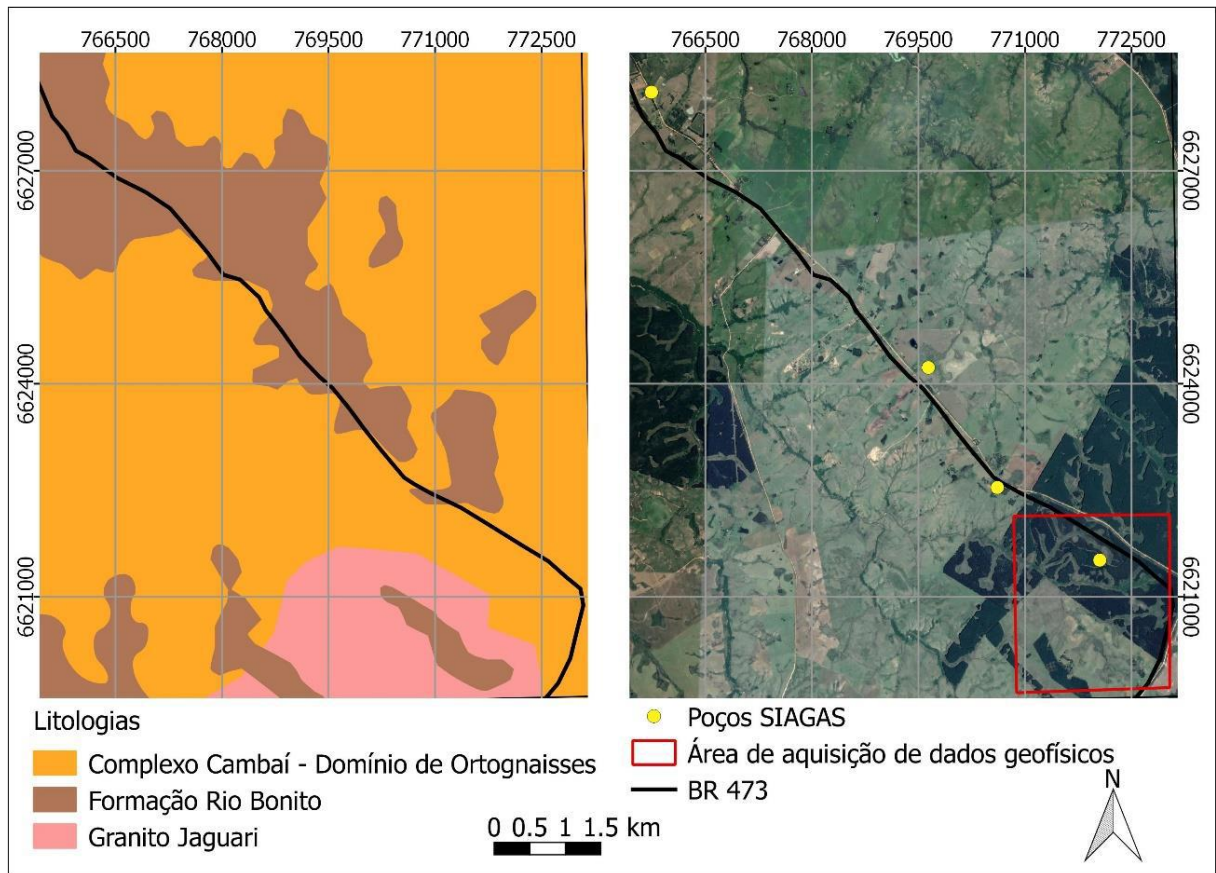
Fonte: Ferreto (2019).

3.1.3 Caracterização geológica

De acordo com o Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2006), na área de estudo têm-se o predomínio da Formação Rio Bonito, Complexo Cambaí (domínio de Ortognaisses) e o Granito Jaguari (Figura 8). A Formação Rio Bonito é composta basicamente por arcóseo, siltito, siltito carbonoso e quartzoarenito, folhelho carbonoso e carvão. O Granito Jaguari, por sienomonzonitos a monzogranito, e o Complexo Cambaí sob o domínio de Ortognaisses, têm o predomínio de gnaisses monzogranítico, granodiorítico, tonalítico e trondhjemítico, contendo enclaves de anfibolitos, metaultramafitos e metagabros.

Para uma melhor compreensão da geologia local e informações de subsuperfície, foram utilizadas informações litológicas de quatro poços tubulares do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) desenvolvido pela CPRM. Essas informações foram extraídas do endereço eletrônico www.siagasweb.cprm.gov.br, composto por uma base de dados de informações hidrogeológicas de todo o Brasil (Figura 8).

Figura 8 – Litologias presentes na área de estudo, poços da rede SIAGAS (pontos amarelos) e limites da área de aquisição de dados geofísicos (retângulo vermelho).

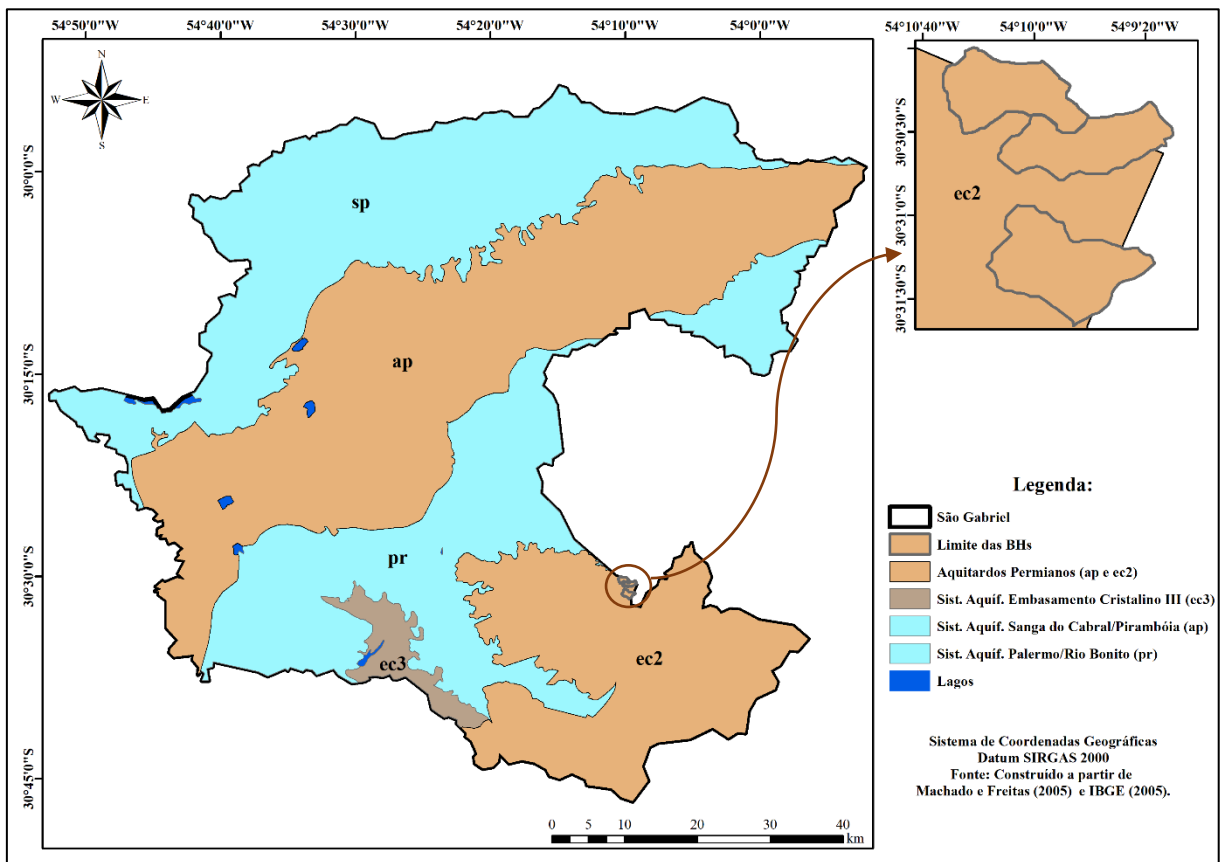


Fonte: Autoria própria.

3.1.4 Caracterização hidrogeológica

O município de São Gabriel está inserido nos Sistemas Aquíferos Sanga do Cabral/Pirambóia (sp), Palermo/Rio Bonito (pr), Embasamento Cristalino II (ec2) e Embasamento Cristalino III (ec3), conforme Machado e Freitas (2005) e Figura 9. Na figura citada anteriormente, apresentam-se as áreas localizadas no Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II (ec2).

Figura 9 – Sistemas Aquíferos no município de São Gabriel.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com Machado e Freitas (2005),

Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II (ec2): compreende basicamente as áreas correspondentes aos limites do embasamento cristalino, e incluindo municípios como Bagé, Caçapava do Sul, Encruzilhada do Sul e pequena porção de Porto Alegre. Compreende todas as rochas graníticas, gnáissicas, andesíticas xistos, filitos e calcários metamorfizados que estão localmente afetadas por fraturamentos e falhas. Geralmente apresentam capacidades específicas inferiores a 0,5 m³/h/m, ocorrendo também poços secos. As salinidades nas áreas não cobertas por sedimentos de origem marinha, são inferiores a 300 mg/l. Poços nas rochas graníticas podem apresentar enriquecimento em flúor.

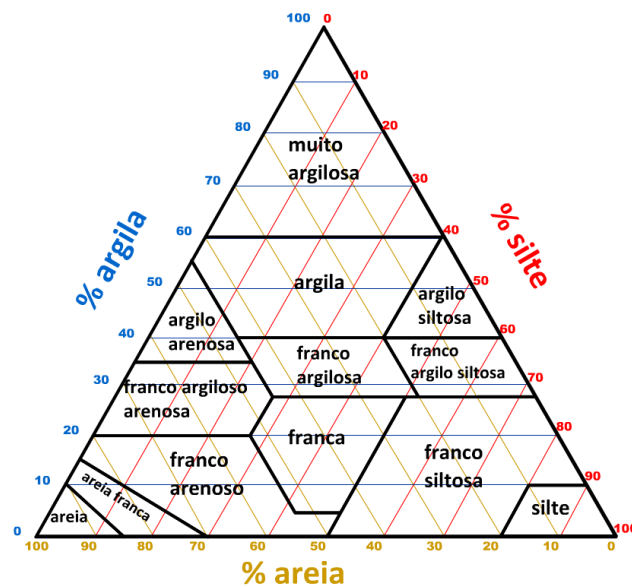
3.2 CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

3.2.1 Granulometria do solo

Para análise granulométrica do solo, foram coletadas amostras superficiais (0 cm) (FILIZOLA; GOMES; SOUZA, 2006) próximas aos pontos dos ensaios de infiltração.

Posteriormente, a análise do material coletado foi conduzida ao Laboratório de Física do Solo, do Centro de Ciências Rurais (CCR), da Universidade Federal de Santa Maria. O teor de areia foi determinado por meio de peneiramento e o teor de argila e silte foi obtido pelo método da pipeta, conforme descrito pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1997). Após a obtenção dos resultados, fez-se a classificação textural de cada amostra por meio do triângulo para a determinação de classes texturais (Figura 10), conforme Reinert e Reichert (2006).

Figura 10 – Triângulo textural.



Fonte: Reinert e Reichert (2006).

3.2.2 Determinação da infiltração de água no solo

A infiltração é o processo de percolação de água no solo, sendo o principal componente do ciclo hidrológico, ao ligar o fluxo superficial e a recarga subterrânea como uma fração do ciclo da água terrestre (LIU et al., 2019). Cheng et al. (2020) destacam que a infiltração de água no solo é um processo chave em diversos aspectos, tanto na hidrologia como na engenharia geotécnica e geológica.

Diversos estudos utilizaram o infiltrômetro de Cornell (SANTI, 2007; ZWIRTES et al., 2013; SANTI et al., 2016; SERATTO et al., 2019). Kemerich et al. (2014) demonstraram que o escoamento superficial possui comportamentos distintos em razão do uso, função e tipo do solo. Com o emprego do Infiltrômetro de Cornell, Zwirtes et al. (2013) concluíram que a

infiltração entre áreas destinadas à produção agrícola é diferente, sendo maior em áreas manejadas do que em áreas com pastagem perene.

Em relação ao estudo apresentado nesta dissertação, a infiltração de água no solo foi determinada por meio de infiltrômetro de Cornell (Figura 11), do Laboratório de Física e Hidrologia do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria. O infiltrômetro de Cornell, segundo Ogden, Van Es e Schindelbeck, (1997), é de fácil porte, composto por um anel de 0,23 m de diâmetro e inserido a 7,5 cm da superfície do solo, com um reservatório de 23 cm de diâmetro por 50 cm de altura; além disso, na sua parte superior, o infiltrômetro dispõe de um dispositivo para regular a carga hidráulica, simulando uma chuva de 300 mm/h.

Figura 11 – Infiltrômetro de Cornell.



Fonte: Autoria própria.

A metodologia deste estudo foi a mesma utilizada por Mallmann (2017), o qual, para maior uniformidade da precipitação, empregou uma intensidade de 300 mm/h. A taxa de infiltração é calculada por meio da diferença entre a chuva aplicada e o escoamento para determinado intervalo de tempo (três minutos). A partir disso, o autor, ajustou os valores

observados de infiltração de água no solo com o modelo de Smith (1972) modificado por Alves e Cabeda (1999), conforme a Equação 5.

$$i = (R - i_c) \cdot \left(\frac{t_e}{t}\right)^b + i_c \quad (\text{Equação 5})$$

Onde: i é a taxa de infiltração de água (mm/h); R é a intensidade de chuva (mm/h); i_c é a taxa constante de precipitação (mm/h); t_e é o tempo de início do escoamento (min); t é o tempo após o início do escoamento (min); e b é o parâmetro de ajuste do modelo.

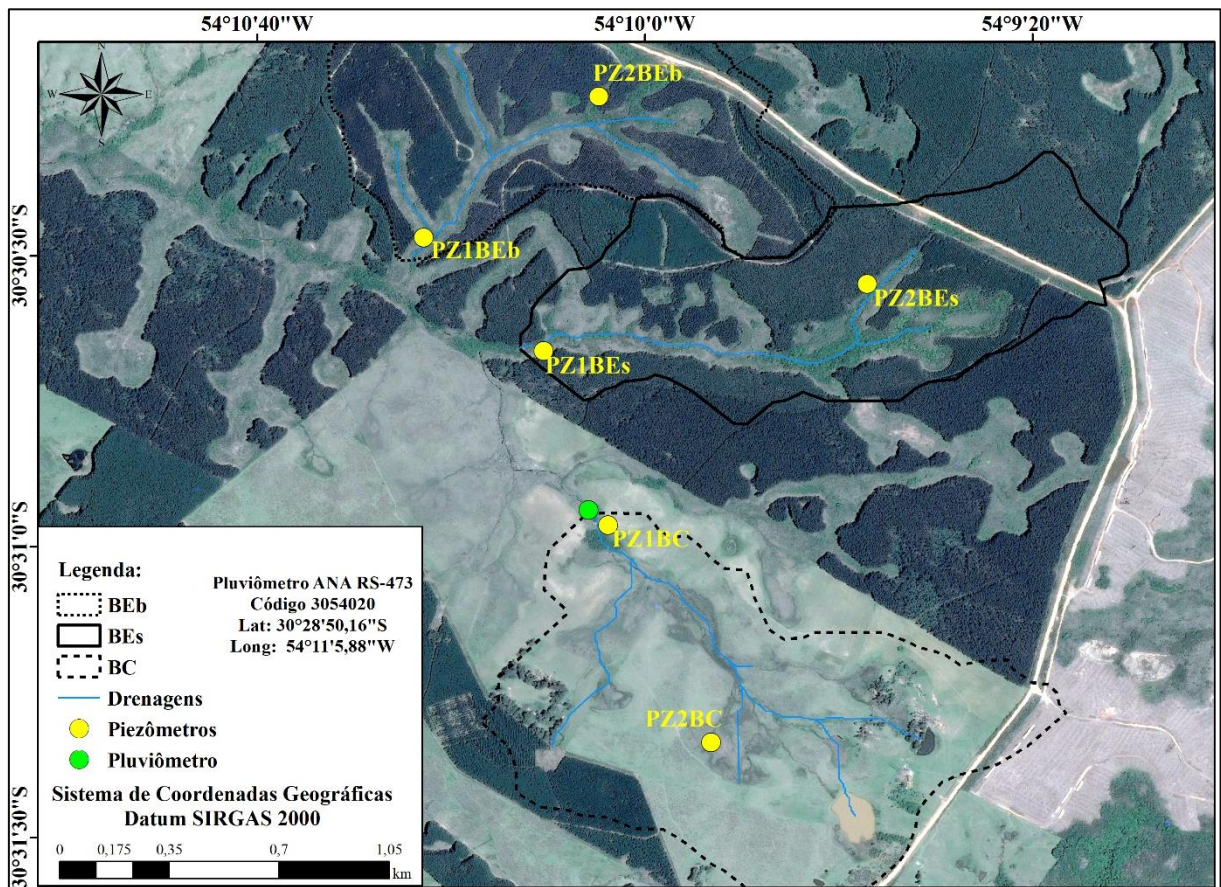
3.3 MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

Para a realização deste estudo, foram utilizados dados hidrológicos disponíveis de 01/01/2019 até 15/06/2020. O monitoramento de variáveis hidrológicas é realizado de forma independente nas áreas estudadas. A vazão é monitorada em seções fluviométricas, que são compostas por vertedores triangulares e retangulares, sendo que cada exutório é equipado por um sensor de nível para registro automático dos dados.

Os dados de nível da água subterrânea foram obtidos em piezômetros situados no interior das três bacias hidrográficas (dois piezômetros em cada), em que um localiza-se na parte mais baixa (fz) e o outro na porção mais alta (topo), conforme Figura 12 e Tabela 2. A leitura do nível da água em cada um dos poços de monitoramento é realizada por meio de *dataloggers*, com registro de leitura programado de hora em hora.

Ademais, cada bacia hidrográfica é equipada com pluviômetros automáticos, juntamente com as seções fluviométricas. Porém, devido às falhas no registro de dados de pluviosidade na BEb e BEs optou-se pela utilização dos dados pluviométricos da BC (Figura 12).

Figura 12 – Localização dos piezômetros e pluviômetro.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Informações dos poços de monitoramento presente nas bacias hidrográficas.

Poço de Monitoramento	Latitude	Longitude	Cota (m)	Profundidade do poço (m)
PZ1BEb	30°30'28.08"S	54°10'22.82"O	236,36	30
PZ2BEb	30°30'13.54"S	54°10'4.74"O	266,31	18
PZ1BEs	30°30'39.76"S	54°10'10.43"O	243,5	30
PZ2BEs	30°30'32.85"S	54°9'37.08"O	298,27	30
PZ1BC	30°30'57.76"S	54°10'3.82"O	260,82	30
PZ2BC	30°31'20.16"S	54°9'53.19"O	291,76	24

Fonte: Autoria própria.

Os dados de precipitação da BC foram comparados com uma estação pluviométrica de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA). Essa estação é operada pela CPRM, denominada de “RS-473”, cujo código é 3054020 e está situada aproximadamente quatro

quilômetros no sentido noroeste do vertedor da BC. Os dados foram obtidos no Portal HidroWeb, no endereço eletrônico www.snirh.gov.br/hidroweb.

Ademais, para a discussão, foram utilizados os dados das médias climatológicas para o município de São Gabriel. Essa média é baseada em 30 anos de dados (1981-2010), usando estações pluviométricas oficiais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As informações foram extraídas do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), disponível no sítio eletrônico irga.rs.gov.br/medias-climatologicas.

3.3.1 Estimativa da vazão da BEb

Devido a falhas no registro dos dados fluviométricos, a vazão da BEb foi estimada pelo modelo *Limburg Soil Erosion Model* (LISEM). Ebling et al. (2021) afirmam que esse modelo tem sido empregado frequentemente em estudos que relacionam os processos erosivos e a formação do escoamento superficial distribuído no espaço (área); assim, o LISEM objetiva simular os impactos das atividades humanas nos recursos naturais. O modelo foi projetado para simular o escoamento e a erosão como consequência de um único evento pluviométrico em bacias hidrográficas de uso agrícola com tamanho entre um hectare até aproximadamente 100 km² (DE ROO; JETTEN, 1999).

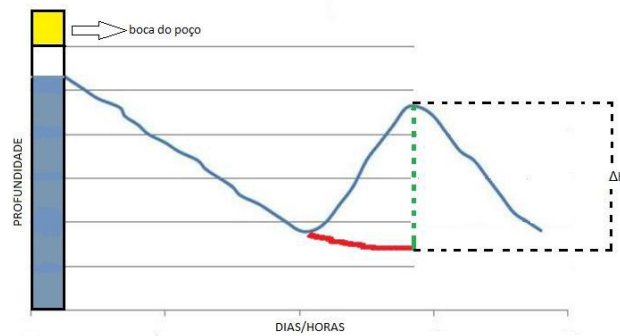
As variáveis utilizadas no LISEM para estimativa de vazão da BEb foram baseadas em dados já existentes da BEs (PELÁEZ, 2014), assumindo a existência de uma semelhança entre a declividade e tipos e uso do solo. Dessa forma, para a BEb, foram estimados dados de deflúvio para o período entre 11/07/2019 até 04/12/2019. A bacia hidrográfica com cultivo de *Eucalyptus saligna* (BEs) apresentou falhas entre 23/07/2019 até 20/08/2019. Assim, a vazão foi estimada no LISEM. A BC apresentou falhas entre 26/07/2019 até 29/07/2019 e 30/11/2019 até 19/12/2019.

3.4 ESTIMATIVA DA RECARGA SUBTERRÂNEA

A recarga de água subterrânea foi estimada por meio da análise dos níveis da água dos poços piezométricos (dois em cada BH), sendo possível extrapolar as curvas de recessão dos níveis dos poços, baseando-se na metodologia WTF, apresentada por (HEALY; COOK, 2002). Essa metodologia foi empregada por Baumhardt (2014), comparando a recarga em poços instalados em uma bacia hidrográfica florestada com eucalipto e uma bacia hidrográfica de

campo, em um município próximo de São Gabriel (RS). Esse autor demonstrou a extrapolação da curva de recessão na Figura 13.

Figura 13 – Extrapolação da curva de recessão de um aquífero para utilização do WTF.



Fonte: Baumhardt (2014).

Conforme Baumhardt (2014), o método consiste na identificação de períodos sem precipitação na série de dados, para então realizar os cálculos de recessão do aquífero. A recarga é calculada para diferentes períodos temporais, em que cada período de tempo representa um evento de recarga (LABRECQUE; CHESNAUX; BOUCHER, 2020). O WTF está baseado na suposição de que os aumentos no nível piezométrico são oriundos da recarga por eventos pluviais na área do aquífero (CROSBIE; BINNING; KALMA, 2005). Os autores ressaltam que, se o aumento do nível da água e o rendimento específico forem conhecidos, a recarga é definida pela Equação 6.

$$R = \Delta h \times S_y \quad (\text{Equação 6})$$

Onde: R é a recarga; Δh é a mudança na altura do lençol freático; e S_y é o rendimento específico.

Para o rendimento específico, adotaram-se os valores médios de macroporosidade, como proposto por Healy e Cook (2002). Esse método também foi empregado por Baumhardt (2014). Os valores médios de macroporosidade foram obtidos do estudo de Pelaéz (2014), sendo 20,5% na BEs, 13,9% na BC (PELÁEZ, 2014), e, para a BEb foi utilizado o valor médio da BEs. O período de análise foi de 01/01/2019 até 04/06/2020; além disso, foi analisado um período de 197 dias (diferença entre os ensaios de TRE) antes do primeiro e do segundo campo geofísico.

3.5 BALANÇO HÍDRICO

3.5.1 Balanço hídrico em escala de bacia hidrográfica

O balanço hídrico nas áreas de estudo foi determinado utilizando-se o método de conservação das massas. Esse método foi aplicado por Ferreto et al. (2020) para as mesmas bacias hidrográficas. O autor considerou que os limites da drenagem superficial e subterrânea coincidem e que não ocorre trocas subterrâneas com áreas limítrofes. O relatório produzido por Kiang, Oliva e Barrera (2008) indica que os fluxos dos recursos hídricos subterrâneos estão correlacionados com a topografia local e as áreas de descargas estão próximas às drenagens das bacias.

A série temporal dos dados utilizados foi entre 01/01/2019 até 04/06/2020. Porém, para conciliar os dados de balanço hídrico com os resultados da TRE foi adotado um período de 197 dias (diferença de dias entre os levantamentos geofísicos) antes da primeira e da segunda coleta de dados geofísicos, sendo primeiro intervalo entre 06/05/2019 até 19/11/2019 e o segundo intervalo entre 20/11/2019 até 04/06/2020.

No estudo de Ferreto et al. (2020), a interceptação nas BHs representou 26,8%, 22,7% e 13,6% da precipitação total na BEs, BEb e BC, respectivamente, entre o período de outubro de 2014 a setembro de 2018. Dessa forma, as porcentagens encontradas pelo autor foram utilizadas para o cálculo de interceptação. A vazão foi medida por meio dos vertedores presentes em cada BH e a precipitação utilizada foi da BC, por não apresentar falhas.

Como essa parte do estudo está norteada pela metodologia aplicada por Ferreto et al. (2020), a precipitação pluvial foi considerada a única entrada de água e o processo de evapotranspiração. Interceptação vegetal, evaporação de água do solo, transpiração das plantas e vazão consistiram nas únicas formas de saída de água das bacias hidrográficas. Na Equação 7, apresentam-se as variáveis utilizadas para o cálculo de balanço hídrico, determinado pela diferença entre as entradas e saídas de água e aplicada para cada área de estudo.

$$P_{\text{ano}} - Q_{\text{ano}} - ET_{\text{ano}} - INT_{\text{ano}} \pm \Delta S_{\text{ano}} = 0 \quad (\text{Equação 7})$$

Onde: P_{ano} é a precipitação total no ano i (mm); Q_{ano} é a vazão no ano i (mm); ET_{ano} é a evaporação do solo e transpiração vegetal no ano i (mm); INT_{ano} é a evaporação da água interceptada pela vegetação (mm); e ΔS_{ano} é a variação do armazenamento de água na bacia no ano i (mm).

3.5.1.1 Evapotranspiração de referência

O método FAO Penman-Monteith (ALLEN, 1998) foi empregado para estimar a evapotranspiração de referência (ET_o), por meio do auxílio de planilha eletrônica. Os parâmetros utilizados são as temperaturas máximas e mínimas (°C), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m/s) e a insolação (horas/dia). Os dados utilizados foram adquiridos da estação automática A832, situada no município de São Gabriel, de responsabilidade do INMET.

3.5.1.2 Evapotranspiração real (ET_a)

A estimativa da foi calculada com base na Equação 8. Ferreto (2019) reescreveu a Equação 8, assumindo que $\Delta_{s_{ano}} = 0$.

$$ET_{a_{ano}} = Pt_{ano} - Q_{ano} - INT_{ano} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde: ET_{a_{ano}} é a evaporação do solo e transpiração vegetal no ano i (mm); Pt_{ano} é a precipitação total no ano i (mm); Q_{ano} é a vazão no ano i (mm); e INT_{ano} é a evaporação da água interceptada pela vegetação (mm).

3.5.2 Balanço hídrico no perfil do solo

Para o balanço hídrico no perfil do solo, empregou-se o método sequencial adaptado de Thornthwaite e Mather (1955), para cada uma das bacias hidrográficas, no período de 01/01/2019 até 15/06/2020. Os parâmetros de entrada são a precipitação total mensal (Pt), o deflúvio (Q), a evapotranspiração de referência (ET_o) e a evaporação de água pela vegetação (INT). Portanto, a determinação do balanço hídrico no perfil do solo foi baseada no estudo conduzido por Ferreto et al. (2020). Os autores ainda citam que, os valores da capacidade de água disponível às plantas até a profundidade efetiva do sistema radicular (CAD) são de 98,2 mm para BEb, 88,4 mm para a BEs e 64,2 mm para a BC. Os parâmetros mensais de saída do modelo são a demanda evapotranspirativa da vegetação não suprida, devido ao déficit de água (DEF); o excedente de água após atendida a demanda evapotranspirativa (EXC); a reposição do armazenamento de água dentro da zona de raiz (REP); o armazenamento de água no solo (S); e a retirada de água que foi armazenada anteriormente no solo para suprir a demanda evapotranspirativa (RET) (FERRETO et al., 2020).

3.6 CARACTERIZAÇÃO DA SUBSUPERFÍCIE

O método geofísico Tomografia por Resistividade Elétrica foi aplicado em proximidade aos poços de monitoramento e aos limites da área de estudo, visando obter o máximo de informações possíveis referentes a composição do subsolo. A condução dos trabalhos geofísicos ocorreu nas datas 19/11/2019 e 04/06/2020. O trabalho geofísico foi realizado por meio da parceria com a Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) campus Caçapava do Sul – RS. O equipamento utilizado nesse estudo é um resistímetro modelo *Syscal Pro* com 72 canais fabricado pela *IRIS Instruments*[®] (Figura 14). O método empregado é o mais indicado conforme a NBR 15.935/2011 (ABNT, 2011).

Figura 14 – Resistímetro *Syscal Pro* da *IRIS Instruments*[®].



Fonte: Autoria própria.

A TRE foi conduzida em nove perfis com comprimento máximo de 90 metros. Dessa forma, foi empregado o arranjo dipolo-dipolo, com espaçamento entre eletrodos de cinco metros, conforme a Figura 15. No decorrer da aplicação da técnica geofísica, encontrou-se dificuldade de acesso no segundo levantamento geofísico; assim, a Linha 5 foi localizada e

conduzida próxima à mesma linha do primeiro levantamento geofísico. Devido às condições do relevo acidentado o transporte do equipamento a Linha 9, foi realizado o mais próximo possível do piezômetro, consoante Figura 16.

Figura 15 – Aplicação do método geofísico na área de estudo.



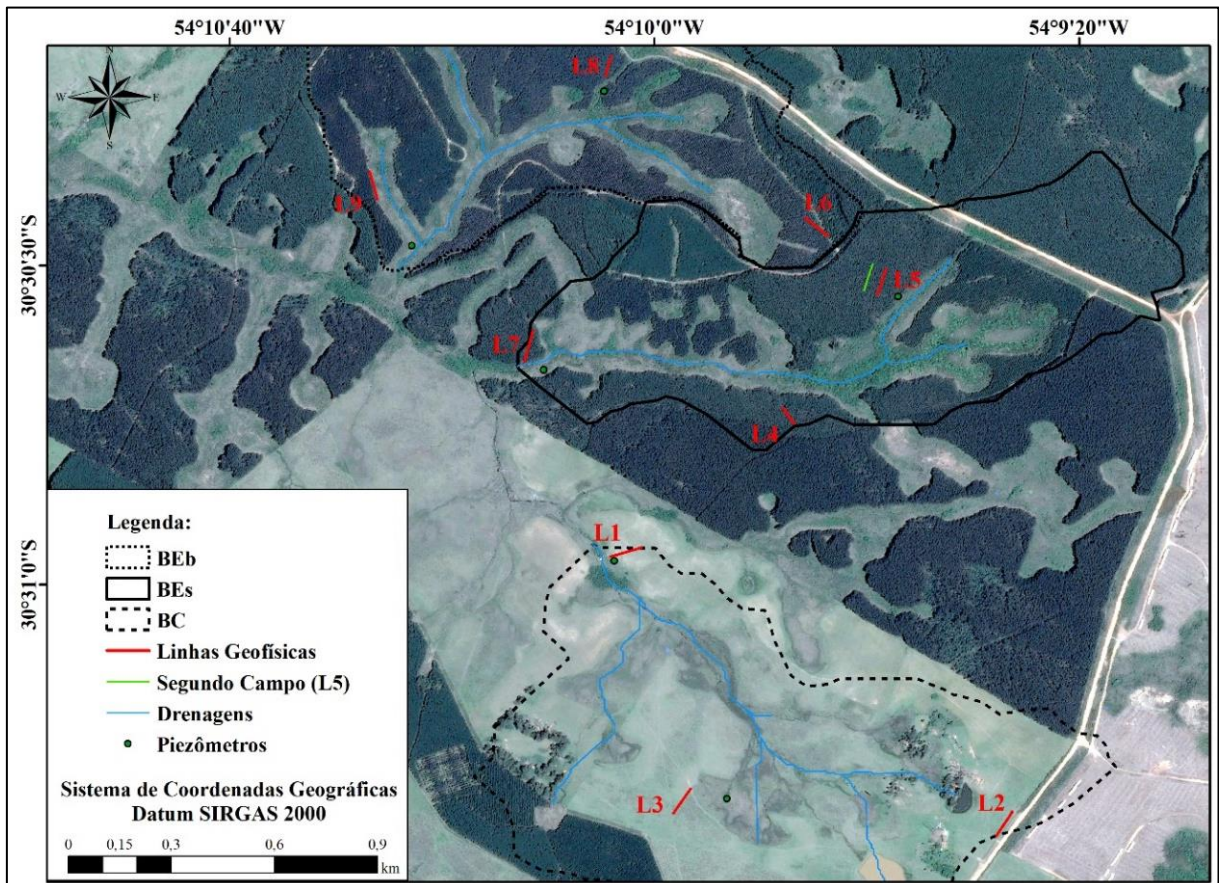
Fonte: Autoria própria.

Após a coleta das informações no campo, os dados foram pré-processados e processados com auxílio do Laboratório de Geofísica Aplicada, da Universidade Federal do Pampa, campus Caçapava do Sul. O pré-processamento foi realizado por meio do *software Prosys II* da *Iris Instruments*[®], para a transferência de dados (equipamento-computador), inserção da topografia dos perfis e controle de qualidade dos dados brutos. No controle dos dados brutos, foi realizada a verificação dos valores de resistividade iniciais, remoção de valores negativos e controle do desvio padrão de valores de resistividade. Após o pré-processamento utilizou-se o *software Res2Dinv*[®], licenciado pela UNIPAMPA, para a etapa de processamento de dados que consiste na inversão dos valores de resistividade elétrica aparente.

A inversão é um procedimento eficiente para transformar as respostas dos dados amostras em parâmetros que permitam modelar as estruturas da subsuperfície. Quando aplicado corretamente, é capaz de gerar modelos com informações consistentes a partir dos dados conhecidos (ROCHA, 2013). De acordo com Bortolozo (2011), a inversão de dados geofísicos consiste em obter um conjunto de parâmetros que propicia o ajuste aos dados medidos e ao mesmo tempo satisfaz os vínculos geofísicos. O *software Res2Dinv*[®] empregado neste estudo utiliza uma técnica para inversão de dados de resistividade que foi desenvolvida por deGroot-Hedlin e Constable (1990) e Loke e Barker (1996), que se baseia no método dos mínimos

quadrados e “suavização restringida” (*smoothness-constrained*). Determina-se um modelo 2D para o subsolo com base nos dados de resistividade por um levantamento de imagem elétrica.

Figura 16 – Localização das Linhas Geofísicas na área de estudo.



Fonte: Autoria própria.

Para interpretação das seções, foram considerados os valores de resistividade elétrica dos materiais presentes na área de estudo, a porosidade e a permeabilidade de rochas sedimentares (arenitos da Formação Rio Bonito) e camadas de solo argiloso. A escala de resistividade elétrica foi dividida em quatro zonas, devido à área de aquisição e às anomalias de resistividade, sendo elas:

- Zona Saturada: Correspondente ao intervalo de resistividade elétrica de 33 a 180 Ohm.m (com cores variando de azul forte a azul claro). A baixa resistividade é característica da presença de água em subsuperfície, camadas que podem estar situadas em rochas sedimentares de alta porosidade e baixa permeabilidade, as quais permitem a percolação de fluídos em subsuperfície.

- b) Zona Intermediária I: Com resistividade elétrica variando de 180 a 1.700 Ohm.m (de azul claro a verde musgo) corresponde a uma área de contato entre a zona saturada e rochas com menos porcentagem de água entre grãos ou uma área com arenitos de grão médio. Pode também estar relacionada com um solo argilo-arenoso, agindo como selante da zona fortemente saturada.
- c) Zona Intermediária II: De 1.700 a 5.022 Ohm.m e cores variando de verde musgo a laranja. Possivelmente composta por arenitos médios a finos insaturados. É uma zona de transição com o embasamento (rochas ígneas insaturadas).
- d) Zona Insaturada: De 5.022 a 11.605 Ohm.m e cores variando entre laranja e roxo. Associado a arenitos insaturados e/ou rochas provenientes do embasamento, podem estar relacionadas com granitos da unidade litológica Jaguari.

Para análise e interpretação dos resultados adquiridos com base em levantamentos geofísicos geoeletricos, é necessário o conhecimento das propriedades físicas dos materiais (rochas, solo e água subterrânea) do local estudado. Dessa forma, esses materiais serão determinantes nos contrastes obtidos de resistividade elétrica nas pseudoseções obtidas. Ademais, para a quantificação de cada zona, sendo Zona Saturada, Zona Intermediária I, Zona Intermediária II e Zona Insaturada, foi realizada uma relação proporção em cada linha, delimitando cada seção no *AutoCAD*[®] licenciado para estudante. Assim, foi possível comparar as linhas entre os ensaios geofísicos.

Para efeito de simplificação, as rochas são consideradas como agregados heterogêneos de partículas sólidas, condutoras e/ou dielétricas compostos por espaços vazios preenchidos em proporções variáveis de eletrólitos aquosos. As propriedades elétricas dependem da textura e composição mineral da matriz sólida, da geometria do espaço de poros e da proporção volumétrica de água nesses vazios (MENDELSON; COHEN, 1982; SEN; GOODE; SIBBIT, 1988; DE LIMA; SHARMA, 1990). Na natureza, a água apresenta altos valores de condutividade, pois sempre há sais dissolvidos como o NaCl. A quantidade de sais dissolvidos depende da natureza das rochas e o contato pela superfície do terreno ou subterrâneo (ORELLANA, 1982). Na Tabela 3, são apresentados os valores e variações de resistividade da água.

Tabela 3 – Valores de resistividade elétrica da água em diversos ambientes geológicos.

Água (ambientes geológicos)	Resistividade (Ω/m)
Água de lagos e arroios de alta montanha	$10^3 - 3 \times 10^3$
Água em subsuperfície (rochas ígneas)	$0,1 - 3 \times 10^3$
Água em subsuperfície (sedimentares)	10–100
Água natural (rochas ígneas)	0,5–150
Água natural (sedimentares)	1–100
Águas marinhas	~0,2

Fonte: Orellana, (1982) e Telford, Geldart e Sheriff, (1990).

Na Tabela 4, expõem-se os principais tipos de rochas e seus valores de resistividade e variações conhecidos na literatura. A variação (*range*) dos valores registrados refere-se à presença de impurezas, imperfeições ou defeitos nos cristais minerais que constituem as rochas ou ainda pela presença de microfissuras dos minerais em geral preenchidas com fluídos (PARKHOMENKO, 1967).

Tabela 4 – Valores de resistividade para os diferentes tipos de rochas.

Tipo de Rocha	Resistividade (Ω/m)	
Argilitos	10–8x10 ²	
Argilas	1–100	
Aluvião e areias	10–800	
Conglomerados	2x10 ³ –10 ⁴	
Granito	4,5x10 ³ (molhado) – 1,3x10 ⁴ (seco)	
Arenitos	1–6,4x10 ⁸	
		% H₂O
Arenito médio	4,2x10 ³	1,00
	1,4x10 ⁸	0,10
Arenito fino	9,6x10 ⁵	0,39
	1x10 ⁸	0,18

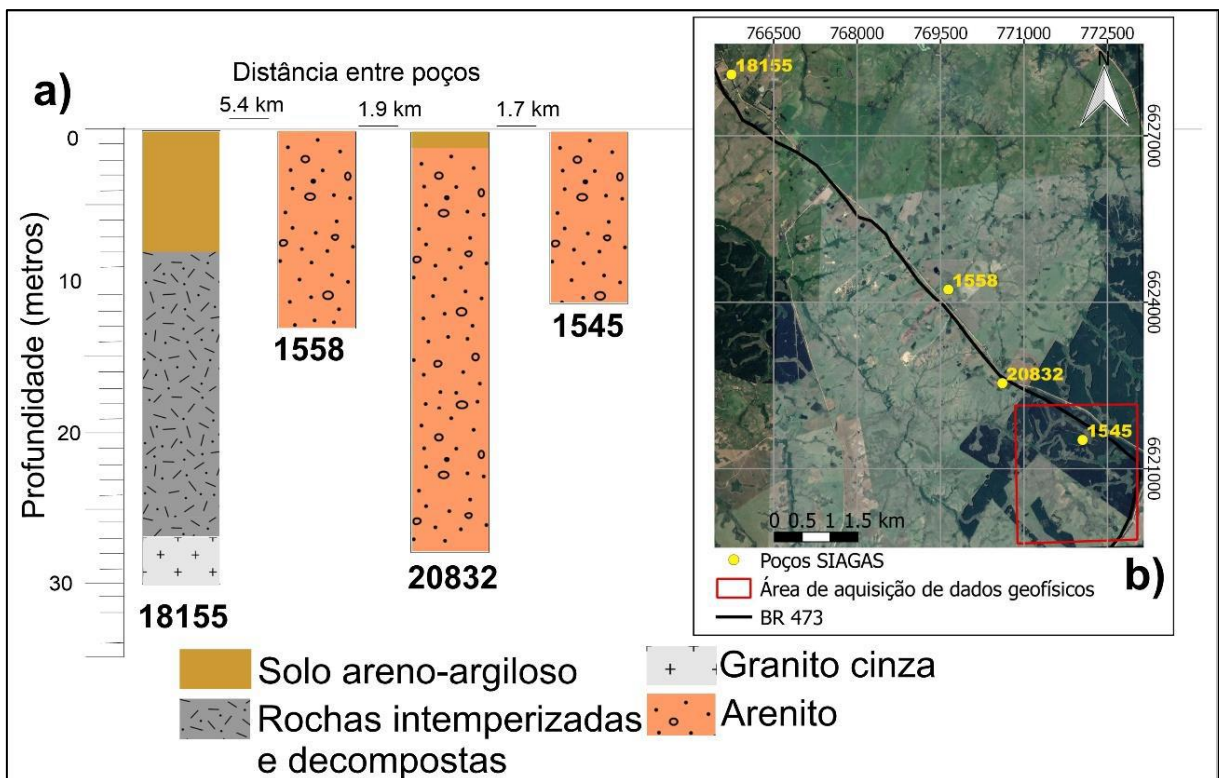
Fonte: Telford, Geldart e Sheriff, (1990).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MAPEAMENTO GEOLÓGICO

As informações litológicas de quatro poços tubulares com profundidade de até 30 metros, dispostos em linha, próximos à rodovia BR 473 constam na Figura 17. A partir da coluna litológica extraída dos poços SIAGAS, têm-se, na base, solo areno-argiloso e muitas vezes arenitos provenientes da Formação Rio Bonito; rochas intemperizadas e decompostas que podem ter relação com o Complexo Cambaí; e granitos correlacionáveis à unidade litológica denominada pela CPRM (2006) de Granito Jaguari (Figura 17a).

Figura 17 – Informações empregadas na interação e descrição geológica. Coluna litológica dos poços tubulares (a) e localização dos poços (b).



Fonte: Autoria própria.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

4.2.1 Granulometria

Na Tabela 5, apresentam-se os resultados obtidos para granulometria das amostras de solo coletadas, destacando o P2, P4, P6 e P9 com maiores porcentagens de areia, o que facilita a drenagem da água de camadas mais superficiais para as camadas mais profundas. O P3 e o P5 apresentaram maiores teores de argila, sendo classificados como solos franco argilo arenosos, diferentemente dos demais que foram classificados como franco arenosos.

Em áreas de solos arenosos, com alta porcentagem de areia como a área de estudo, a cobertura do solo é de extrema importância para evitar a ocorrência de processos erosivos. A infiltração da água no solo também relacionada com a sua composição granulométrica. Esses solos arenosos retêm pouca água devido aos espaçamentos entre os grãos, o que facilita assim, o fluxo da água e ar pelos interstícios (PELAÉZ, 2014).

Tabela 5 – Granulometria do solo para as coletas superficiais.

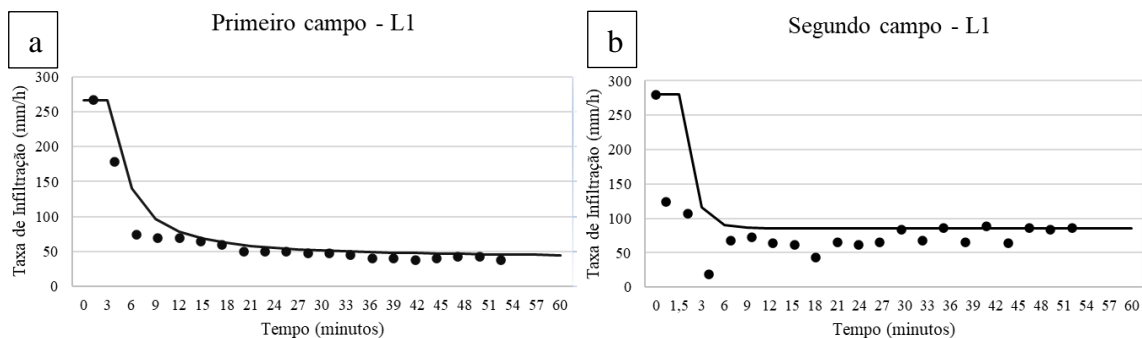
Bacia Hidrográfica de Campo (BC)			
	Ponto 1 (L1)	Ponto 2 (L2)	Ponto 3 (L3)
Areia (%)	67,72	74,07	59,16
Silte (%)	17,02	12,27	17,47
Argila (%)	15,26	13,66	23,37
Classificação	Franco arenoso	Franco arenoso	Franco argilo arenoso
Bacia Hidrográfica <i>Eucalyptus saligna</i> (BEs)			
	Ponto 4 (L4)	Ponto 5 (L5)	Ponto 6 (L7)
Areia (%)	72,96	62,46	77,34
Silte (%)	12,89	16,75	11,02
Argila (%)	14,15	20,79	11,64
Classificação	Franco arenoso	Franco argilo arenoso	Franco arenoso
Bacia Hidrográfica <i>Eucalyptus benthamii</i> (BEb)			
	Ponto 7 (L6)	Ponto 8 (L8)	Ponto 9 (L9)
Areia (%)	63,47	67,45	76,12
Silte (%)	18,03	13,27	11,77
Argila (%)	18,51	19,28	12,12
Classificação	Franco arenoso	Franco arenoso	Franco arenoso

Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Infiltração de água no solo

Na Figura 18a, apresenta-se o ensaio de infiltração com uso do infiltrômetro de Cornell, realizado no mês de novembro de 2019, quando foi simulada uma precipitação de 300 mm/h e obtida uma taxa de infiltração constante de 45 mm/h, na Bacia de Campo. No segundo ensaio (Figura 18b), na BC, foi obtido o valor de 85 mm/h de taxa de infiltração, o que pode ter influência direta com o grau de compactação do solo oriundo do pisoteio dos animais, por ser uma área de ocupação para a agropecuária isso pode ocorrer com frequência. Além disso, no primeiro e segundo ensaios de infiltração, o escoamento superficial iniciou aos três minutos a partir do início do ensaio. Ou seja, levou o mesmo tempo para que o solo estivesse totalmente saturado e iniciando o escoamento superficial na L1.

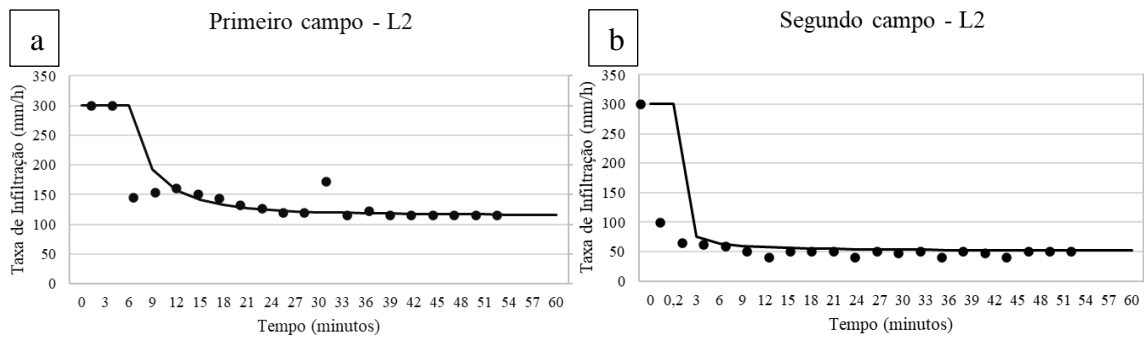
Figura 18 – Taxa de infiltração na BC na L1 campo 1(a) e campo 2 (b).



Fonte: Autoria própria.

O escoamento superficial iniciou aos 9 minutos no primeiro ensaio de infiltração (Figura 19a) e, no segundo ensaio (Figura 19b), a 3 minutos na L2, ambos ensaios conduzidos na BC, o que pode ter ocorrido em razão do grau de saturação do solo. 15 dias anteriores ao primeiro ensaio houve acúmulo de 43 mm de precipitação e, para o mesmo período no segundo ensaio, esse acúmulo foi de 150 mm. Zwirter et al. (2013) destacam que a elevada intensidade de chuva aplicada causa uma rápida saturação do solo e, conseqüentemente, ocasiona o ES e, posteriormente, uma estabilização na taxa de infiltração.

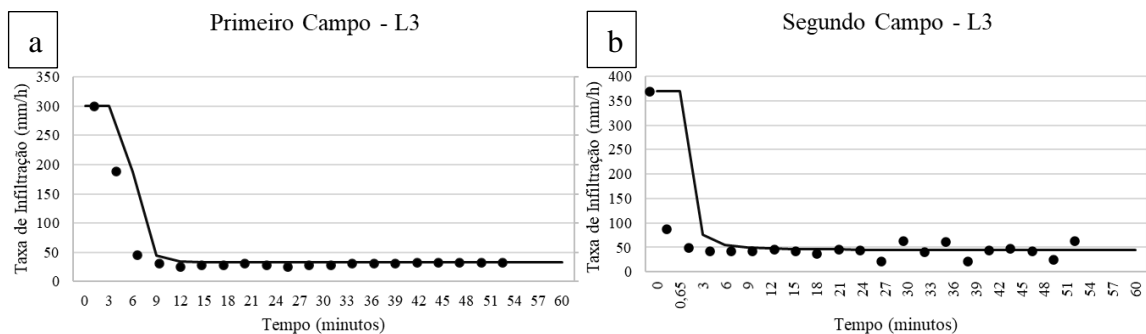
Figura 19 – Taxa de infiltração na BC na L2 campo 1(a) e campo 2 (b).



Fonte: Autoria própria.

O início do ES no primeiro ensaio realizado na L3 foi aos 6 minutos (Figura 20a), e, no segundo campo, o início do ES ocorreu aos 39 segundos (Figura 20b), sendo esses ensaios conduzidos na BC. Quanto à taxa de infiltração, observa-se que no primeiro ensaio, a infiltração estabilizou na faixa dos 33 mm/h a partir dos 15 minutos (Figura 20a), e, na faixa dos 44 mm/h, a partir dos 27 minutos, no segundo ensaio (Figura 33b). Assim, a taxa de infiltração foi similar entre os dois ensaios, a compactação e umidade do solo podem ter influenciado essa pequena diferença.

Figura 20 – Taxa de infiltração na BC na L3 campo 1(a) e campo 2 (b).

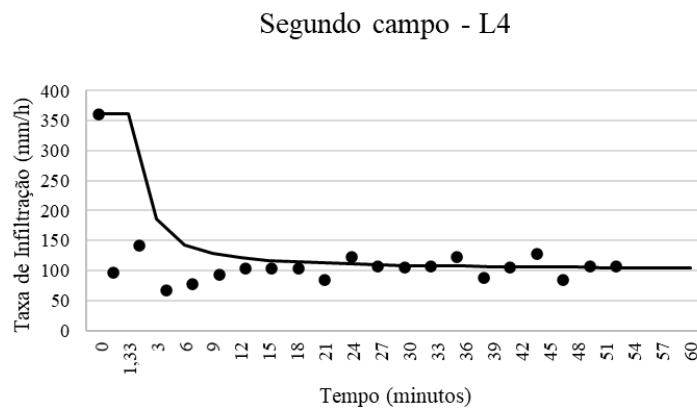


Fonte: Autoria própria.

As baixas taxas de infiltração em áreas ocupadas por campo podem ocorrer devido à densidade do solo nas camadas mais superficiais em razão do pisoteio animal, destacando o superpastejo e as queimadas (KEMERICH et al., 2014). Mendonça et al. (2009) destacam que a baixa capacidade de infiltração, juntamente às perdas de umidade do solo em áreas desmatadas, podem afetar diretamente o nível da água subterrânea, diminuindo a capacidade de recarga dos aquíferos.

No primeiro ensaio realizado no mês de novembro de 2019, na L4, na bacia ocupada por *Eucalyptus saligna* (BEs), todo o volume de água simulado na precipitação infiltrou no solo durante os 60 minutos. Outro fator que pode ter ocasionado a infiltração de todo o volume precipitado pode ter sido os caminhos preferenciais gerados pelas raízes das árvores, o que se trata de uma área ocupada por floresta de eucalipto. No segundo ensaio realizado, iniciou-se o ES aos 3 minutos. A TI foi estabilizada a partir dos 18 minutos em torno de 102 mm/h (Figura 21).

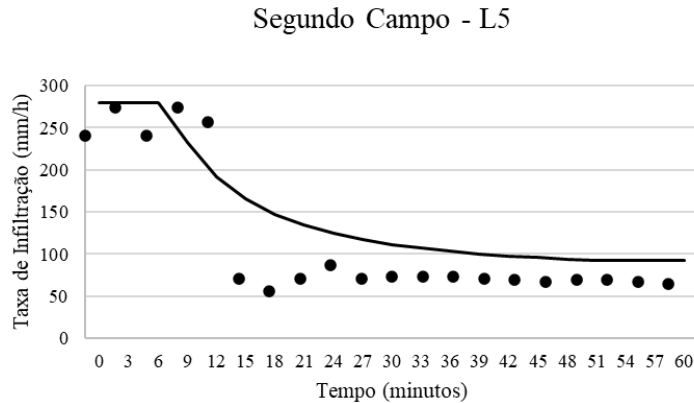
Figura 21 – Taxa de infiltração na BEs na L4, campo 2.



Fonte: Autoria própria.

Na L5 (Figura 22), na BEs, durante o primeiro ensaio toda água precipitada infiltrou no solo, não ocorrendo ES. Já no segundo ensaio, realizado no mês de junho, em estação em que ocorreu maior precipitação anterior ao campo, foi obtido ES a partir dos 15 minutos. A partir dos 33 minutos em 86 mm/h, houve estabilização da taxa de infiltração, mostrando grande parte do volume precipitado no solo.

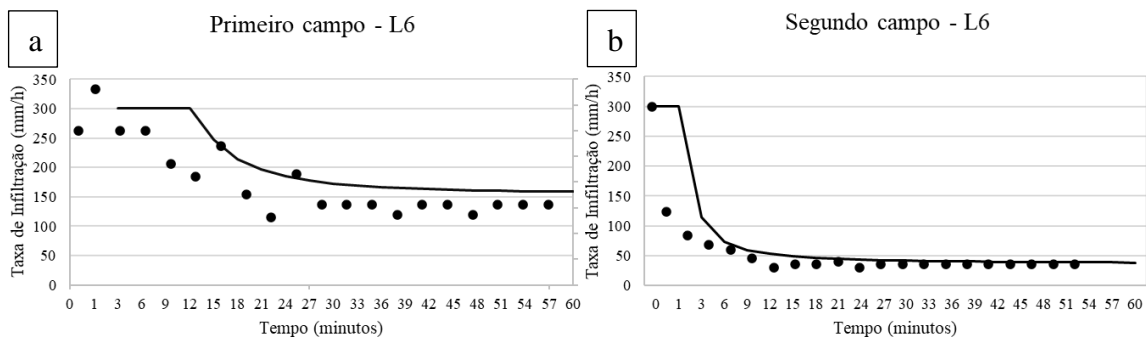
Figura 22 – Taxa de infiltração na BEs na L5, campo 2.



Fonte: Autoria própria.

Na L6 na BEb, ocorreu um escoamento superficial nos dois ensaios de infiltração realizados (Figuras 23a e 23b), o que pode ser justificado pelo teor de argila em torno de 18% (Tabela 5). No primeiro ensaio, realizado conforme a Figura 36a, observa-se o início do ES a partir dos 15 minutos e a infiltração estabilizando a partir dos 33 minutos em 156 mm/h. No segundo campo realizado (Figura 23b), o ES iniciou aos três minutos e a infiltração estabilizou a partir dos 33 minutos e 35 mm/h. A diminuição na taxa de infiltração pode estar diretamente relacionada à estação do ano. No segundo ensaio, o solo encontrava-se mais úmido devido ao maior volume de precipitação anterior à realização do ensaio.

Figura 23 – Taxa de infiltração na BEb na L6 campo 1(a) e campo 2 (b).



Fonte: Autoria própria.

Nas linhas L8 e L9 presentes bacia hidrográfica ocupada pelo plantio do *E. benthamii*, nos dois ensaios realizados, todo o volume de água precipitado infiltrou no solo, devido às características físicas do solo, onde, na L8 e L9 na BEb, o solo apresentou uma maior concentração de grãos de areia do que as demais, sendo caracterizado como um solo franco

argilo arenoso (Tabela 5). Nyatuame, Amekudzi e Agodzo (2020) citam que os principais fatores que interferem nos processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica são a mudança climática e as mudanças no uso do solo a partir de ações antrópicas. Assim, pode-se perceber uma diferença no processo de infiltração de água do solo em área de pecuária intensiva e área ocupada pelo plantio de eucalipto. Mendonça et al. (2009) citam que a infiltração de água no solo varia de acordo com a textura do solo, cobertura vegetal e o grau de saturação, e a velocidade do fluxo entre as camadas está associada à condutividade hidráulica que é dependente do teor de umidade das camadas.

A recarga do aquífero também é dependente desses fatores. Segundo Qi et al. (2020), a água que infiltra no solo está disponível para as plantas e pode ser evaporada, transpirada ou percolada até o lençol freático. Porém, Dresel et al. (2018) citam que as árvores aumentam a interceptação pelas folhas e serapilheira, e, também, o solo mais seco pode atrasar o início do escoamento superficial, porém, quando o solo estiver úmido não haverá mais efeito no escoamento superficial.

A partir dos dois ensaios aplicados, nos 15 dias antecedentes à realização do primeiro campo em 19/11/2019, ocorreu volume de chuvas de 43 mm. No segundo ensaio, realizado em 04/06/2020 o volume de chuvas nos 15 dias que antecederam foi de 150 mm. Diante disso, a umidade no segundo campo pode ter influenciado nas diferenças na infiltração e no escoamento. De acordo com Reichert et al. (2020), em solos mais úmidos, a retenção da água no solo possui relação com o tamanho e organização dos poros, enquanto que, em solos mais secos, a retenção está relacionada com o tamanho e atividade das partículas. Assim, a diferença entre as taxas de infiltração nos dois ensaios pode estar associada à umidade do solo.

A infiltração da água no solo é uma importante variável do ciclo hidrológico, pois influencia diretamente a geração do escoamento superficial. Quanto maior a taxa de infiltração, menor será o escoamento superficial. Tashayo et al. (2020) afirmam que a infiltração tem uma influência importante para produção de escoamento superficial, erosão do solo, absorção e percolação de nutrientes e rendimento da cultura. Ou seja, vários componentes de modelos hidrológicos e de erosão podem ser derivados de dados de infiltração.

4.3 MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

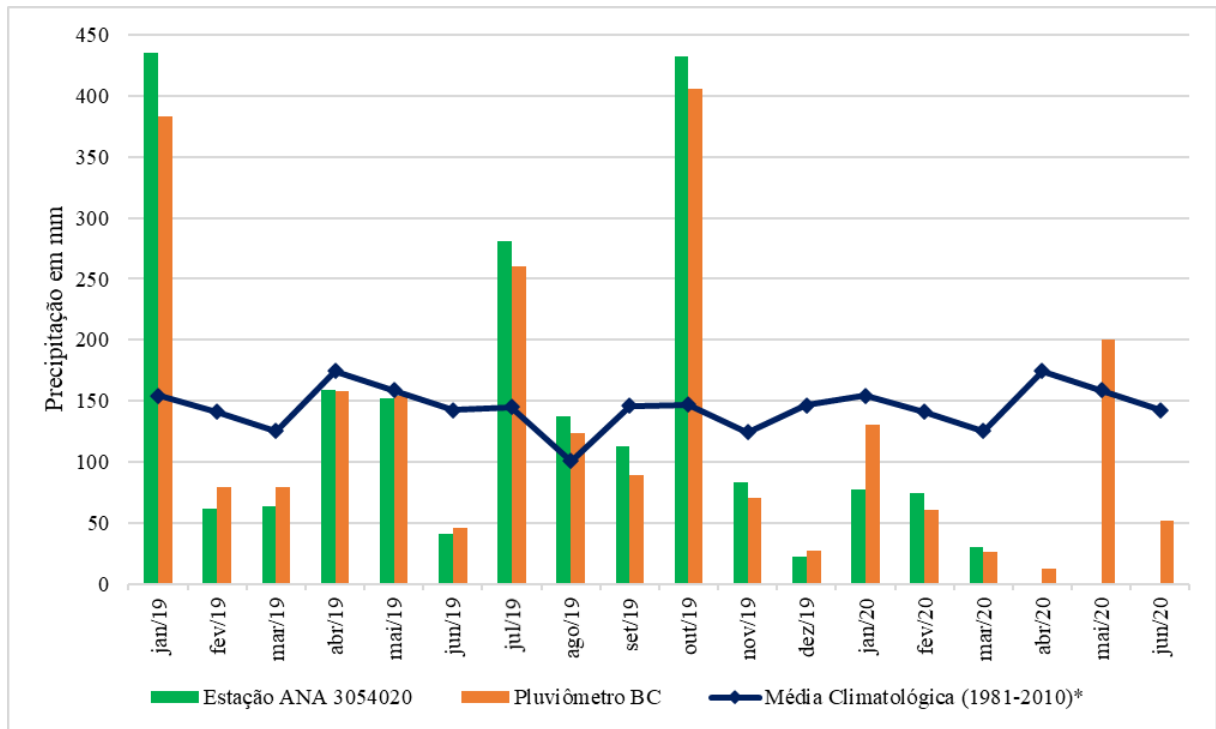
4.3.1 Precipitação

Na Figura 24, expõe-se à distribuição da precipitação mensal entre 01/01/2019 e 15/06/2020 para a área de estudo. As chuvas não são uniformemente distribuídas ao longo do ano. Especificamente, para os meses de janeiro e outubro de 2019, houve altos valores de precipitação (383,4 e 405,9 mm, respectivamente) na Bacia de Campo. Dessa forma, para esses dois meses, tem-se uma superioridade na ordem de 228,9 e 259,0 mm em relação à média climatológica de 1981 até 2010. Por outro lado, o mês de abril de 2020 teve uma precipitação abaixo da média histórica, sendo 12,9 mm (mensurado) e 174,6 mm (média histórica). Além disso, no ano anterior, a precipitação para o mesmo mês foi de 158,2 mm. A diferença entre a média histórica e os valores mensurados também foi observada para o mês de janeiro de 2019 e 2020.

As futuras mudanças climáticas poderão alterar simultaneamente a temperatura e a precipitação, que, por sua vez, tem forte potencial para diminuir a produção da silvicultura, especialmente, o eucalipto (BINKLEY et al., 2017). Solokian et al. (2019) afirmam que a precipitação é aceita como insumo meteorológico mais influente em pesquisas hidrológicas e de qualidade da água.

Os eventos climáticos não apresentam as mesmas características a cada ano, podendo estar relacionados com os fenômenos climáticos popularmente conhecidos como *El Niño* e *La Niña*. Esses fenômenos são causados pelas temperaturas anômalas da superfície do Oceano Pacífico, que, por sua vez, alteram o padrão de chuvas para o estado do Rio Grande do Sul (BERLATO; FONTANA, 2003). Os autores, ainda, descrevem que o *El Niño* está relacionado ao aumento da precipitação (primavera e verão), enquanto o *La Niña* diminui a precipitação em todas as estações anuais. Ferreto et al. (2020), em seu estudo, na mesma área de pesquisa, evidenciou que o *El Niño* teve influência direta no aumento dos valores de precipitação nos meses de primavera e verão, nos dois primeiros anos (2014 e 2015). Logo, essa amplitude pode influenciar diretamente em variáveis hidrológicas para a área de estudo, como disponibilidade água no solo, evapotranspiração, escoamento subsuperficial e superficial, entre outros.

Figura 24 – Precipitação para a área de estudo.



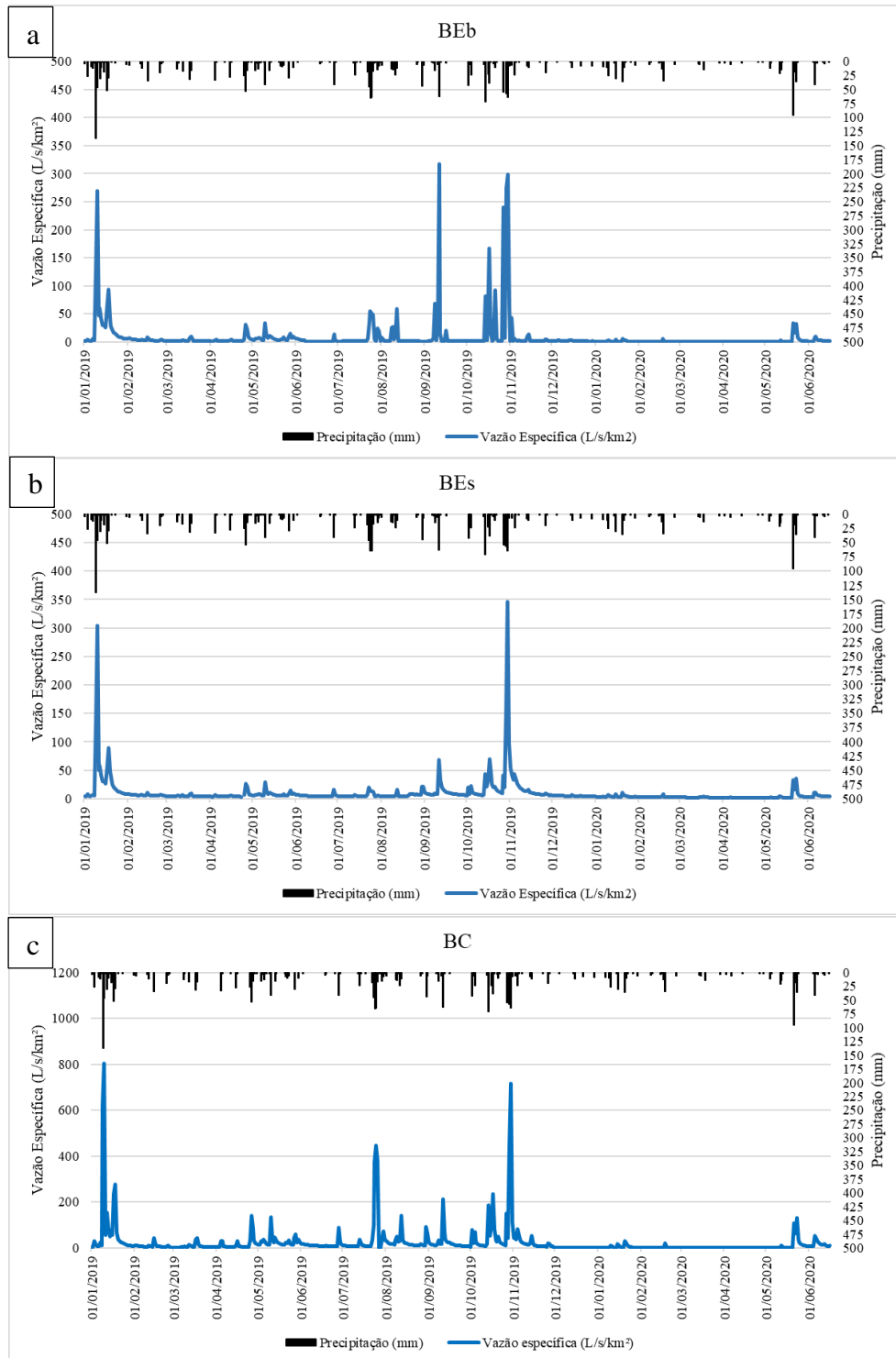
Fonte: Autoria própria.

*irga.rs.gov.br/medias-climatologicas

4.3.2 Vazão

Os dados de precipitação e vazão são variáveis do ciclo hidrológico extremamente importantes para identificar as entradas e saídas de água em uma bacia hidrográfica. Nos picos de precipitação, houve um grande aumento na vazão do curso de água para a Bacia de Campo (Figura 25c). Os meses de janeiro, julho e novembro de 2019 apresentaram os maiores picos de vazão.

Figura 25 – Vazão x precipitação para o período de estudo.



Fonte: Autoria própria.

Os picos de vazão para as bacias hidrográficas florestadas (BEB e BEs) são menores em comparação à bacia hidrográfica de campo (BC), em função da precipitação (Figuras 25a e 25b). Essa diferença pode estar relacionada à interceptação da chuva pela copa das árvores.

Além da relação interceptação x vazão, Reichert et al. (2017) salientam que o cultivo de eucalipto pode proporcionar melhores condições estruturais do solo, maior permeabilidade e capacidade de retenção de água do solo, o que, por sua vez, reduz a degradação do solo causada pela erosão e aumenta a disponibilidade hídrica em períodos de estiagem. Ebling et al. (2020), em estudo comparativo entre a BC e BEs, encontraram uma superioridade de seis vezes na vazão máxima entre as bacias hidrográficas, respectivamente.

A bacia hidrográfica ocupada por campo manejado e degradado, em função da sua própria cobertura, apresenta um acréscimo na vazão, em comparação às demais áreas de estudo; além disso, a resposta após eventos pluviométricos é imediata, isso foi observado por meio interpretação dos dados representados na Figura 25c. Na BC, no dia 10/01/2019, houve uma superioridade de 501,28 L/s/km² para a BEs e 269,26 L/s/km² para a BEb. Ademais, as bacias hidrográficas florestadas proporcionam melhorias nas características físicas do solo, como citado anteriormente (REICHERT et al., 2017), e tem-se um decréscimo na vazão, pois ocorre mais infiltração do que escoamento superficial.

Além da diferença no regime hídrico (vazão) entre as BHs, segundo Rodrigues et al. (2018), a BC proporciona maior fluxo de sedimentos para a rede de drenagem em comparação a BEb, indicando assim que há necessidade do emprego de esforços adicionais para reduzir ainda mais a erosão do solo nessas áreas. Dessa forma, os autores afirmam que deve ocorrer uma introdução de um manejo melhorado para as pastagens.

4.3.3 Níveis da água subterrânea

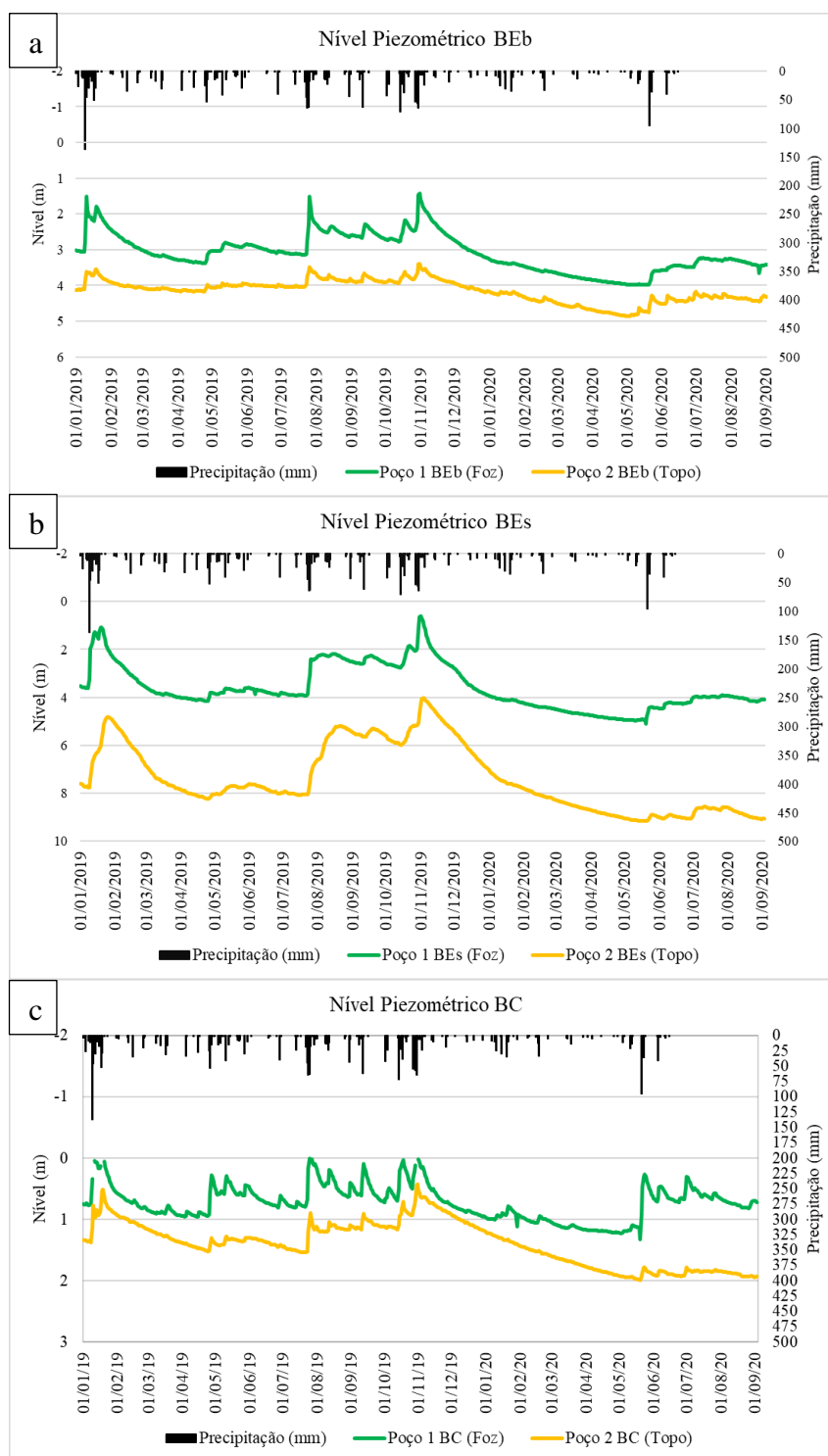
Na BEb houve um comportamento homogêneo no nível piezométrico nos dois poços (Figura 26a). Nos 11 primeiros meses de 2019, não ocorreram grandes períodos de estiagem e, durante chuvas intensas, os poços apresentaram alguns picos no nível da água, o que não ocorreu durante o ano de 2020 quando o volume de chuvas foi menor. Os divisores de água superficial e subterrânea das áreas de estudo são semelhantes indicando o mesmo fluxo de drenagem (KIANG; OLIVA; BARRERA, 2008).

Nas BEs, percebe-se um comportamento homogêneo do nível piezométrico (Figura 26b), destacando que, em áreas florestadas, a infiltração de água no solo e a interceptação das copas das árvores são fatores que interferem na diminuição do fluxo de água pelo escoamento superficial e posterior acúmulo desse volume de água na foz da bacia hidrográfica. Reichert et al. (2017), em estudos realizados na mesma área de durante os anos de 2013 e 2014, salientaram

que a recarga do aquífero foi maior durante os meses de maior precipitação, assim como Oh et al. (2020) em sua área de estudo.

O nível piezométrico nos poços localizados no topo e na foz da bacia de campo apresentaram flutuações semelhantes entre si (Figura 26c); sendo que, esse processo ocorre em função de eventos de precipitação e características físicas do solo. Contudo, na foz houve alguns picos maiores em virtude de fluxo superficial e subsuperficial das águas após os eventos de chuva serem na direção da foz. Banks et al. (2020) afirmam que o monitoramento da flutuação do nível da água subterrânea é extremamente importante para estimar a recarga do aquífero. A recarga é um parâmetro essencial para o conhecimento da hidrogeologia local e a utilização do solo para determinado uso de forma sustentável.

Figura 26 – Nível dos poços nas bacias hidrográficas.



Fonte: Autoria própria.

4.4 ESTIMATIVA DA RECARGA SUBTERRÂNEA

Na Tabela 6, observam-se os valores estimados de recarga na BEb nos 197 dias (diferença de dias entre a primeira e segunda coleta de dados geofísicos) antecedentes a cada coleta realizada, sendo de 06/05/2019 até 19/11/2019 (primeiro período) e 20/11/2019 até 04/06/2020 (segundo período). Ademais, pode ser constatada a estimativa da recarga durante todo o período de monitoramento hidrológico, que corresponde a 520 dias, do dia 01/01/2019 até a data do segundo levantamento geofísico realizado no dia 04/06/2020, sendo de 3,85 mm/dia.

A recarga para os 197 dias que antecederam o primeiro período (Tabela 6) foi estimada para o PZ1 na foz da BEb em 6,68 mm/dia (R), com uma mudança na altura do lençol freático (Δh) de 6,62 m. No PZ2 localizado no topo da BEb, foi estimada uma recarga de 3,14 mm/dia e o Δh em 3,02 m. Portanto, ocorreu uma maior recarga na foz do que no topo da bacia, devido às características de fluxo superficial, subsuperficial e de base na direção da foz.

No segundo período, a estimativa de recarga foi menor que no primeiro campo para os dois piezômetros, sendo de 0,60 e 2,07 mm de elevação/dia e Δh de 0,58 m e 1,98 m respectivamente para o PZ1 e PZ2 na BEb. Essa discrepância pode estar relacionada com os valores de precipitação para o cada período.

Tabela 6 – Recarga dos piezômetros PZ1 e PZ2 da BEb.

PZ1BEb (Foz)					PZ2BEb (Topo)				
01/01/2019 a 04/06/2020					01/01/2019 a 04/06/2020				
ΔH (m)	Dias	Sy (%)	m de elevação/dia	mm de elevação/dia	ΔH (m)	Dias	Sy (%)	m de elevação/dia	mm de elevação/dia
9,76	520	20,5	0,00385	3,85	6,65	520	20,5	0,00262	2,62
06/05/2019 a 19/11/2019 (197 dias)					06/05/2019 a 19/11/2019 (197 dias)				
ΔH (m)	Dias	Sy (%)	m de elevação/dia	mm de elevação/dia	ΔH (m)	Dias	Sy (%)	m de elevação/dia	mm de elevação/dia
6,42	197	20,5	0,006677	6,68	3,02	197	20,5	0,00314	3,14
20/11/2019 a 04/06/2020 (197 dias)					20/11/2019 a 04/06/2020 (197 dias)				
ΔH (m)	Dias	Sy (%)	m de elevação/dia	mm de elevação/dia	ΔH (m)	Dias	Sy (%)	m de elevação/dia	mm de elevação/dia
0,58	197	20,5	0,00060	0,60	1,98	197	20,5	0,00207	2,07

Fonte: Autoria própria.

A recarga para os 197 dias antes do primeiro ensaio da TRE para a BEs, no PZ1 foi de 6,16 mm/dia e para os dias que antecederam o segundo campo, foi de 1,21 mm de elevação/dia e um Δh de 5,92 e 1,16 m, respectivamente (Tabela 7). Como já mencionado anteriormente,

essa diferença de recarga entre os campos está relacionada às entradas de água na forma de precipitação e, possivelmente, às saídas de água na forma de evapotranspiração e vazão.

O PZ2 na BEs, nos 197 dias que antecederam a primeira coleta de dados da TRE, apresentou uma estimativa de recarga de 7,12 mm/dia e, para os dias que antecederam o segundo período, de 0,4 mm/dia e uma amplitude entre os níveis da água de 6,84 e 0,39 anteriores aos ensaios geofísicos, respectivamente (Tabela 7). Para os dois piezômetros, durante os 197 dias que antecederam o primeiro período, a recarga foi maior do que os 197 dias que antecederam o segundo período.

Tabela 7 – Recarga dos piezômetros PZ1 e PZ2 da BEs.

PZ1BEs (Foz)					PZ2BEs (Topo)				
01/01/2019 a 04/06/2020					01/01/2019 a 04/06/2020				
ΔH (m)	Dias	Sy (%)	m de elevação/dia	mm de elevação/dia	ΔH (m)	Dias	Sy (%)	m de elevação/dia	mm de elevação/dia
11,37	520	20,5	0,00448	4,48	10,62	520	20,5	0,00419	4,19
06/05/2019 a 19/11/2019 (197 dias)					06/05/2019 a 19/11/2019 (197 dias)				
ΔH (m)	Dias	Sy (%)	m de elevação/dia	mm de elevação/dia	ΔH (m)	Dias	Sy (%)	m de elevação/dia	mm de elevação/dia
5,92	197	20,5	0,00616	6,16	6,84	197	20,5	0,00712	7,12
20/11/2019 a 04/06/2020 (197 dias)					20/11/2019 a 04/06/2020 (197 dias)				
ΔH (m)	Dias	Sy (%)	m de elevação/dia	mm de elevação/dia	ΔH (m)	Dias	Sy (%)	m de elevação/dia	mm de elevação/dia
1,16	197	20,5	0,00121	1,21	0,39	197	20,5	0,000401	0,40

Fonte: Autoria própria.

O PZ1 da BC apresentou uma diminuição da recarga dos 197 dias anteriores ao primeiro campo em relação aos 197 dias que antecederam o segundo campo, sendo estimada em 4,03 e 1,67 mm/dia respectivamente e um Δh de 5,71 e 2,23 m, respectivamente (Tabela 8). No PZ2 da BC localizado no topo da bacia hidrográfica, a recarga foi menor durante o segundo período, sendo estimada em 0,31 mm/dia, e 2,27 mm/dia para os 197 dias que antecederam o primeiro, a variação do nível da água durante esses períodos foi de 3,22 m para o primeiro período e 0,44 m para o segundo campo (Tabela 8).

Assim, para os dois piezômetros, a estimativa da recarga foi maior durante o período que antecedeu o primeiro período em relação aos dias anteriores do segundo período. Para as três bacias hidrográficas estudadas, houve comportamento semelhante em relação à estimativa de recarga para durante os 197 dias que antecederam os ensaios geofísicos, o que pode estar

condicionado às entradas de água no sistema na forma de precipitação e percolação da água para o meio subterrâneo.

Tabela 8 – Recarga dos piezômetros PZ1 e PZ2 da BC.

PZ1BC (Foz)					PZ2BC (Topo)				
01/01/2019 a 04/06/2020					01/01/2019 a 04/06/2020				
ΔH (m)	Dias	Sy (%)	m de elevação/dia	mm de elevação/dia	ΔH (m)	Dias	Sy (%)	m de elevação/dia	mm de elevação/dia
11,17	520	13,9	0,00299	2,99	5,46	520	13,9	0,00146	1,46
06/05/2019 a 19/11/2019 (197 dias)					06/05/2019 a 19/11/2019 (197 dias)				
5,71	197	13,9	0,00403	4,03	3,22	197	13,9	0,00227	2,27
20/11/2019 a 04/06/2020 (197 dias)					20/11/2019 a 04/06/2020 (197 dias)				
2,23	197	13,9	0,00167	1,67	0,44	197	13,9	0,00031	0,31

Fonte: Autoria própria.

Além disso, os valores superiores de recarga (em todos os poços das três BHs) da primeira coleta de dados geofísicos em relação à segunda coleta estão diretamente relacionados com a precipitação. Valores de pluviosidade foram de 1.098,5 mm para 197 dias, antes do primeiro período; e 478,5 mm para 197 dias, antes do segundo período. Essa interação entre a precipitação e a recarga também foi encontrada e demonstrada por Baumhardt (2014). De acordo com os autores Krishnaswamy et al. (2013), a recarga da água subterrânea em estações chuvosas é maior em área ocupada por floresta de eucalipto do que em ecossistemas possivelmente degradados. Os autores, ainda, citam que, em áreas ocupadas por floresta, durante os períodos de estiagem, as árvores utilizam águas subterrâneas mais profundas para atender as demandas fisiológicas da transpiração. Além disso, o sistema aquífero está conectado às águas superficiais, quando em períodos de estiagem o rio recarrega as águas subterrâneas e, durante as cheias ocorre o processo inverso (YENEHUN et al., 2020).

Esses autores citam que a flutuação do nível da água em aquíferos vulcânicos profundos é oriunda da mudança de armazenamento da água no aquífero aluvial raso sobreposto. Diante disso, florestas de eucalipto utilizam as águas disponíveis no aquífero aluvial, em que a sua flutuação ocorrerá imediatamente após eventos de precipitação e períodos de estiagem. Hung Vu e Merkel (2019) mencionam que a mudança no uso do solo influencia diretamente a recarga

da água subterrânea, pois áreas onde a superfície torna-se impermeável ou pouco permeável diminuem o potencial de recarga.

Em seu estudo, Souza et al. (2019) afirmam que as taxas de recarga da água subterrânea relacionam-se, diretamente, com a precipitação. Além disso, para os autores, a percolação da água no solo e a recarga dos recursos hídricos subterrâneos são favorecidos pela combinação entre uma maior altitude e precipitação, temperatura mais baixa e uma densidade maior da vegetação. Yenehun et al. (2020) utilizaram o método WTF e WetSpass para estimar a recarga, obtendo resultados satisfatórios, Hung Vu e Merkel (2019) dizem que o método WTF é um método confiável para estimar a recarga do aquífero. Ainda, os autores Yenehun et al. (2020) citam que a alta quantidade de recarga obtida em seus estudos deve-se à contribuição significativa da água subterrânea por fluxo lateral e por meio das fraturas das rochas.

4.5 BALANÇO HÍDRICO

4.5.1 Balanço hídrico em escala de bacia hidrográfica

Na Tabela 9, constam os dados de precipitação (P), vazão (Q), interceptação (Int), evaporação do solo e transpiração vegetal (E_{ta}), para os 197 dias que antecederam a execução dos ensaios geofísicos, sendo de 06/05/2019 até 19/11/2019 (primeiro período) e 20/11/2019 até 04/06/2020 (segundo período). Assim, é possível identificar maiores valores de E_{ta} na BEb e BEs, em que há o cultivo de espécies de eucalipto. Os valores encontrados (E_{ta}), para o primeiro período, foram de 624,3 mm (BEb) e 512,5 mm (BEs). Cabe destacar que a P mensurada para esse período, foi de 1.098,0 mm, para as três bacias hidrográficas.

Na BC, onde a ocupação do solo é para a pecuária, a E_{ta} é menor que nas áreas de cultivo florestal, sendo de 299,5 mm nos 197 dias que antecederam o primeiro campo (Tabela 9). Essa diferença pode estar associada à demanda hídrica necessária para o desenvolvimento do eucalipto. Ainda no primeiro período analisado, conforme Tabela 9, os valores identificados para Int foram de 248,4 mm, 356,1 mm e 149,4 mm para a BEb, BEs e BC, respectivamente. Os valores obtidos para Q foram de 225,8 mm, 229,8 mm e 649,6 mm, inferindo uma maior Q para a BC e uma maior Int nas áreas de cultivo do eucalipto, essa discrepância nos valores pode estar correlacionada ao uso do solo.

No segundo período, a P obtida foi de 478,5 mm, e E_{ta} de 347,6 mm para a BEb, de 258,5 mm para BEs, 328,7 mm para a BC; assim, essa variação pode estar associada a falhas no registro dos dados por parte dos sensores. Além disso, cabe salientar que o eucalipto reduz

a condutância estomática em épocas de seca (TATAGIBA et al., 2007), que, por sua vez, facilita a adaptação e desenvolvimento da espécie quando ocorre de déficit hídrico. Ainda na Tabela 9, observa-se que a Int nas culturas de eucalipto é maior que na BC, sendo de 108,3 e 153,4 mm para a BEb e BEs, respectivamente, e 65,1 para a BC, ambos os resultados obtidos anterior ao segundo campo. Assim, a Q para a BC foi maior que nas áreas com plantios florestal, sendo de 84,7 mm para a BC e 22,7 e 66,6 mm para a BEb e BEs.

Nos períodos que antecederam a aplicação da TRE, a vazão foi maior na BC, já a interceptação foi maior para a BEs, BEb e BC, respectivamente. A evapotranspiração da BC, no segundo período, mostrou-se superior em relação a BEs e inferior a BEb, associando essa diferença com a interceptação do dossel da BEs, reduzindo a quantidade de água que chegaria até o solo. No período que antecedeu o primeiro ensaio geofísico, a precipitação foi maior do que no período que antecedeu o segundo campo.

Tabela 9 – Balanço hídrico para os períodos antecedentes aos ensaios geofísicos (197 dias cada): precipitação (P); vazão (Q); interceptação (Int); evaporação do solo e transpiração vegetal (ETa); % em relação ao valor da P.

BEb							
Período	P (mm)	Q (mm)	%	Int (mm)	%	ETa (mm)	%
06/05/2019 - 19/11/2019 (197 dias)	1.098,5	225,8	20,6	248,4	22,6	624,3	56,8
20/11/2019 - 04/06/2020 (197 dias)	478,5	22,7*	4,7	108,3	22,6	347,5	72,6
BEs							
Período	P (mm)	Q (mm)	%	Int (mm)	%	ETa (mm)	%
06/05/2019 - 19/11/2019 (197 dias)	1.098,5	229,8**	20,9	356,1	32,4	512,6	46,7
20/11/2019 - 04/06/2020 (197 dias)	478,5	66,6	13,9	154,9	32,4	257,0	53,7
BC							
Período	P (mm)	Q (mm)	%	Int (mm)	%	ETa (mm)	%
06/05/2019 - 19/11/2019 (197 dias)	1.098,5	649,6***	59,1	149,4	13,6	299,5	27,3
20/11/2019 - 04/06/2020 (197 dias)	478,5	84,7***	17,7	65,1	13,6	328,7	68,7

Fonte: Autoria própria.

*Valores estimados para 11/07/2019 até 04/12/2019; **Valores estimados para 23/07/2019 até 20/08/2019;

***Valores estimados para 26/07/2019 até 29/07/2019 e 30/11/2019 até 19/12/2019.

4.5.2 Balanço hídrico no perfil do solo

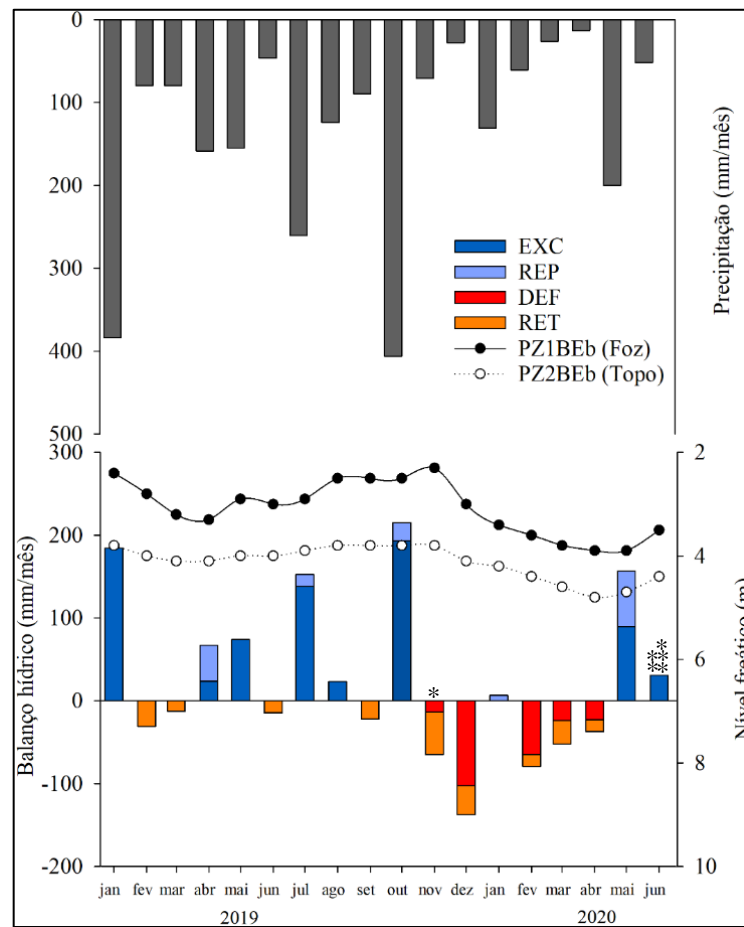
Nas Figuras 27, 28 e 29, observa-se o balanço hídrico sequencial adaptado de Thornthwaite and Mather (1955) para a BEb, BEs e BC. Foram mensurados o excedente de água depois de atendida a demanda evapotranspirativa (EXC), a reposição do armazenamento

de água dentro da zona das raízes (REP), demanda evapotranspirativa da vegetação não suprida devido ao déficit hídrico (DEF) e a retirada de água armazenada no perfil do solo disponível às plantas (RET).

Pode-se inferir, com base nas Figuras 27, 28 e 29, que, no período de janeiro de 2019 até junho de 2020, na BC ocorreu um maior excedente hídrico do que nas bacias hidrográficas florestadas. Durante esse intervalo, apenas nos meses de dezembro de 2019, março e abril de 2020 não ocorreu EXC para a BC. Na Figura 29, nota-se que a REP ocorreu apenas durante os meses de janeiro, fevereiro e maio de 2020. O DEF seguido de RET foi constatado apenas nos meses de dezembro de 2019 e março e abril de 2020.

Para as bacias hidrográficas ocupadas por eucalipto, na BEb (Figura 27) ocorreu um EXC nos meses de janeiro, abril, maio, julho agosto e outubro de 2019 e apenas em maio e junho de 2020. Ainda na Figura 27 verifica-se um DEF para os meses de novembro e dezembro de 2019 e fevereiro, março e abril de 2020, seguido de RET durante os meses respectivamente mencionados, além dos meses de fevereiro, março, junho e setembro de 2019. Na BEs conforme a Figura 28, o EXC durante os meses de janeiro, abril, maio, julho, agosto e outubro de 2019 e maio e junho de 2020, com REP durante os meses de janeiro, fevereiro e maio de 2020. Para o DEF na BEs (Figura 28), os meses de novembro e dezembro de 2019 e março e abril de 2020, exigindo RET para o desenvolvimento das plantas.

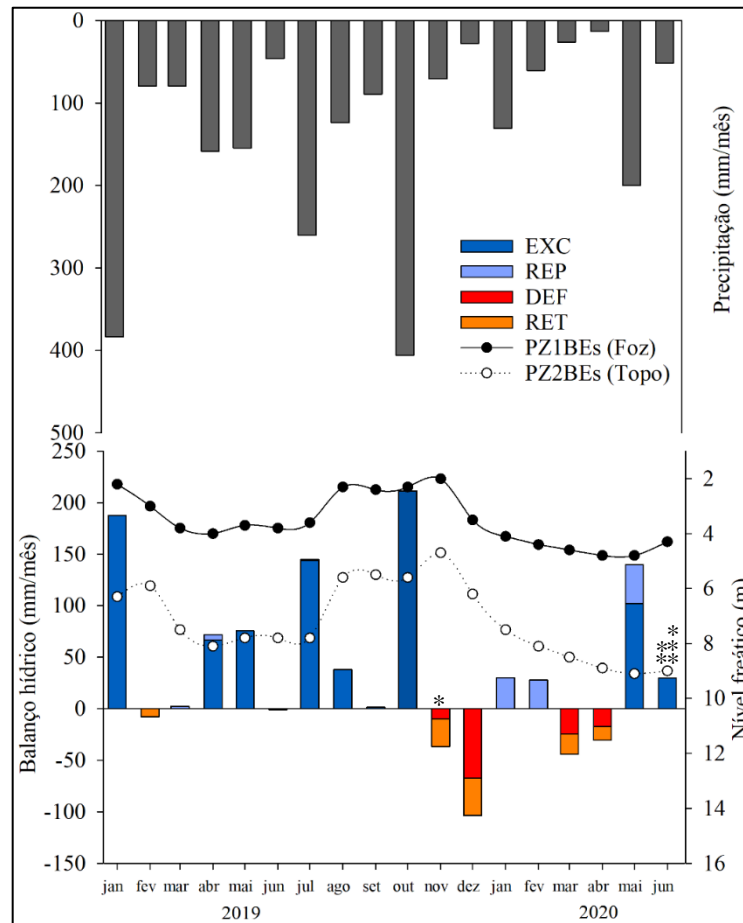
Figura 27 – Balanço hídrico sequencial adaptado de Thornthwaite and Mather (1955) e nível dos poços de monitoramento para a BEb.



Fonte: Autoria própria.

*Primeiro ensaio geofísico em 19/11/2019; **Segundo ensaio em geofísico em 04/06/2020; ***Dados utilizados até 15/06/2020.

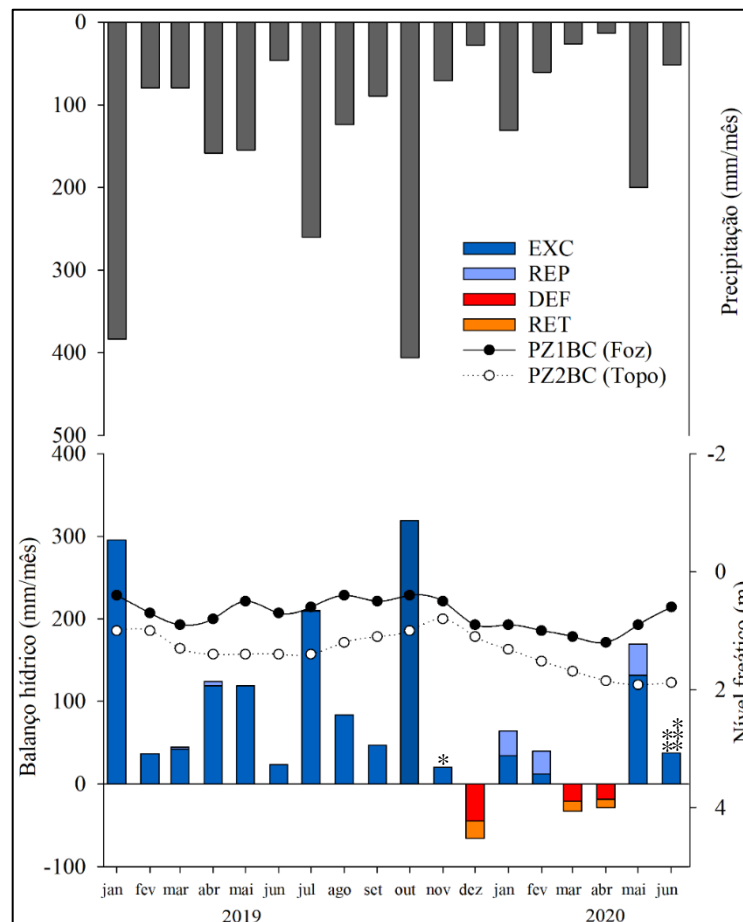
Figura 28 – Balanço hídrico sequencial adaptado de Thornthwaite and Mather (1955) e nível dos poços de monitoramento para a BEs.



Fonte: Autoria própria.

*Primeiro ensaio geofísico em 19/11/2019; **Segundo ensaio em geofísico em 04/06/2020; ***Dados utilizados até 15/06/2020.

Figura 29 – Balanço hídrico sequencial adaptado de Thornthwaite and Mather (1955) e nível dos poços de monitoramento para a BC.



Fonte: Autoria própria.

*Primeiro ensaio geofísico em 19/11/2019; **Segundo ensaio em geofísico em 04/06/2020; ***Dados utilizados até 15/06/2020.

Durante eventos de maior precipitação, o excedente hídrico aumentou para as três BHs estudadas; entretanto, na BC verifica-se um EXC maior que nas BHs ocupadas por eucalipto (Figuras 27, 28 e 29). Essas características ocorrem, pois o consumo hídrico por parte do eucalipto é maior em comparação ao de uma área de pastejo. Os déficits hídricos ocorreram nos meses de menor precipitação, resultando em maior retirada de água disponível para as plantas para as áreas ocupadas por eucalipto. Assim, constatou-se que o eucalipto utiliza maior volume de água para o desenvolvimento da cultura do que gramíneas.

Silvicultores devem considerar o zoneamento climatológico de suas propriedades e estratégias para trabalhar com o balanço hídrico regional, e a variação interanual das precipitações para planejar práticas sustentáveis em relação ao consumo de água pelas florestas em relação ao volume de água que entra no sistema (FERRAZ et al., 2019). Na mesma área do presente estudo, Reichert et al. (2017) observaram em seus estudos, em dois anos consecutivos,

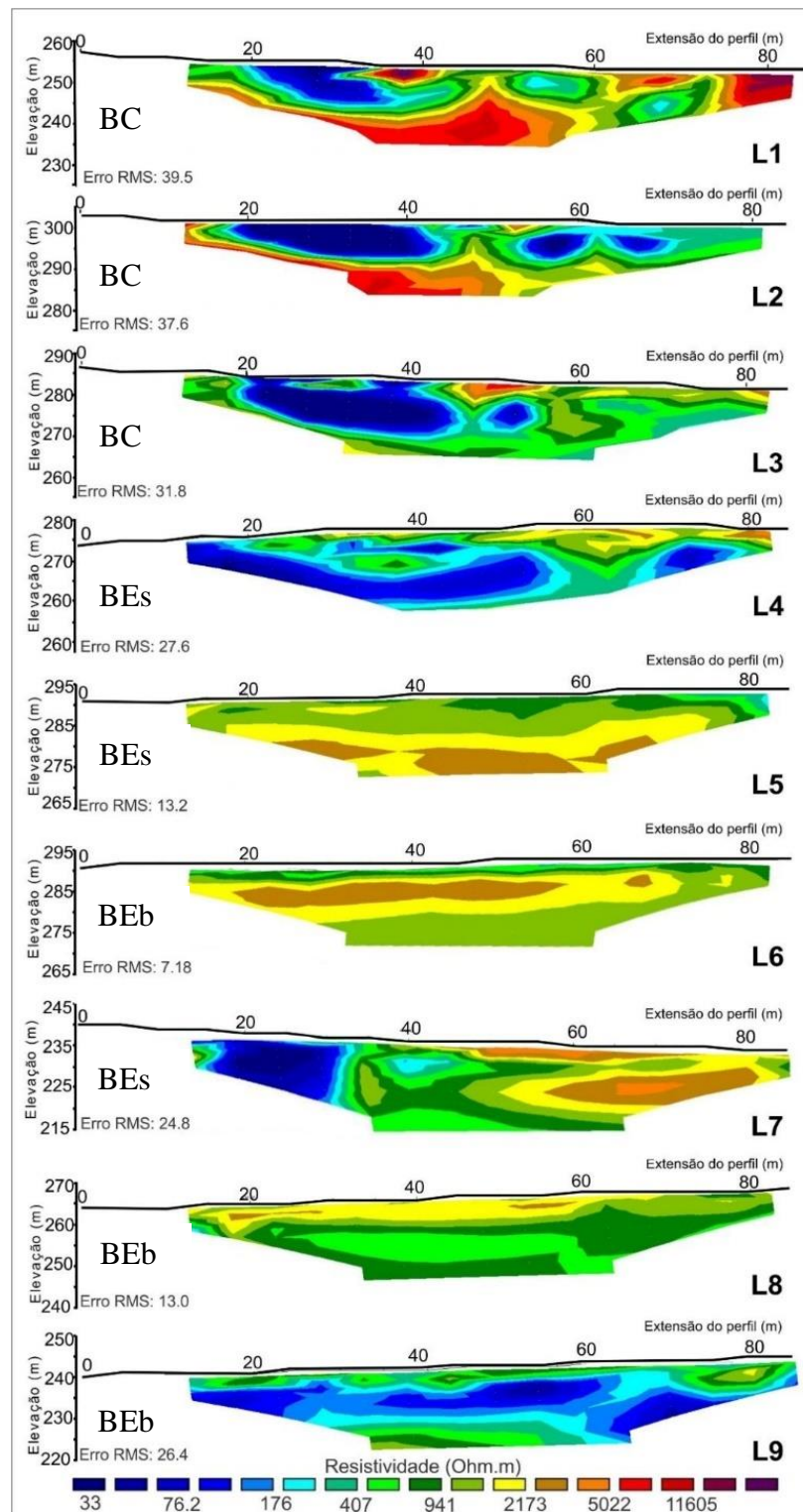
que a evapotranspiração nas bacias ocupadas por eucalipto é maior que na bacia sob uso de pastagem natural. Reichert et al. (2017) e Elli, Sentelhas e Bender (2020) salientam que, em temperaturas mais altas, a evapotranspiração aumenta, o que justifica o maior consumo de água pelas plantas. Assim, consoante Dresel et al. (2018), o aumento da evapotranspiração diminui o processo de recarga, e as plantas utilizam águas do subsolo para o seu desenvolvimento.

4.6 GEOFÍSICA APLICADA À CARACTERIZAÇÃO DA SUBSUPERFÍCIE

Na primeira fase de aquisição de dados, realizada no mês de novembro de 2019, foram adquiridos nove perfis (Figura 30). O erro RMS varia de 7,1 a 39,5% e a escala de cores varia de 33 a 11.605 Ohm/m. A segunda campanha geofísica foi conduzida no mês de junho de 2020 e o erro RMS variou de 5 a 34% (Figura 31). A diferença no erro pode ser resultante da bateria do equipamento no momento de obtenção dos dados e da qualidade da interpolação dos dados.

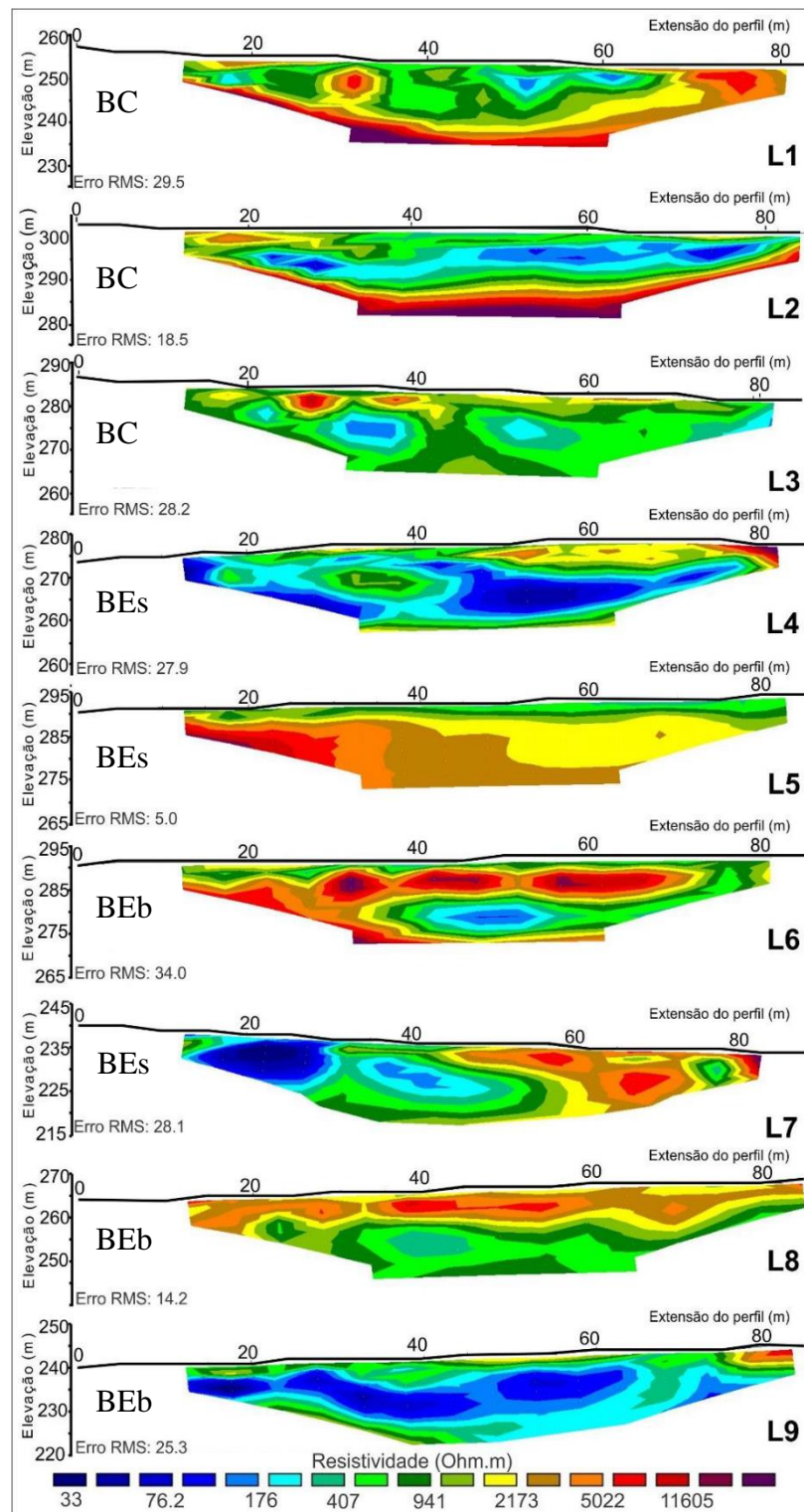
A maioria dos erros ocorre nas anomalias azuis (menores valores de resistividade). Dessa forma, essas anomalias podem ter influenciado diretamente a interpretações das seções. As seções que não apresentaram valores baixos de resistividade não apresentaram alto valor do erro RMS (Figuras 30 e 31), necessitando de menor suavização dos dados. Porém, para Loke (2019), o modelo com menor erro RMS às vezes mostra mudanças grandes e irreais no valor de resistividade do modelo, e pode nem sempre ser o melhor modelo do ponto de vista geológico. O autor, ainda, afirma que o método mais prudente é selecionar o modelo na interação, após o qual o erro RMS não muda significativamente. Isso pode ser o caso nas seções que não apresentaram valores baixos de resistividade.

Figura 30 – Seções de eletrorresistividade da campanha de campo em novembro de 2019.



Fonte: Autoria própria.

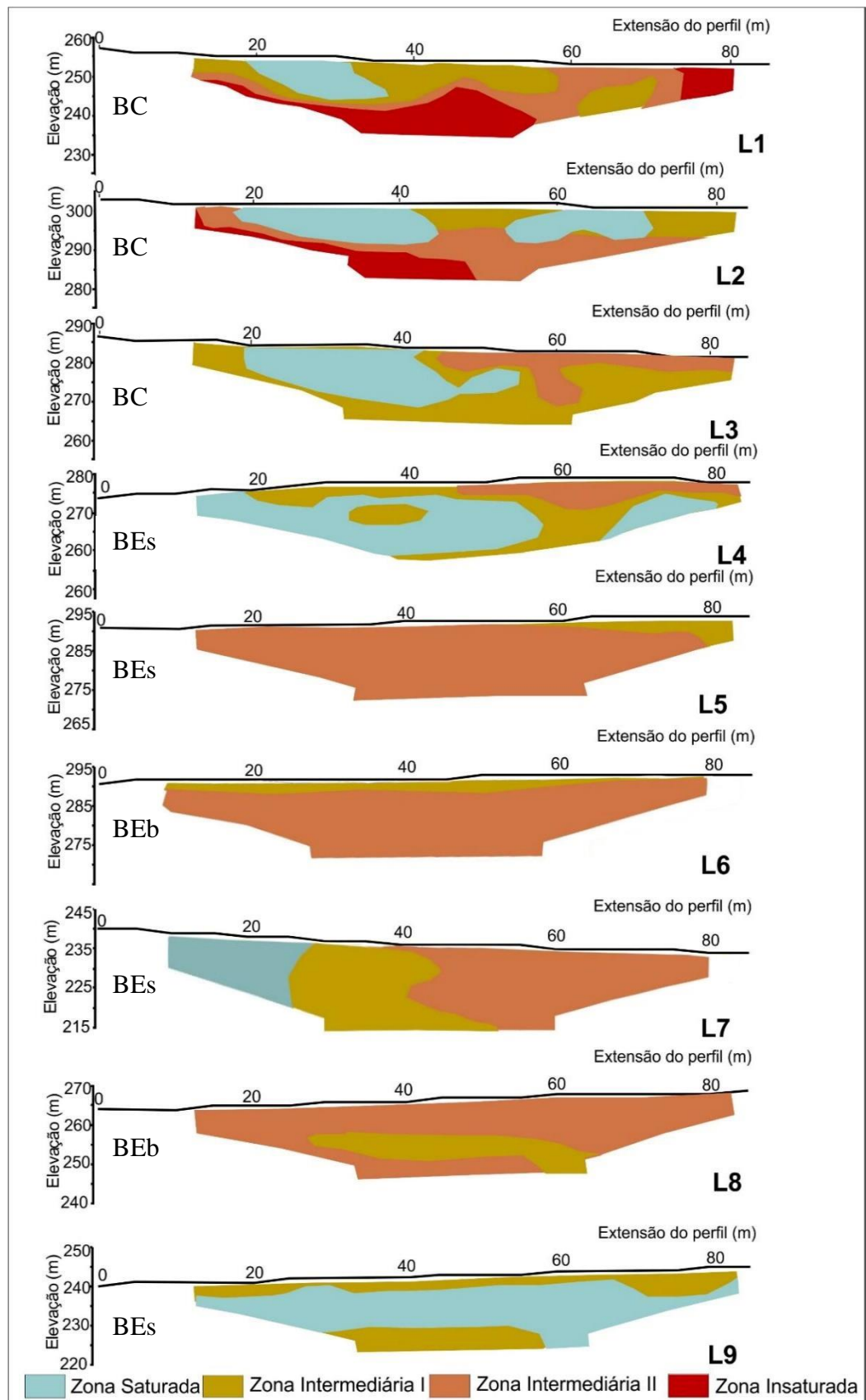
Figura 31 – Seções de eletrorresistividade da campanha de campo em junho de 2020.



Fonte: Autoria própria.

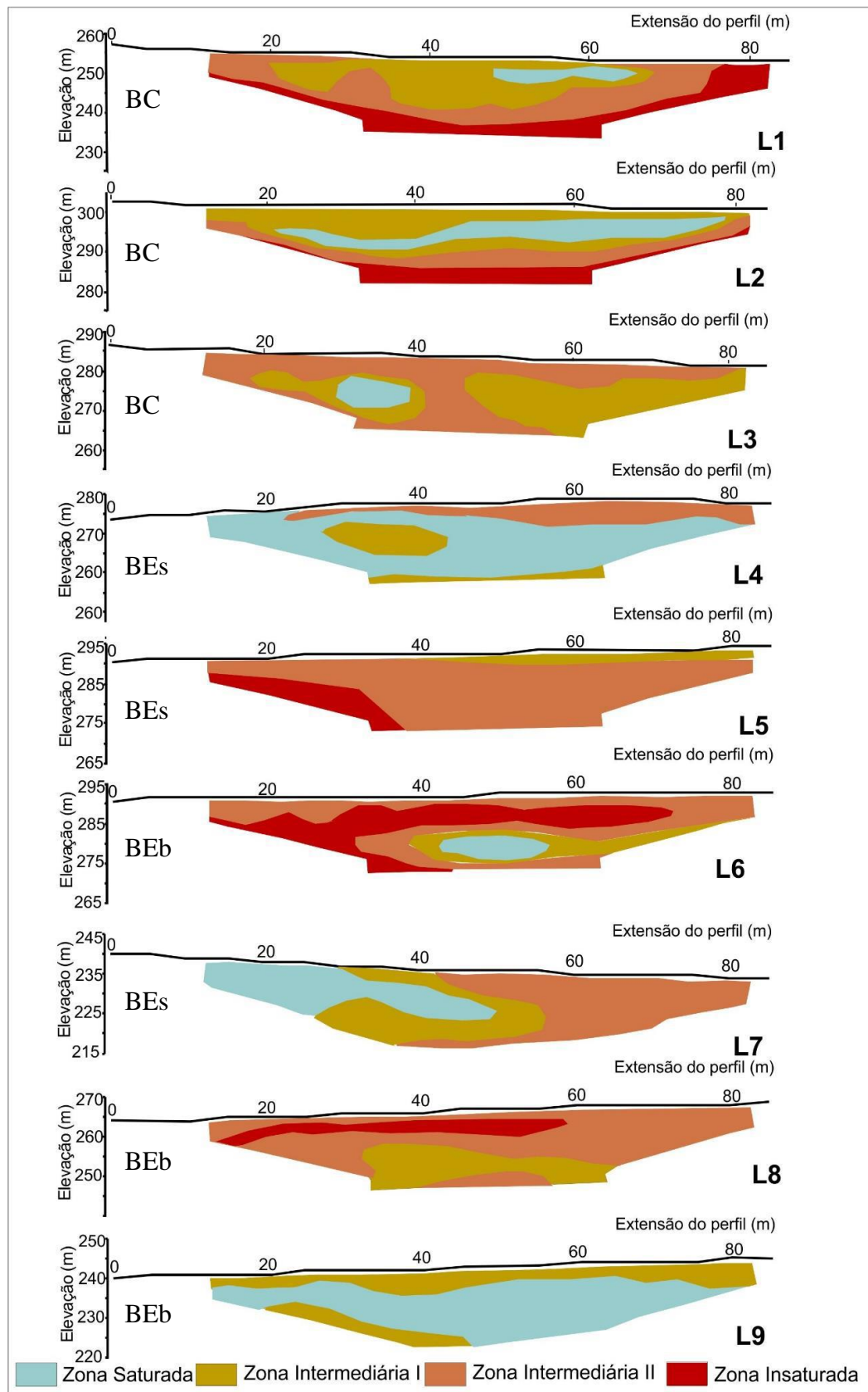
A interpretação dos perfis de eletroresistividade são apresentados a seguir nas Figuras 32 e 33. Com a quantificação das zonas por meio do *AutoCAD*[®] na Tabela 10.

Figura 32 – Seções interpretadas da campanha de campo realizada em novembro de 2019.



Fonte: Autoria própria.

Figura 33 – Seções interpretadas da campanha de campo realizada em junho de 2020.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 – Diferença entre os campos da Zona Saturada, Zona 1, Zona 2 e Zona Insaturada.

Primeiro ensaio (19/11/2019)		Segundo ensaio (04/06/2020)	
L1 (%) - BC		L1 (%) - BC	
Zona Saturada	12,69	Zona Saturada	5,33
Zona 1	29,45	Zona 1	32,97
Zona 2	28,27	Zona 2	37,41
Zona Insaturada	29,59	Zona Insaturada	24,28
L2 (%) - BC		L2 (%) - BC	
Zona Saturada	33,94	Zona Saturada	22,17
Zona 1	15,46	Zona 1	40,27
Zona 2	35,80	Zona 2	21,57
Zona Insaturada	14,80	Zona Insaturada	16,00
L3 (%) - BC		L3 (%) - BC	
Zona Saturada	33,79	Zona Saturada	5,74
Zona 1	47,50	Zona 1	40,31
Zona 2	18,71	Zona 2	53,94
Zona Insaturada	-	Zona Insaturada	-
L4 (%) - BEs		L4 (%) - BEs	
Zona Saturada	53,32	Zona Saturada	64,64
Zona 1	32,11	Zona 1	15,00
Zona 2	14,57	Zona 2	20,37
Zona Insaturada	-	Zona Insaturada	-
L5 (%) - BEs		L5 (%) - BEs	
Zona Saturada	-	Zona Saturada	-
Zona 1	6,80	Zona 1	9,61
Zona 2	93,20	Zona 2	77,53
Zona Insaturada	-	Zona Insaturada	12,86
L6 (%) - BEb		L6 (%) - BEb	
Zona Saturada	-	Zona Saturada	6,92
Zona 1	13,72	Zona 1	13,77
Zona 2	86,28	Zona 2	44,49
Zona Insaturada	-	Zona Insaturada	34,82
L7 (%) - BEs		L7 (%) - BEs	
Zona Saturada	18,45	Zona Saturada	29,49
Zona 1	33,73	Zona 1	26,94
Zona 2	47,82	Zona 2	43,57
Zona Insaturada	-	Zona Insaturada	-
L8 (%) - BEb		L8 (%) - BEb	
Zona Saturada	-	Zona Saturada	-
Zona 1	21,00	Zona 1	22,51
Zona 2	79,00	Zona 2	63,87
Zona Insaturada	-	Zona Insaturada	13,61
L9 (%) - BEb		L9 (%) - BEb	
Zona Saturada	64,73	Zona Saturada	63,56
Zona 1	35,27	Zona 1	36,44
Zona 2	-	Zona 2	-
Zona Insaturada	-	Zona Insaturada	-

Fonte: Autoria própria.

Comparativamente, as seções L4 e L7 apresentaram aumento da zona saturada em um intervalo de oito meses (Tabela 10). Essas feições e respectivas alterações nos limites e geometria são correlacionáveis com o balanço hídrico no perfil do solo (Figura 27 e 28). O mês de novembro de 2019 apresentou déficit hídrico na BEb (L4) e BEs (L7); assim, pode inferir-se que, devido ao DEF, a demanda hídrica do eucalipto seja maior, o que, por sua vez reduz, a quantidade de água no solo. Em junho de 2020, na BEb e BEs, conforme as Figuras 27 e 28, ocorreu excedente hídrico, correlacionando com maior quantidade de água no solo oriunda de eventos de precipitação. Na L9, as zonas foram semelhantes para os dois campos (Figura 36). Nas Linhas 1, 2 e 3, realizadas na BC, constatou-se uma redução na zona saturada do solo (Tabela 10). Tal fato pode estar relacionado ao período anterior ao primeiro ensaio da TRE (janeiro-outubro), pois não ocorreu déficit hídrico. No segundo período que antecedeu a coleta de dados geofísicos, os meses de março e abril apresentaram déficit hídrico, podendo relacionar-se com esse decréscimo.

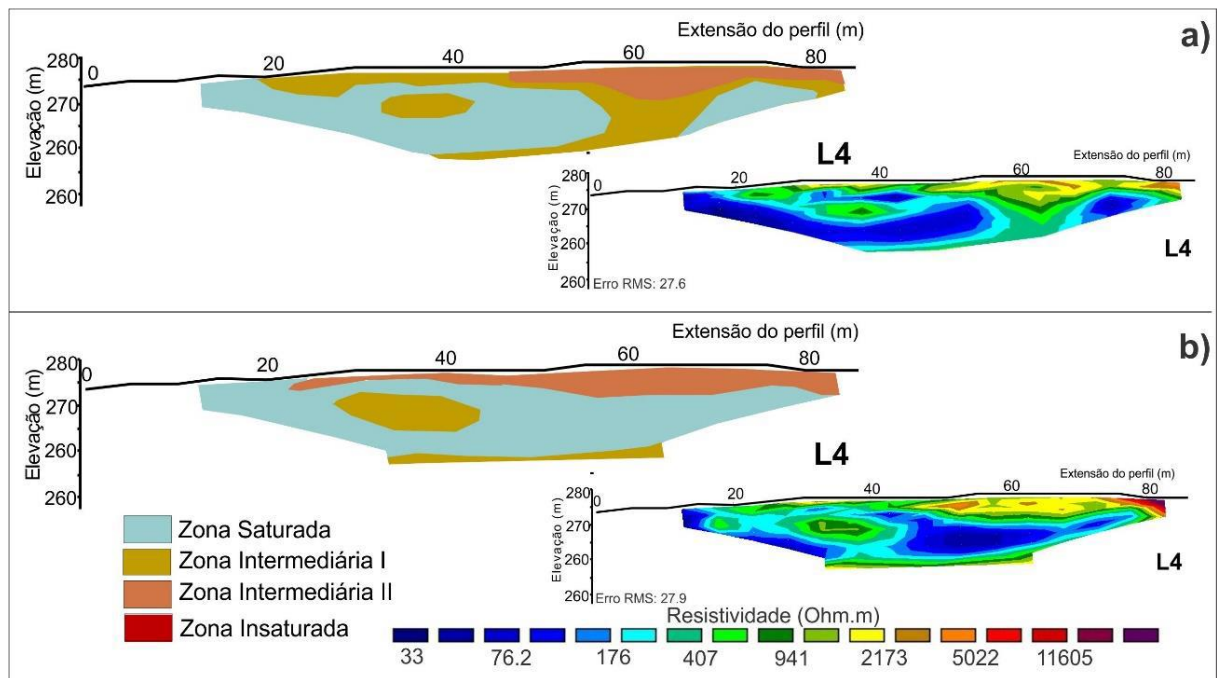
Assim, com os períodos de baixa precipitação, é possível notar, por meio das figuras dos níveis piezométricos (Figura 26c), que ocorreu um rebaixamento no nível do lençol freático, de novembro de 2019 até junho de 2020. Por mais que o mês de maio de 2020 tenha acumulado 199,9 mm de precipitação, esse acúmulo não foi suficiente para aumentar a zona saturada do solo, conforme a L1, L2 e L3 (Figura 32 e 33), devido à estiagem nos meses anteriores.

Conforme descrito por Ferreto et al. (2020) em seu estudo, na mesma área, nos meses de outono e inverno houve reposição de água no solo, devido ao menor crescimento das plantas, além do acréscimo no consumo de água pelas plantas nos meses de verão, período de maior crescimento vegetativo. Isso também foi observado por Almeida et al. (2007), quando, durante o verão, houve maior esgotamento hídrico do solo, o que foi associado a uma alta evapotranspiração causada pelos maiores déficits de pressão de vapor e radiação.

A absorção de água por parte das raízes está condicionada o potencial hídrico, uma vez que, este sendo mais negativo do que a solução presente no solo ocorre maior absorção, especialmente quando se tem maior área do sistema radicular (DOS REIS; REIS, 1997); tal fato, pode ter relação com a zona saturada na porção das raízes do eucalipto (Figuras 34 e 36). Logo, se a disponibilidade hídrica no meio não for o suficiente, as plantas passam por um déficit hídrico. Christina et al. (2017) afirmam que o eucalipto, após o fechamento do dossel, capta parte da água da franja capilar e, dessa forma, a zona saturada do solo atua como outra fonte de água, que por sua vez é preenchido nos dois primeiros anos após o corte raso da área e parcialmente utilizada depois do fechamento das copas das árvores. Porém, sabe-se das

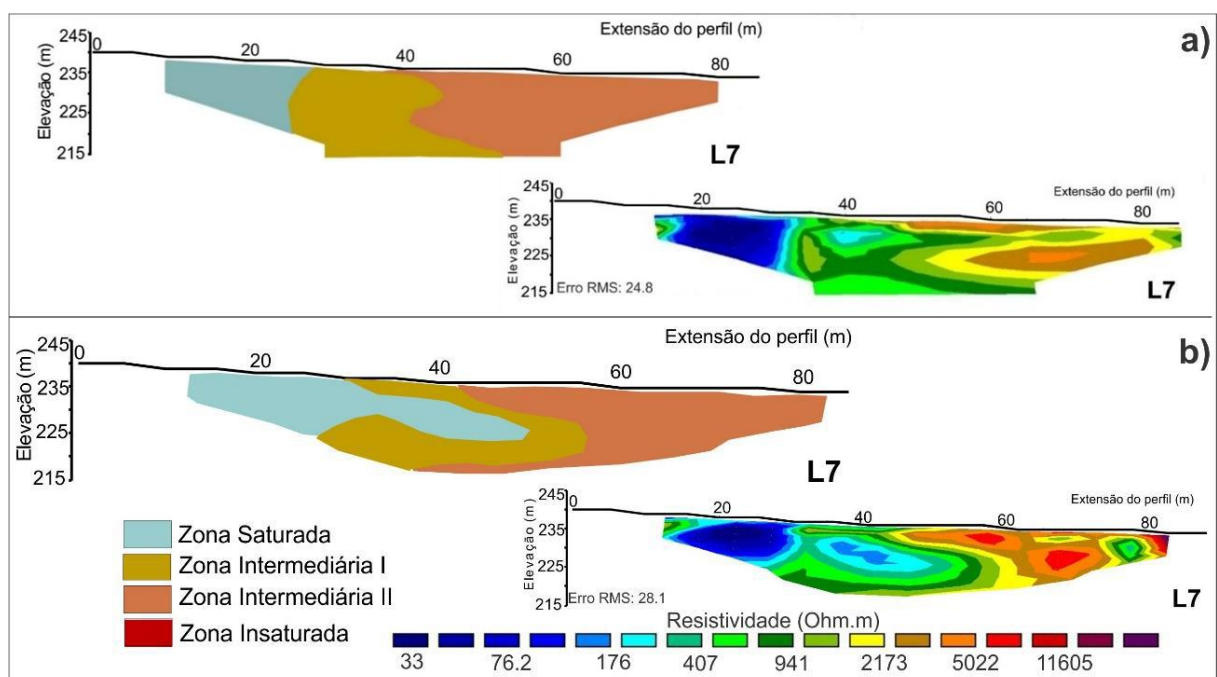
dificuldades dos estudos em hidrologia florestal, como a extrapolação das funções das plantas relacionadas às variáveis edafoclimáticas.

Figura 34 – a) Seção L4 executada em novembro de 2019; b) seção L4 executada em junho de 2020.



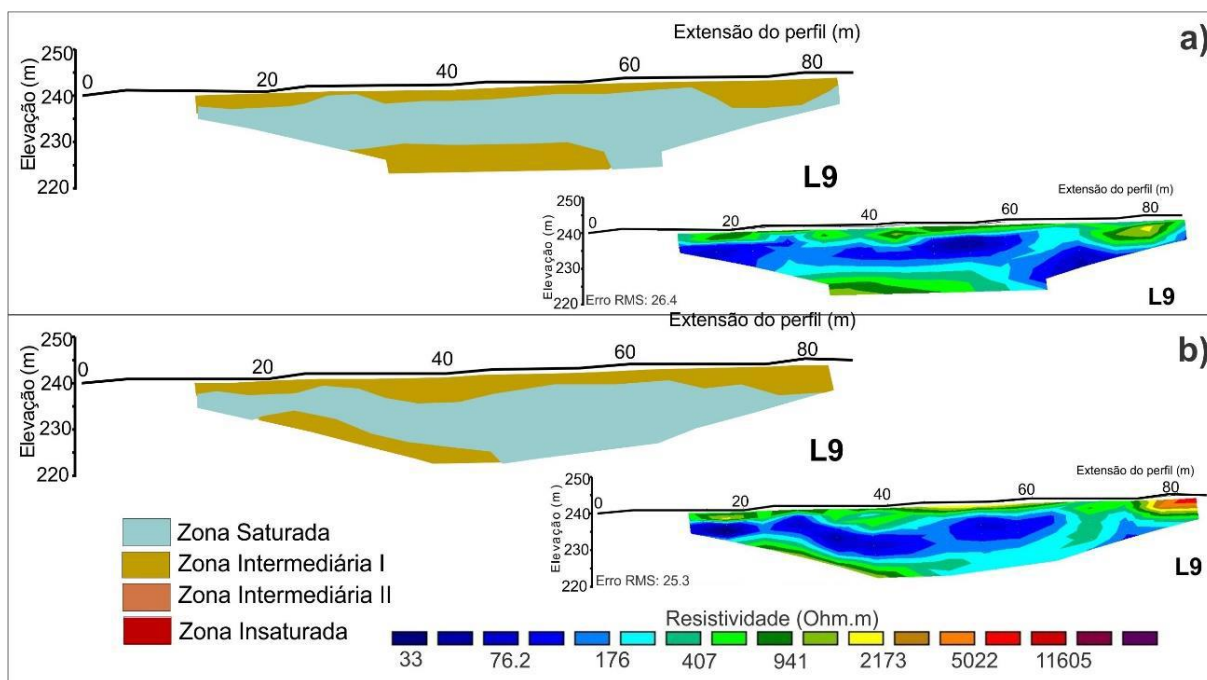
Fonte: Autoria própria.

Figura 35 – a) seção L7 executada em novembro de 2019; b) seção L7 executada em junho de 2020.



Fonte: Autoria própria.

Figura 36 – a) Seção L9 executada em novembro de 2019; b) seção L9 executada em junho de 2020.



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

A realização deste trabalho evidenciou que a aplicação do método geofísico constitui uma importante alternativa para obtenção de dados em áreas florestadas, permitindo a caracterização das diferentes geometrias do meio subterrâneo. Com isso, a caracterização da subsuperfície de médias e grandes profundidades é facilitada, diminuindo o tempo de obtenção dos dados e o custo de operação.

O monitoramento de variáveis hidrológicas e hidrogeológicas (vazão, precipitação, escoamento superficial, nível da água subterrânea) mostrou-se uma ferramenta importante, tornando possível conhecer os reais efeitos da atividade florestal em relação aos ecossistemas em que está inserida. Os volumes de precipitação, vazão dos rios e nível da água subterrânea são essenciais para manter o equilíbrio entre os recursos hídricos e a produção de eucalipto.

As variáveis hidrológicas de uma bacia hidrográfica de eucalipto diferem quando comparadas a uma bacia hidrográfica com campo manejado. Os plantios florestais potencializam a infiltração de água no perfil do solo o que, assim, resulta em um acréscimo na recarga dos recursos hídricos subterrâneos. A bacia hidrográfica com pastagem apresentou resposta quase imediata no deflúvio, devido à compactação do solo causada pelo pisoteio animal durante o pastejo. Isso pode acelerar os processos erosivos, em razão de maior escoamento superficial e menor infiltração e percolação de água no solo, facilitando a desagregação e o transporte de partículas do solo para a calha das redes de drenagem.

A resposta na variação do nível da água subterrânea após eventos de precipitação nas bacias hidrográficas florestadas em relação à bacia hidrográfica de campo manejado diferencia-se em consequência da interceptação e evapotranspiração. Esses processos estão condicionados à tipologia vegetal presente nessas áreas, em que parte da precipitação fica retida na copa das árvores, volume que não atinge o solo em função da evaporação, ocorrendo com maior intensidade para as bacias hidrográficas florestadas.

Por meio do balanço hídrico, identificou-se uma maior interceptação e evapotranspiração e menor vazão nas bacias hidrográficas florestadas em relação à bacia hidrográfica de campo manejado. Tal fato deve-se à interceptação da água causada pelas copas das árvores e maior demanda hídrica para o desenvolvimento do cultivo de eucalipto. O primeiro período antecedente aos ensaios geofísicos apresentou maior excedente hídrico, já o segundo período antecedente aos ensaios geofísicos apresentou maior quantidade de déficit hídrico. Cabe destacar que, o mês do primeiro ensaio geofísico exibiu déficit hídrico nas bacias

de eucalipto e o mês do segundo ensaio geofísico ocorreu excedente hídrico para todas as bacias hidrográficas.

Por mais que a demanda hídrica necessária para alcançar certa produtividade possa ser maior em comparação ao campo manejado, o emprego dessa espécie florestal permite um acréscimo na manutenção dos recursos hídricos. Uma vez que, é facilitada a percolação de água no solo, redução do escoamento superficial e de picos de vazão. Contudo, estudos envolvendo as mudanças hidrológicas com melhoria do campo degradado, bem como de longo prazo em bacias florestadas e de campo natural, são necessários.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15.935**: Investigações ambientais – Aplicação de métodos geofísicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 26p.
- ADHIKARI, R. K.; MOHANASUNDARAM, S.; SHRESTHA, S. Impacts of land-use changes on the groundwater recharge in the Ho Chi Minh city, Vietnam. **Environmental Research**, v. 185, p. 109440, 2020. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109440.
- ALIZADEHTAZI, B. et al. Comparison of Observed Infiltration Rates of Different Permeable Urban Surfaces Using a Cornell Sprinkle Infiltrometer. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 21, n. 7, p. 06016003, 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001374
- ALLEN, R. G. **Crop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- ALMEIDA, A. C. et al. Growth and water balance of Eucalyptus grandis hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. **Forest Ecology and Management**, v. 251, n. 1, p. 10-21, 2007. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.06.009
- ALVARES, C. A. et al. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- ALVES, M. C.; CABEDA, M. S. V. Infiltração de água em um podzólico vermelho-escuro sob dois métodos de preparo, usando chuva simulada com duas intensidades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 4, p. 753-761, 1999. DOI: 10.1590/S0100-06831999000400001
- ANDRADE, E. N. de; SAMPAIO, N. A. **O Eucalipto**. Jundiaí: [s.n.], 1961.
- BALBINOT, R. et al. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Ambiência**, v. 4, n. 1, p. 131–149, 2008.
- BANKS, E. W. et al. Environmental tracers to evaluate groundwater residence times and water quality risk in shallow unconfined aquifers in sub Saharan Africa. **Journal of Hydrology**, p. 125753, 2020. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125753
- BARRETO, C. E. A. G.; GOMES, L. H.; WENDLAND, E. Balanço hídrico em zona de afloramento do sistema aquífero guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16., 2010, São Luís. **Anais...** São Luís, MA: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2010. p. 1-22. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/assubterraneas/article/view/23177/15289>>. Acesso em: 20 mai. 2020.
- BASTOS, F. et al. Strategies for identifying pollution sources in a headwater catchment based on multi-scale water quality monitoring. **Environmental Monitoring and Assessment**, 2021. No prelo.

BAUMHARDT, E. **Hidrologia de bacia de cabeceira com eucaliptocultura e campo nativo na região da campanha gaúcha**. 2014. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. **El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul: aplicações de previsões climáticas na agricultura**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS Editora, 2003.

BINKLEY, D. et al. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, p. 271-283, 2017. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.09.050

BOLDRINI, I. I. **Bioma Pampa: diversidade florística e fisionômica**. Porto Alegre: Pallotti, 2010.

BORTOLOZO, C. A. **Inversão conjunta 1D de dados de SEV e TDEM: aplicações em hidrogeologia**. 2011. 113 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

BRAGA, M. G. **Métodos Geométricos Aplicados. Apostila do curso de Geologia**. São Paulo: Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP, 1999.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**. Brasília, Poder Executivo, Brasília, DF, 09 jan. 1997.

BROWN, C.; BALL, J. World view of plantation grown wood. **Oceania**, v. 2, 2000.

BURIOL, G. A. Balanço Hídrico. In: RIGHES, A. A.; BURIOL, G. A.; BOER, N. (org.). **Água e educação: princípios e estratégias de uso e conservação**. Santa Maria: Centro Universitário Franciscano, 2009. p. 109-136.

CABRAL, J. et al. Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. In: JOÃO BATISTA DIAS, P.; ELOIZA MARIA CAUDURO DIAS, P. (org.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2016. p. 237-275.

CÂMARA, C. D. **Critérios e indicadores para monitoramento hidrológico de florestas plantadas**. 2004. 190 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

CARDOSO FERRETO, D. O. et al. Rainfall partitioning in young clonal plantations Eucalyptus species in a subtropical environment, and implications for water and forest management. **International Soil and Water Conservation Research**, p. S2095633921000034, 2021. DOI: 10.1016/j.iswcr.2021.01.002

CARVALHO, H. de P. et al. Balanço hídrico climatológico, armazenamento efetivo da água no solo e transpiração na cultura de café. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 2, 2011.

CHAMBERS, J. E. et al. 4D electrical resistivity tomography monitoring of soil moisture dynamics in an operational railway embankment. **Near Surface Geophysics**, v. 12, n. 1, p. 61-72, 2014. DOI: 10.3997/1873-0604.2013002

CHANDRA, S. et al. Geophysical model of geological discontinuities in a granitic aquifer: Analyzing small scale variability of electrical resistivity for groundwater occurrences. **Journal of Applied Geophysics**, v. 71, n. 4, p. 137-148, 2010. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2010.06.003

CHENG, Q. et al. Water infiltration in a cracked soil considering effect of drying-wetting cycles. **Journal of Hydrology**, p. 125640, 2020. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125640

CHRISTINA, M. et al. Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. **Functional Ecology**, v. 31, n. 2, p. 509-519, 2017. DOI: 10.1111/1365-2435.12727

CLEARY, R. W. **Águas subterrâneas**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2007.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2006. Escala 1:750.000.

CROSBIE, R. S.; BINNING, P.; KALMA, J. D. A time series approach to inferring groundwater recharge using the water table fluctuation method. **Water Resources Research**, v. 41, n. 1, 2005. DOI: 10.1029/2004WR003077

CRUZ, R. C.; TAVARES, I. S. Bacia hidrográfica: Aspectos conceituais e práticos. *In*: RIGHEIS, A. A.; BURIOL, G. A.; BOER, N. (org.). **Água e educação: princípios e estratégias de uso e conservação**. Santa Maria: Centro Universitário Franciscano, 2009. p. 77-108.

DAVIDSON, J. **Setting Aside the Idea that Eucalypts are Always Bad**. Alemanhã: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985.

DE LIMA, O. A. L.; SHARMA, M. M. A grain conductivity approach to shaly sandstones. **GEOPHYSICS**, v. 55, n. 10, p. 1347-1356, 1990. DOI: 10.1190/1.1442782

DE ROO, A. P. J.; JETTEN, V. G. Calibrating and validating the LISEM model for two data sets from the Netherlands and South Africa. **CATENA**, v. 37, n. 3, p. 477-493, 1999. DOI: 10.1016/S0341-8162(99)00034-X

DEGROOT-HEDLIN, C.; CONSTABLE, S. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. **GEOPHYSICS**, v. 55, n. 12, p. 1613-1624, 1990. DOI: 10.1190/1.1442813

DOS REIS, G. G.; REIS, M. das G. F. Fisiologia da brotação de eucalipto com ênfase nas suas relações hídricas. **Série Técnica IPEF**, v. 11, n. 30, p. 9-22, 1997.

DRESEL, P. E. et al. Effect of Eucalyptus plantations, geology, and precipitation variability on water resources in upland intermittent catchments. **Journal of Hydrology**, v. 564, p. 723-739, 2018. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.07.019

- EBLING, É. D. et al. Event-based hydrology and sedimentation in paired watersheds under commercial eucalyptus and grasslands in the Brazilian pampa biome. **International Soil and Water Conservation Research**, 2020. DOI:10.1016/j.iswcr.2020.10.008
- ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; BENDER, F. D. Impacts and uncertainties of climate change projections on Eucalyptus plantations productivity across Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118365, 2020. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118365
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997.
- EZEMA, O. K.; IBUOT, J. C.; OBIORA, D. N. Geophysical investigation of aquifer repositories in Ibagwa Aka, Enugu State, Nigeria, using electrical resistivity method. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 11, p. 100458, 2020. DOI: 10.1016/j.gsd.2020.100458
- FAN, B. et al. Exploring the interplay between infiltration dynamics and Critical Zone structures with multiscale geophysical imaging: A review. **Geoderma**, v. 374, p. 114431, 2020. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114431
- FAN, J. et al. Estimating groundwater recharge and evapotranspiration from water table fluctuations under three vegetation covers in a coastal sandy aquifer of subtropical Australia. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 1120-1129, 2014. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.08.039
- FAO. Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. **Global forest resources assessment 2010: Main report**. FAO Forestry Paper, v. 163. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010.
- FAO. Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. Forest Resources Assessment Programme. **Global forest resources assessment**, 2015.
- FERRAZ, S. F. de B. et al. Effects of Eucalyptus plantations on streamflow in Brazil: Moving beyond the water use debate. **Forest Ecology and Management**, v. 453, p. 117571, 2019. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.117571
- FERREIRA, E. T. et al. Fertilization and oversowing on natural grassland: effects on pasture characteristics and yearling steers performance. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, n. 9, p. 2039-2047, 2011. DOI: 10.1590/S1516-35982011000900028
- FERRETO, D. O. C. **Comportamento Hidrológico de Pequenas Bacias Hidrográficas com Três Espécies de Eucalyptus no Bioma Pampa**. 2019. 108 f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2019.
- FERRETO, D. et al. Water budget fluxes in catchments under grassland and Eucalyptus plantations of different ages. **Canadian Journal of Forest Research**, 2020. DOI: 10.1139/cjfr-2020-0156
- FILIZOLA, H. F.; GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. de. **Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise da qualidade ambiental: solo, água e sedimentos**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2006.

- FOSTER, S. et al. **Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais**. São Paulo: Servmar – Serviços Técnicos Ambientais Ltda, 2002.
- GHOSH, B.; PEKKAT, S. An Appraisal on the Interpolation Methods Used for Predicting Spatial Variability of Field Hydraulic Conductivity. **Water Resources Management**, v. 33, n. 6, p. 2175-2190, 2019. DOI: 10.1007/s11269-019-02248-1
- GIANG, N. V. et al. Landfill leachate assessment by hydrological and geophysical data: case study NamSon, Hanoi, Vietnam. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 20, n. 3, p. 1648-1662, 2018. DOI: 10.1007/s10163-018-0732-7
- HASAN, M. et al. Delineation of contaminated aquifers using integrated geophysical methods in Northeast Punjab, Pakistan. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 1, p. 12, 2020. DOI: 10.1007/s10661-019-7941-y
- HEALY, R. W.; COOK, P. G. Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, n. 1, p. 91-109, 2002. DOI: 10.1007/s10040-001-0178-0
- HEATH, R. R. **Basic Ground-Water Hydrology**. Denver: United States Geological Survey, 1987.
- HUDSON, E. et al. Integrated Hydrological and Geophysical Characterisation of Surface and Subsurface Water Contamination at Abandoned Metal Mines. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 229, n. 8, p. 256, 2018. DOI: 10.1007/s11270-018-3880-4
- HUNG VU, V.; MERKEL, B. J. Estimating groundwater recharge for Hanoi, Vietnam. **Science of The Total Environment**, v. 651, p. 1047-1057, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.225
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010**. 2010. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/sao-gabriel/panorama>>. Acesso em: 23 mar. 2020.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Tabela 5930: Área total existente em 31/12 dos efetivos da silvicultura, por espécie florestal**. 2020. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5930>>. Acesso em: 28 abr. 2020.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250.000**. 2019.
- IBÁ. Indústria Brasileira De Árvores. **Relatório 2019**. Brasília: Indústria Brasileira de Árvores, 2019.
- JESUS, J. B. Estimativa do balanço hídrico climatológico e classificação climática pelo método de Thornthwaite e Mather para o município de Aracaju-SE. **Scientia Plena**, v. 11, n. 5, p. 1-6, 2015.

JONES, J. A. et al. Forest-Water Interactions Under Global Change. In: LEVIA, D. F. et al. (org.). **Forest-Water Interactions**. Cham: Springer International Publishing, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-26086-6_24

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An introduction to geophysical exploration**. 3 ed. Malden: Blackwell Science, 2002.

KEMERICH, P. D. C. et al. Water Infiltration and Runoff Under Different Land Uses and Occupancy in a Hydrographic Basin. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 37, n. 2, p. 75, 2014. DOI: 10.11137/2014_2_75_88

KIANG, C. H.; OLIVA, A.; BARRERA, F. M. G. Mapeamento do Lençol Freático de Microbacias. Utilizando Método de Eletroresistividade. Fazenda Ponta das Canas - Município de Santa Margarida - RS. **Relatório Técnico**. Rio Claro, SP: Fundação UNESP, 2008.

KNIGHT, A. C.; WERNER, A. D.; IRVINE, D. J. Combined geophysical and analytical methods to estimate offshore freshwater extent. **Journal of Hydrology**, v. 576, p. 529-540, 2019. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.06.059

KRISHNASWAMY, J. et al. The groundwater recharge response and hydrologic services of tropical humid forest ecosystems to use and reforestation: Support for the “infiltration-evapotranspiration trade-off hypothesis”. **Journal of Hydrology**, v. 498, p. 191-209, 2013. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.06.034

LABRECQUE, G.; CHESNAUX, R.; BOUCHER, M.-A. Water-table fluctuation method for assessing aquifer recharge: application to Canadian aquifers and comparison with other methods. **Hydrogeology Journal**, v. 28, n. 2, p. 521–533, 2020. DOI: 10.1007/s10040-019-02073-1

LASFARGUES, P. **Prospection électrique par courants continus**. Paris: Masson, 1957.

LIMA, W. de P. **Hidrologia Florestal Aplicada ao Manejo de Bacias Hidrográficas**. Piracicaba, SP: Universidade de São Paulo, 2008.

LIU, Y. et al. Influence of soil moisture and plant roots on the soil infiltration capacity at different stages in arid grasslands of China. **CATENA**, v. 182, p. 104147, 2019. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104147

LOKE, M. H. **Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method**. Geotomo Software Sdn Bhd, 2019.

LOKE, M. H.; BARKER, R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method1. **Geophysical Prospecting**, v. 44, n. 1, p. 131–152, 1996. DOI: 10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x

MACHADO, J. L. F.; FREITAS, M. A. de. **Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul: relatório final**. Porto Alegre: CPRM, 2005. Escala 1:750.000.

- MAEDA, S.; MEDRADO, M. J. S. Plantações florestais comerciais e o solo. In: OLIVEIRA, Y. M. M. de; OLIVEIRA, E. B. de (org.). **Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental**. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2017. p. 21–29.
- MALLMANN, M. S. **Infiltração de água no solo condicionada pelo uso de plantas de cobertura**. 2017. 77 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2017.
- MANSOUR, K. et al. Geophysical characterization of the role of fault and fracture systems for recharging groundwater aquifers from surface water of Lake Nasser. **NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics**, v. 7, n. 1, p. 99-106, 2018. DOI: 10.1016/j.nrjag.2018.02.001
- MAZIERO, T. A. **Monitoramento de água subterrânea em área urbana: aspectos quantitativos**. 2005. 236 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- MCLACHLAN, P. J. et al. Geophysical characterisation of the groundwater–surface water interface. **Advances in Water Resources**, v. 109, p. 302–319, 2017. DOI: 10.1016/j.advwatres.2017.09.016
- MENDELSON, K. S.; COHEN, M. H. The effect of grain anisotropy on the electrical properties of sedimentary rocks. **GEOPHYSICS**, v. 47, n. 2, p. 257–263, 1982. DOI: 10.1190/1.1441332
- MENDONÇA, L. A. R. et al. Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 89-98, 2009. DOI 10.1590/S1413-41522009000100010
- MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para a sobrevivência futura. **Agroecol. e Desenvol. Rur. Sustent.**, v. 3, n. 4, p. 33-38, 2002.
- MIGUEZ, M.; VERÓL, A.; GREGORIO, L. T. D. **Gestão de Riscos e Desastres Hidrológicos**. Brasil: Elsevier Science, 2017.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Pampa**, 2020. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/biomas/pampa>>. Acesso em: 20 fev. 2020.
- MOLINARI, D. C.; VIEIRA, A. F. G. Considerações Preliminares Sobre a Capacidade de Infiltração de Água no Solo no Distrito Industrial II Manaus (AM). In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 5, 2004, Santa Maria/RS. **Anais...** Santa Maria: SINAGEO, 2004.
- MOON, S.-K.; WOO, N. C.; LEE, K. S. Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge. **Journal of Hydrology**, v. 292, n. 1, p. 198-209, 2004. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2003.12.030
- MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A Cultura do Eucalipto no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2000.

- MOREIRA, J. M. M. Á. P.; OLIVEIRA, E. B. de. Importância do setor florestal brasileiro com ênfase nas plantações florestais comerciais. In: OLIVEIRA, Y. M. M. de; OLIVEIRA, E. B. de (org.). **Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental**. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2017. p. 11–19.
- MORENO, J. A. Clima do Rio Grande do Sul. **Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul**, n. 11, p. 49–83, 1961.
- MORETTI FILHO, J.; MANFRINATO, H. A. Determinação da capacidade de infiltração do solo para fins de irrigação por aspersão. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 22, n. 0, p. 37–52, 1965. DOI: 10.1590/S0071-12761965000100004
- NOVAES, R. F.; BARROS, N. F. de; COSTA, L. M. Aspectos nutricionais e ambientais do eucalipto. **Revista Silvicultura**, v. 68, p. 10–17, 1996.
- NYATUAME, M.; AMEKUDZI, L. K.; AGODZO, S. K. Assessing the land use/land cover and climate change impact on water balance on Tordzie watershed. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 20, p. 100381, 2020. DOI: 10.1016/j.rsase.2020.100381
- OGDEN, C. B.; VAN ES, H. M.; SCHINDELBECK, R. R. Miniature Rain Simulator for Field Measurement of Soil Infiltration. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 4, p. 1041-1043, 1997. DOI: 10.2136/sssaj1997.03615995006100040008x
- OH, Y. H. et al. Determining groundwater inflow and Si behavior in a wetland using ²²²Rn mass balance and multidisciplinary approach. **Journal of Hydrology**, v. 591, p. 125575, 2020. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125575
- OHWOHERE-ASUMA, O. et al. Geophysical investigation of resistivity and groundwater quality in Ogbe-Ijoh coastal area of the western Niger Delta of Nigeria. **Applied Water Science**, v. 10, n. 2, p. 70, 2020. DOI: 10.1007/s13201-020-1144-0
- OLIVEIRA, T. E. de et al. Agricultural land use change in the Brazilian Pampa Biome: The reduction of natural grasslands. **Land Use Policy**, v. 63, p. 394–400, 2017. DOI: 10.1016/j.landusepol.2017.02.010
- OMER, A. et al. Water scarcity in the Yellow River Basin under future climate change and human activities. **Science of The Total Environment**, v. 749, p. 141446, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141446
- ORELLANA, E. **Prospección geoelectrica en corriente continua**. Madrid: Paraninfo, 1982.
- OSINOWO, O. O.; FALUFOSI, M. O.; OMIYALE, E. O. Integrated electromagnetic (EM) and Electrical Resistivity Tomography (ERT) geophysical studies of environmental impact of Awotan dumpsite in Ibadan, southwestern Nigeria. **Journal of African Earth Sciences**, v. 140, p. 42–51, 2018. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2017.12.026
- PARKHOMENKO, E. I. **Electrical Properties of Rocks**. Boston, MA: Springer US, 1967. DOI: 10.1007/978-1-4615-8609-8. Acesso em: 21 ago. 2020.

PARSEKIAN, A. D. et al. Multiscale geophysical imaging of the critical zone. **Reviews of Geophysics**, v. 53, n. 1, p. 1–26, 2015. DOI: 10.1002/2014RG000465

PASSOS, M.; ZAMBRZYCKI, G. C.; PEREIRA, R. S. Balanço Hídrico e Classificação Climática para uma Determinada Região de Chapadinha-MA. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada - RBAI**, v. 10, n. 4, p. 758-766–766, 2016.

PELÁEZ, J. J. Z. **Hidrologia Comparativa em Bacias Hidrográficas com Eucalipto e Campo**. 2014. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

PILLAR, V. de P. **Campos sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente - MMA, 2009.

QI, J. et al. Effects of surface runoff and infiltration partition methods on hydrological modeling: A comparison of four schemes in two watersheds in the Northeastern US. **Journal of Hydrology**, v. 581, p. 124415, 2020. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124415

REICHERT, J. M. et al. Estimating water retention and availability in cultivated soils of southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 21, p. e00277, 2020. DOI: 10.1016/j.geodrs.2020.e00277

REICHERT, J. M. et al. Water balance in paired watersheds with eucalyptus and degraded grassland in Pampa biome. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 237-238, p. 282-295, 2017. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.02.014

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades físicas do solo**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Solos, 2006.

RICCIOLI, F. et al. Indicators of sustainable forest management to evaluate the socio-economic functions of coppice in Tuscany, Italy. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 70, p. 100732, 2020. DOI: 10.1016/j.seps.2019.100732

ROCHA, M. S. Q. **Inversão do Traço Sísmico: O método e sua aplicação em Amberjack, Golfo do México**. 2013. 58 f. Bacharelado em Geofísica - Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2013.

RODRIGUES, M. F. et al. Coarse and fine sediment sources in nested watersheds with eucalyptus forest. **Land Degradation & Development**, v. 29, n. 8, p. 2237-2253, 2018. DOI: 10.1002/ldr.2977

RODRIGUES, M. F. et al. Hydrosedimentology of nested subtropical watersheds with native and eucalyptus forests. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, n. 7, p. 1311-1324, 2014. DOI: 10.1007/s11368-014-0885-5

ROEHRS, S. A. **Modelagem matemática da infiltração de água no solo e distribuição espacial de atributos físicos de um Latossolo argiloso sob sistemas de manejo**. 2017. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

ROY, D. et al. Infiltration into Frozen Silty Clay Loam Soil with Different Soil Water Contents in the Red River of the North Basin in the USA. **Water**, v. 12, n. 2, p. 321, 2020. DOI: 10.3390/w12020321

SANTAROSA, E. Gestão da propriedade rural. In: SANTAROSA, E.; PENTEADO JÚNIOR, J. F.; GOULART, I. C. G. dos R. (org.). **Cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda**. Brasília: Embrapa, 2014. p. 127-132.

SANTAROSA, E. et al. Importância socioeconômica e principais usos do eucalipto. In: SANTAROSA, E.; PENTEADO JÚNIOR, J. F.; GOULART, I. C. G. dos R. (org.). **Cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda**. Brasília: Embrapa, 2014. p. 13-23.

SANTI, A. L. **Relação Entre Indicadores de Qualidade do Solo e a Produtividade das Culturas em Áreas com Agricultura de Precisão**. 2007. 175 f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

SANTI, A. L. et al. Soil physical and hydraulic changes in different yielding zones under no-tillage in Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 15, p. 1326-1335, 2016. DOI: 10.5897/AJAR2015-10643

SANTOS, E. L. dos et al. Chiseling and gypsum application affecting soil physical attributes, root growth and soybean yield. **REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA**, v. 50, n. 4, 2019. DOI: 10.5935/1806-6690.20190063

SEN, P. N.; GOODE, P. A.; SIBBIT, A. Electrical conduction in clay bearing sandstones at low and high salinities. **Journal of Applied Physics**, v. 63, n. 10, p. 4832-4840, 1988. DOI: 10.1063/1.340476

SERATTO, C. D. et al. **Infiltrômetro de aspersão de Cornell aperfeiçoado: aspectos construtivos, operacionais e de manutenção**. 1. ed. Londrina: Embrapa Soja, 2019.

SHARMA, P. V. **Environmental and engineering geophysics**. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 1997.

SILVA, P. A. D.; LOUREIRO, C. de O. PEQUENAS VARIAÇÕES PIEZOMÉTRICAS NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14., 2006, Curitiba, PR. **Anais...** Curitiba/PR: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2006. p. 1-14.

SILVEIRA, A. L. S.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. Infiltração e Armazenamento no Solo. In: **HIDROLOGIA: CIÊNCIA E APLICAÇÃO**. 4. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2012.

SMITH, R. E. The infiltration envelope: Results from a theoretical infiltrometer. **Journal of Hydrology**, v. 17, n. 1-2, p. 1-22, 1972. DOI: 10.1016/0022-1694(72)90063-7

SOLAKIAN, J. et al. Investigating the use of satellite-based precipitation products for monitoring water quality in the Occoquan Watershed. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 26, p. 100630, 2019. DOI: 10.1016/j.ejrh.2019.100630

SOUZA, E. de et al. Spatial and Temporal Potential Groundwater Recharge: the Case of the Doce River Basin, Brazil. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 43, 2019. DOI: 10.1590/18069657rbc20180010

SULZBACHER, M. A. et al. Co-invasion of ectomycorrhizal fungi in the Brazilian Pampa biome. **Applied Soil Ecology**, v. 130, p. 194-201, 2018. DOI: 10.1016/j.apsoil.2018.06.007

SUN, G. et al. Effects of timber management on the hydrology of wetland forests in the southern United States. **Forest Ecology and Management**, v. 143, n. 1, Special Issue: THE SCIENCE OF MANAGING FORESTS TO SUSTAIN, p. 227–236, 2001. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00520-X

TASHAYO, B. et al. Digital mapping of Philip model parameters for prediction of water infiltration at the watershed scale in a semi-arid region of Iran. **Geoderma Regional**, v. 22, p. e00301, 2020. DOI: 10.1016/j.geodrs.2020.e00301

TATAGIBA, S. D. et al. Comportamento fisiológico de dois clones de *Eucalyptus* na época seca e chuvosa. **Cerne**, v. 13, n. 2, p. 149-159, 2007.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

TEODORO, V. L. I. et al. O Conceito de Bacia Hidrográfica e a Importância da Caracterização Morfométrica para o Entendimento da Dinâmica Ambiental Local. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, v. 11, n. 1, p. 137, 2007. DOI: 10.25061/2527-2675/ReBraM/2007.v11i1.236

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, Publications in Climatology, 1955. v. 3

TOMASELLA, J.; ROSSATO, L. **BALANÇO HÍDRICO**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005.

TRIMBLE, S. W.; WEIRICH, F. H.; HOAG, B. L. Reforestation and the reduction of water yield on the Southern Piedmont since circa 1940. **Water Resources Research**, v. 23, n. 3, p. 425-437, 1987. DOI: 10.1029/WR023i003p00425

TUCCI, C. E. M.; MENDES, C. A. **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Brasil, Governo Federal, 2006.

UIL, H. **State of the art on monitoring and assessment of groundwaters**. Lelystad: RIZA, Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment, 1999.

VALENTE, M. L. et al. Quantification of sediment source contributions in two paired catchments of the Brazilian Pampa using conventional and alternative fingerprinting approaches. **Hydrological Processes**, v. 34, n. 13, p. 2965-2986, 2020. DOI: 10.1002/hyp.13768

VALENTE, M. L. **Quantifying Sediment Fluxes And Sources In Eucalyptus And Grassland Catchments In The Brazilian Pampa Biome**. 2018. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

VASCONCELOS, K. et al. Livestock-derived greenhouse gas emissions in a diversified grazing system in the endangered Pampa biome, Southern Brazil. **Land Use Policy**, v. 75, p. 442-448, 2018. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.03.056

VIRGENS, A. P. das; FREITAS, L. C. de; LEITE, Â. M. P. Análise Econômica e de Sensibilidade em um Povoamento Implantado no Sudoeste da Bahia. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 2, p. 211-219, 2016. DOI: 10.1590/2179-8087.104914

VITAL, M. H. F. Impacto ambiental de florestas de eucalipto. **Revista do BNDES**, v. 14, n. 28, p. 235-275, 2007.

WEST, P. W. **Growing Plantation Forests**. Cham: Springer International Publishing, 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-01827-0. Acesso em: 25 fev. 2020.

YENEHUN, A. et al. Groundwater recharge and water table response to changing conditions for aquifers at different physiography: The case of a semi-humid river catchment, northwestern highlands of Ethiopia. **Science of The Total Environment**, v. 748, p. 142243, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142243

YIHDEGO, Y.; NZIKOU, M. M. Application of Airborne Geophysics and Geochemistry to Characterize Groundwater Flow Path. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2017. DOI: 10.1007/s10706-017-0382-x. Acesso em: 19 maio 2020.

ZAGO, M. M.; FRIES, M.; RAMIRES, J. E. F. Groundwater infiltration in a gold mine—A geoelectrical investigation model as an aid to dewatering process determination. **Journal of Applied Geophysics**, v. 172, p. 103909, 2020. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2019.103909

ZUFFO, A. C.; ZUFFO, M. S. R. **Gerenciamento de recursos hídricos: conceituação e contextualização**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

ZWIRTES, A. L. Utilização do infiltrômetro de cornell e dos anéis concêntricos para determinação da infiltração de água em um Latossolo Vermelho. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 6Supl1, p. 3489, 2013. DOI: 10.5433/1679-0359.2013v34n6Supl1p3489